

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO**

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

Gallerie Nizza e Alì - Relazione geotecnica e di calcolo delle gallerie naturali

SCALA:

-

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

RS2S 02 D 07 RB GN0700 001 B

| Rev. | Descrizione        | Redatto                       | Data     | Verificato | Data     | Approvato    | Data     | Autorizzato Data       |
|------|--------------------|-------------------------------|----------|------------|----------|--------------|----------|------------------------|
| B    | Consegna al CSLLPP | A. Corbo<br>A. Duzi<br>M.ulli | Gen 2018 | M. Ricci   | Gen 2018 | P. Carlesimo | Gen 2018 | A. Sciotti<br>Gen 2018 |
|      |                    |                               |          |            |          |              |          |                        |
|      |                    |                               |          |            |          |              |          |                        |
|      |                    |                               |          |            |          |              |          |                        |

ITALFERR S.p.A.  
U.O. GALLERIE  
Aut. Ing. Alessandra Sciotti  
Cognome degli Ingegneri di Redazione n° 13846

File:

n. Elab.: 1628

## 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.....                                    | 8  |
| 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 | LLM – Conglomerati.....                          | 21 |
|       | 8.3.2.1 Caratteristiche fisiche.....             | 21 |
|       | 8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche.....          | 23 |
|       | 8.3.2.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....  | 27 |
| 8.3.3 | FDN/GLD/TAM/MMF – Argilloscisti/Filladi.....     | 27 |
|       | 8.3.3.1 Caratteristiche fisiche.....             | 28 |
|       | 8.3.3.2 Caratteristiche meccaniche.....          | 29 |
|       | 8.3.3.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....  | 35 |
| 8.3.4 | VEP1/VEP2 – Metarentiti/arenarie.....            | 36 |
|       | 8.3.4.1 Caratteristiche fisiche.....             | 36 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 8.3.4.2 | <i>Caratteristiche meccaniche</i> .....  | 37 |
| 8.3.4.3 | <i>Riepilogo dei parametri geotecnici</i> .....  | 39 |
| 8.3.5   | <i>Definizione degli intervalli dei parametri geotecnici delle unità interessate dalle opere</i> ..... | 40 |
| 8.3.6   | <i>Il regime idraulico</i> .....   | 40 |
| 8.3.6.1 | <i>Complesso metamorfico (FDN, VEPI)</i> .....   | 40 |
| 8.3.6.2 | <i>Complesso conglomeratico-ghiaioso (LLM)</i> .....   | 40 |
| 8.3.6.3 | <i>Complesso detritico-colluviale (b2)</i> .....   | 40 |
| 8.3.7   | <i>Lo stato tensionale in sito</i> .....   | 41 |
| 9       | <b>FASE DI DIAGNOSI</b> .....  | 42 |
| 9.1     | <b>CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO</b> .....   | 42 |
| 9.2     | <b>DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO</b> .....   | 43 |
| 9.2.1   | <i>Analisi con i metodi all'equilibrio limite</i> .....  | 43 |
| 9.2.1.1 | <i>Metodo di analisi: Tamez (1984)</i> .....   | 43 |
| 9.2.1.2 | <i>Sezioni analizzate</i> .....  | 44 |
| 9.2.1.3 | <i>Risultati delle analisi</i> .....   | 45 |
| 9.2.2   | <i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche</i> .....   | 45 |
| 9.2.2.1 | <i>Metodo di analisi</i> .....   | 45 |
| 9.2.2.2 | <i>Sezioni analizzate</i> .....  | 46 |
| 9.2.2.3 | <i>Risultati delle analisi</i> .....   | 46 |
| 9.2.3   | <i>Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo</i> .....                      | 47 |
| 10      | <b>FASE DI TERAPIA</b> .....   | 48 |
| 10.1    | <b>DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO</b> .....  | 48 |
| 10.1.1  | <i>Sezione tipo A1</i> .....   | 48 |
| 10.1.2  | <i>Sezione tipo A2</i> .....   | 49 |
| 10.1.3  | <i>Sezione tipo B1</i> .....   | 49 |
| 10.1.4  | <i>Sezione tipo C1</i> .....   | 50 |
| 10.1.5  | <i>Sezione tipo C2v</i> .....  | 50 |
| 10.2    | <b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI</b> .....   | 51 |
| 10.3    | <b>ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO</b> .....   | 53 |
| 10.3.1  | <i>Criteria di verifica</i> .....  | 53 |
| 10.3.2  | <i>Sezione A2</i> .....  | 59 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 10.3.2.1 | Stabilità del fronte e del cavo.....                        | 59 |
| 10.3.2.2 | Interazione opera-terreno.....                              | 60 |
| 10.3.3   | Sezione C1.....   | 62 |
| 10.3.3.1 | Stabilità del fronte e del cavo.....                        | 62 |
| 10.3.3.2 | Interazione opera-terreno.....                              | 63 |
| 10.3.4   | Sezione C2v.....  | 64 |
| 10.3.4.1 | Stabilità del fronte e del cavo.....                        | 64 |
| 10.3.4.2 | Interazione opera-terreno.....                              | 65 |
| 11       | FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO.....          | 66 |
| 11.1     | MONITORAGGIO IN CORSO D’OPERA.....                          | 66 |
| 11.2     | CRITERI GENERALI PER L’APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO..... | 66 |
| 12       | CONCLUSIONI.....  | 67 |

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

## 1 PREMESSA

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

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

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

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

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

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

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

## 2 SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Nella presente relazione si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione delle gallerie Nizza ed Alì, afferenti il Lotto 2. La galleria Nizza è una galleria lunga circa 500 m mentre la galleria Alì ha una lunghezza di circa 150 m, entrambe a doppio binario realizzate con metodo di scavo tradizionale.

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

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

2. fase di diagnosi: si esegue la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione per la determinazione delle categorie di comportamento (§ 9.2);

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

4. fase di verifica e messa a punto: il progetto è completato dal piano di monitoraggio da predisporre ed attuare nella fase realizzativa (§ 11.1). Nel piano di monitoraggio sono individuate le grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso al procedere dello scavo, verificare la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le soluzioni progettuali nell'ambito delle variabilità previste in progetto. Nel capitolo 11.2 sono, inoltre, descritti i criteri generali per l'applicazione delle sezioni tipo e la gestione delle variabilità in funzione dei risultati del monitoraggio in corso d'opera.

La progettazione è stata sviluppata nel rispetto della normativa vigente.

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

### 4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 4.1 Documenti Referenziati

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

#### 4.2 Documenti Correlati

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

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

- Rif. [15] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.);
- Rif. [16] Bernaud D., Benamar I., Rousset G. (1994). La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques – Revue Francaise de Géotechnique, N° 68;
- Rif. [17] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l’étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60;
- Rif. [18] Peck R.B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. SOA Report 7<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE Mexico City, State of the Art Volume;
- Rif. [19] Burland J.B., Wroth C.P. (1974). Settlements of buildings and associated damage. SOA Review Conf. Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, London;
- Rif. [20] Burland J.B. (1997). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.). Balkema, Rotterdam;
- Rif. [21] Boscarding M.D., Cording E.G. (1989). Building response to excavation-induced settlement. Jnl. Geo. Engrg. ASCE, 115;
- Rif. [22] Hoek E., Brown E.T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength”, Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186;
- Rif. [23] Hoek E., Carranza-Torres C., Cortkum B. (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”;
- Rif. [24] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy;
- Rif. [25] Hoek E., Diederichs M. S. (2006), “Empirical Estimation of rock mass Modulus”, Intl. J. Rock Mech. & Mining Sciences 43 (2006), 203-215;
- Rif. [26] Broms B.B., Bennermark H. (1967), “Stability of clay at vertical openings”, J. Soil Mechanics and Foundations, Div. Am. Soc. Civ. Eng., 93: 71-94;
- Rif. [27] Terzaghi, K. & Peck, R.B. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York;
- Rif. [28] Marinos P. & Hoek E. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch, Bull. Engg. Geol. 60, 85-92;
- Rif. [29] 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.

### 4.3 Documenti Superati

Non sono presenti documenti superati.

## 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. [31] U.O. Gallerie, documento RS 2S02D07SPGN000000 1B “Caratteristiche dei materiali – Note generali” datato Gennaio 2018;
- Rif. [32] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000001B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo A1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [33] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000002B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo A2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [34] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000003B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [35] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000004B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [36] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000005B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [37] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000007B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2v - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018.

|   |   |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI  | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

## 7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

### 7.1 Il tracciato e le opere in sotterraneo

Le gallerie Nizza ed Alì sono gallerie a doppio binario, realizzate con metodo di scavo tradizionale. La prima ha una lunghezza pari a 497 m (di cui 37 m in artificiale) mentre la seconda è lunga 144 m (di cui 67 m in artificiale).

Di seguito sono elencate le progressive di riferimento della galleria Nizza (binario pari):

- da pk 33+435,5 a pk 33+450,0 (L=14,5m) galleria artificiale;
- da pk 33+450,0 a pk 33+910,0 (L=460,0 m) galleria naturale;
- da pk 33+910,0 a pk 33+932,5 (L=22,5 m) galleria artificiale.

Di seguito sono elencate le progressive di riferimento della galleria Alì (binario pari):

- da pk 34+336,0 a pk 34+392,0 (L=56,0) galleria artificiale;
- da pk 34+392,0 a pk 34+469,5 (L=77,5,0 m) galleria naturale;
- da pk 34+469,5 a pk 34+480,3 (L=10,8m) galleria artificiale.

La galleria Nizza presenta coperture generalmente ridotte, comprese tra 10 e 65 m circa ed ha un andamento altimetrico monopendente (al 1,7‰) in discesa procedendo in direzione Messina.

La galleria Alì presenta anche essa coperture ridotte, non superiori a 20 m circa, ed ha un andamento altimetrico monopendente (al 2‰) in discesa procedendo in direzione Messina.

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

### 7.2 Interferenze lungo il tracciato

Entrambe le gallerie presentano coperture modeste lungo l'intero tracciato; si registrano interferenze costituite da fabbricati a piano campagna, sia per la galleria Nizza, sia per la galleria Alì.

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

## 8 FASE CONOSCITIVA

Nella fase conoscitiva si acquisiscono gli elementi necessari alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito e alla caratterizzazione e modellazione geotecnica del volume significativo interessato dall'opera in sottoterraneo.

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 dalle Gallerie Nizza ed Alì in progetto. Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (da Rif. [14] a Rif. [26]).

La Galleria Nizza si colloca nella porzione settentrionale della tratta in progetto e presenta quote del piano ferro variabili tra 43.4 e 42.5 m s.l.m.. Nel tratto iniziale il tracciato intercetta i depositi delle Metamorfiti di Mandanici (**FDN**) sovrascorse sulle metamorfiti del Verrucano peloritano di Alì (**VEP1**). Questi ultimi risultano interessati da una importante faglia diretta ad alto angolo all'altezza del km 33+698. Nel tratto finale, invece, la galleria attraversa i sedimenti clastici dei Conglomerati di Allume (**LLM**) e un lembo di coltri eluvio-colluviali (**b2**) di limitato spessore. I depositi pleistocenici poggiano in discordanza sulle metamorfite del Verrucano peloritano di Alì (**VEP1**).

La Galleria Alì si colloca nella porzione settentrionale dell'area di studio e presenta quote del piano ferro variabili tra 41.4 e 41.6 m s.l.m.. Il tracciato intercetta, per tutto il suo sviluppo, il Verrucano peloritano di Alì (**VEP1**). Solo in corrispondenza dell'imbocco Nord-orientale della galleria in questione, il tracciato intercetta un'estesa fascia di depositi detritico-colluviali (**b2**) di modesto 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 sottoterraneo, 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);

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

- misure della velocità sonica  $V_p$  e  $V_s$ .

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

### 8.3 Caratterizzazione e modellazione geotecnica

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

L'analisi e l'interpretazione di tutti i dati e le informazioni ad oggi disponibili, sia in riferimento al Lotto 1 che al Lotto 2, hanno portato ad individuare formazioni assimilabili dal punto di vista geotecnico, nel seguito definite "Unità geotecniche". Tali unità sono riportate in Tabella 1 con riferimento al tratto di interesse delle Gallerie Nizza ed Alì 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 - Gallerie Nizza ed Alì – Lotto 2**  
**(in parentesi sono riportate le formazioni afferenti il Lotto 1)**

| Unità geotecnica | Descrizione            |
|------------------|------------------------|
| b2;ba;bb;g1;MSS  | Ghiaie e sabbie limose |
| LLM              | Conglomerati           |
| FDN/GLD/TAM/MMF  | Argilloscisti/Filladi  |
| VEP1/VEP2        | Metareniti/arenarie    |

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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

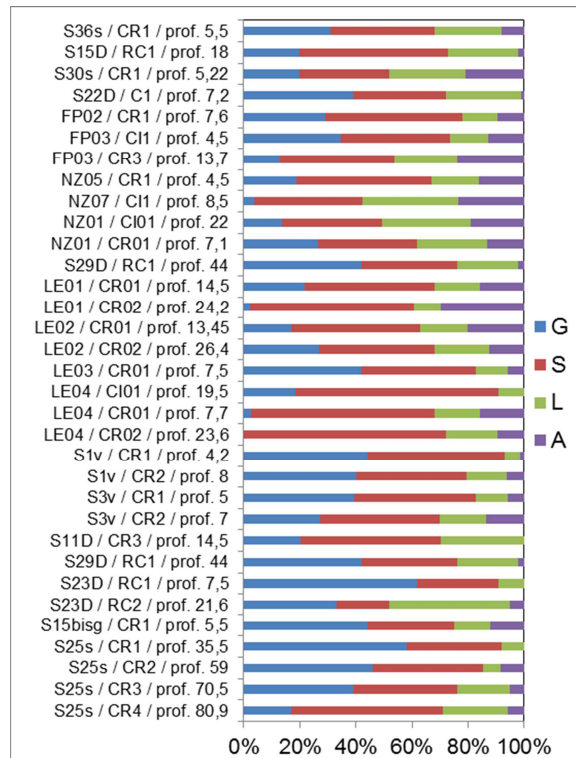
L'unità geotecnica delle ghiaie e sabbie limose "b2;ba;bb;g1;MSS" raggruppa le ghiaie in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa afferenti i depositi detritico-colluviali (b2), i depositi alluvionali attuali (ba) e recenti (bb), i depositi di piana litorale (g1) e le ghiaie e sabbie di Messina (MSS) (Figura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



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

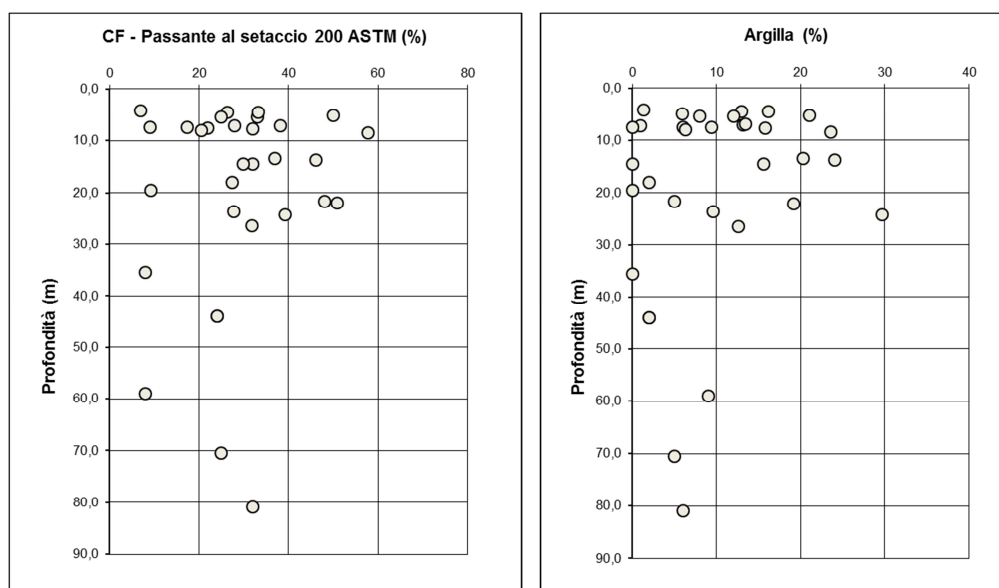
#### 8.3.1.1 Caratteristiche fisiche

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

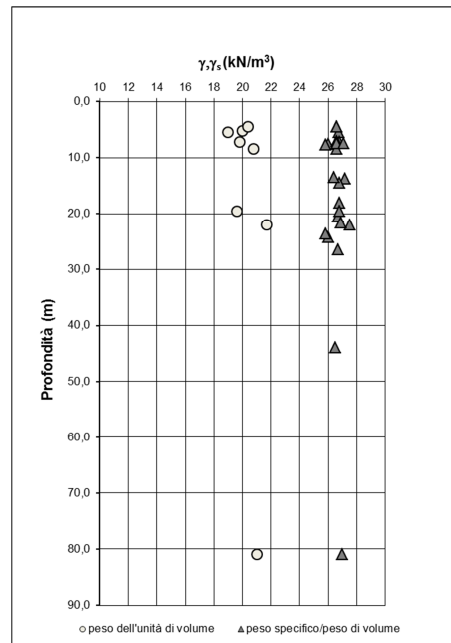


**Figura 2 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: analisi granulometrica**

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



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



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

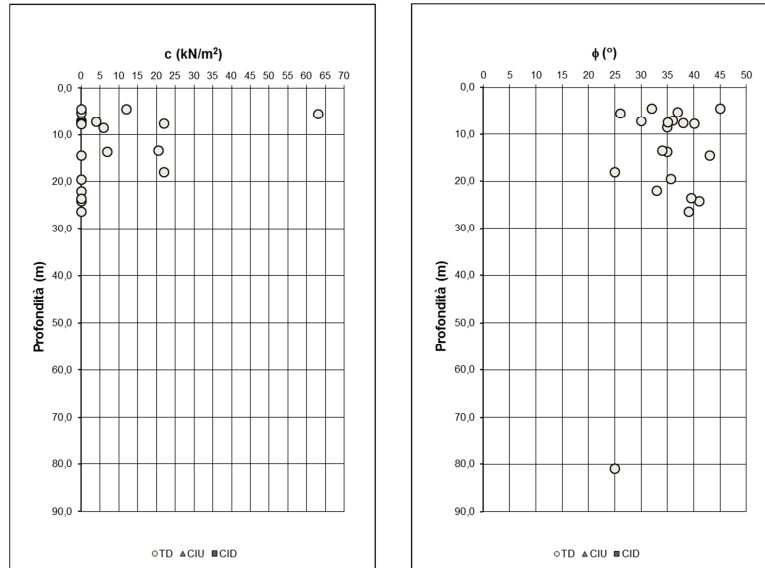
In Figura 4 sono riportati il peso dell'unità di volume insieme al peso specifico del materiale.

### 8.3.1.2 Caratteristiche meccaniche

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

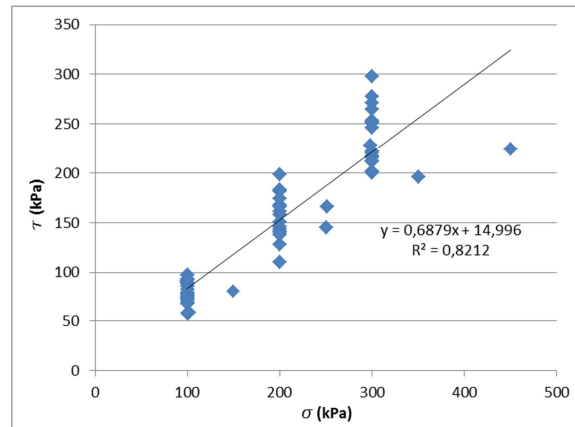
In riferimento alle prove di laboratorio, sono state compiute prove di taglio diretto i cui risultati in termini di coesione efficace ed angolo d'attrito sono riportati in Figura 5.





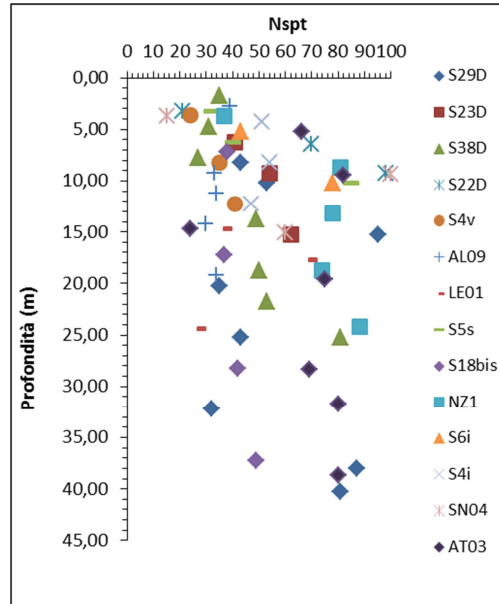
**Figura 5 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: coesione drenata ed angolo di attrito**

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

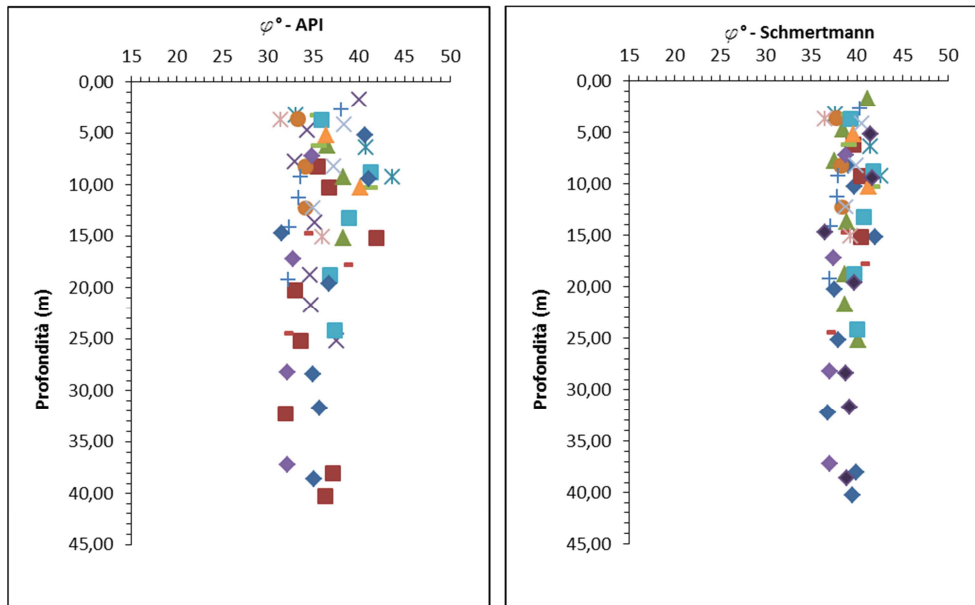


**Figura 6 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: Involuppo a rottura delle prove di taglio diretto**

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

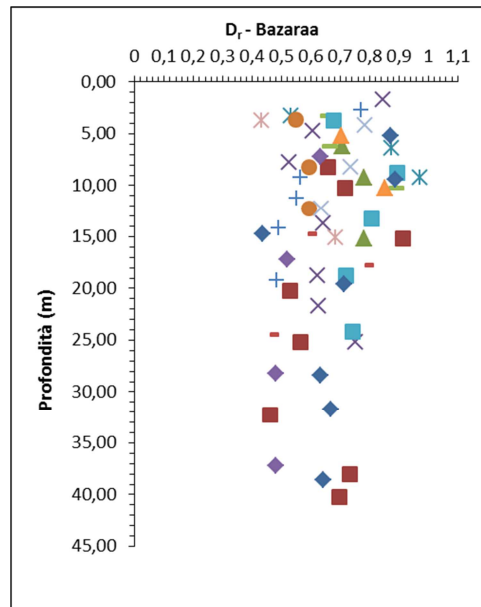


**Figura 7 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: valori di  $N_{spt}$**



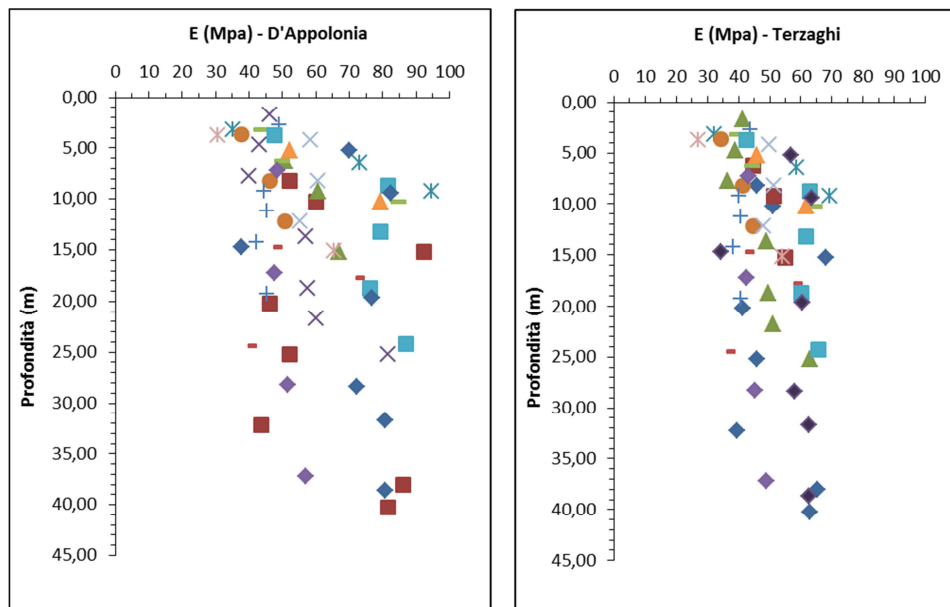
**Figura 8 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: angolo d'attrito ricavato dalle prove SPT**

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).

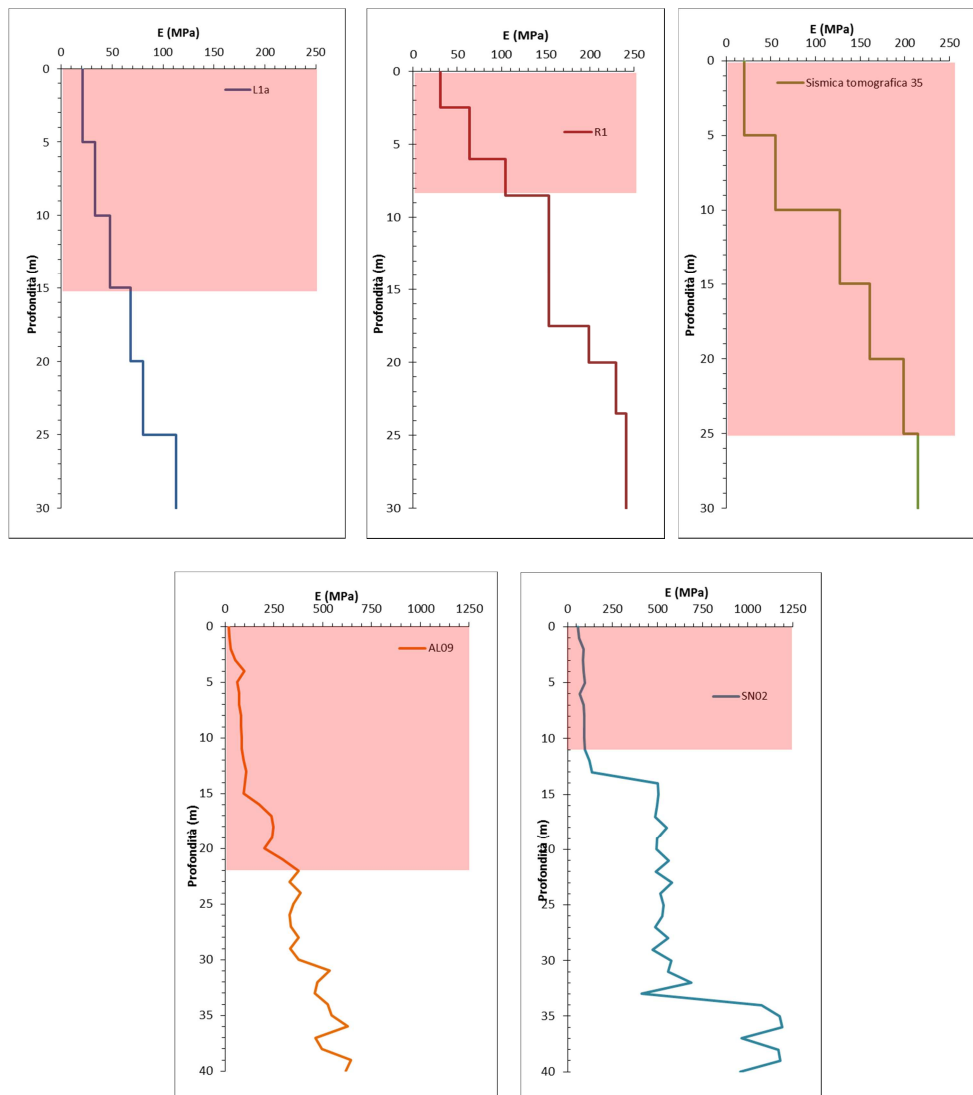


**Figura 10 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: moduli elastici ricavati dalle prove SPT**

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 simica tomografica n.35, alle *down-hole* AL09 ed SN02, ed alla MASW/Re.Mi. R1 (solo le parti evidenziate in rosso sono relative alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).



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

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

|   |   |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI  | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 8.3.1.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

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

**Tabella 2 - Gallerie Nizza ed Alì – Riepilogo parametri geotecnici - b2;ba;bb;g1;MSS**

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

### 8.3.2 **LLM – Conglomerati**

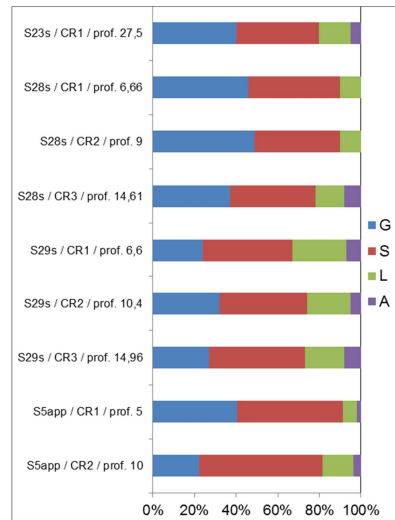
L'unità geotecnica "LLM" consiste nei Conglomerati di Allume (LLM), conglomerati in matrice sabbiosa generalmente abbondante, da poco a mediamente cementata, con passaggi di ghiaie ed, a luoghi, intercalazioni di limi e limi argillosi (Figura 12).



**Figura 12 – Affioramento della matrice sabbioso-ghiaiosa dell'LLM (stop geologico G115)**

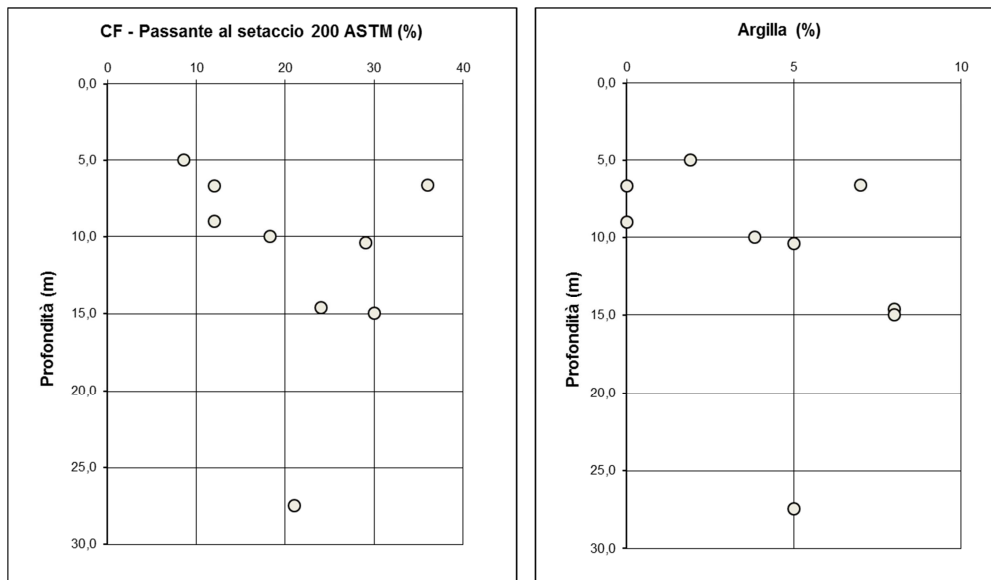
#### 8.3.2.1 Caratteristiche fisiche

Le analisi granulometriche (Figura 13) mostrano mediamente una prevalenza significativa di sabbia (45%) ed, in maniera secondaria, di ghiaia (35%) con una percentuale inferiore di limo (15%) ed argilla (4%). Secondo le indicazioni delle Raccomandazioni AGI (Rif. [14]) l'unità risulta classificabile come sabbia limosa con ghiaia.

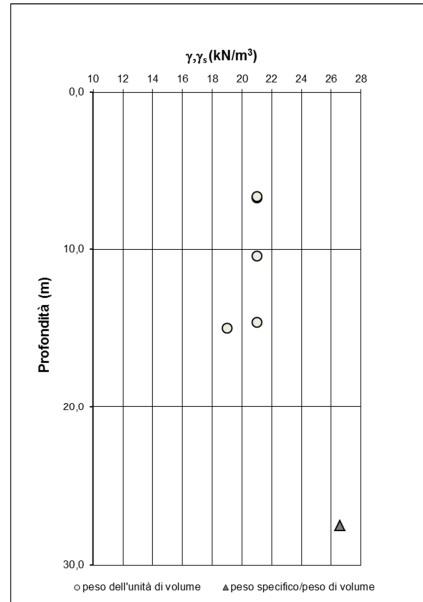


**Figura 13 - Formazione LLM: analisi granulometrica**

Nella Figura 14 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 35% mentre il contenuto di argilla nei campioni analizzati risulta in genere inferiore al 10%.



**Figura 14 - Formazione LLM: passante al setaccio 200 ASTM e percentuale di argilla**



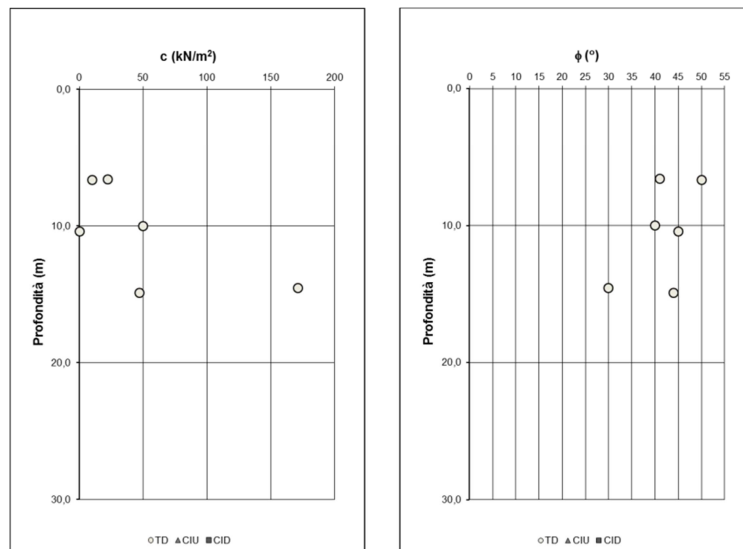
**Figura 15 - Formazione LLM: peso dell'unità di volume e peso specifico**

In Figura 15 sono riportati il peso dell'unità di volume insieme al peso specifico del materiale.

### 8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche

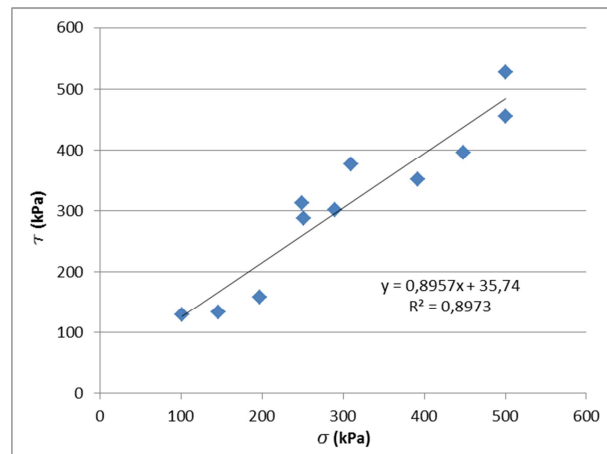
I parametri meccanici sono stati ricavati da un esame complessivo di tutte le prove in sito e in laboratorio disponibili.

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 16.



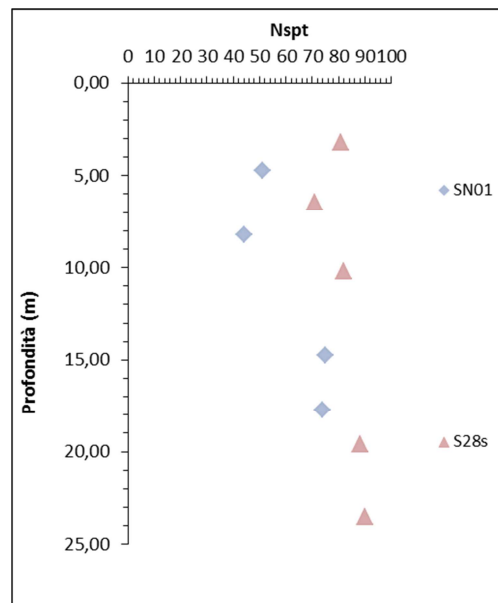
**Figura 16 – Formazione LLM: coesione drenata ed angolo di attrito**

In Figura 17 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 0,90) cui corrispondono un valore di coesione di 36 kPa ed un angolo d'attrito pari a 42°.



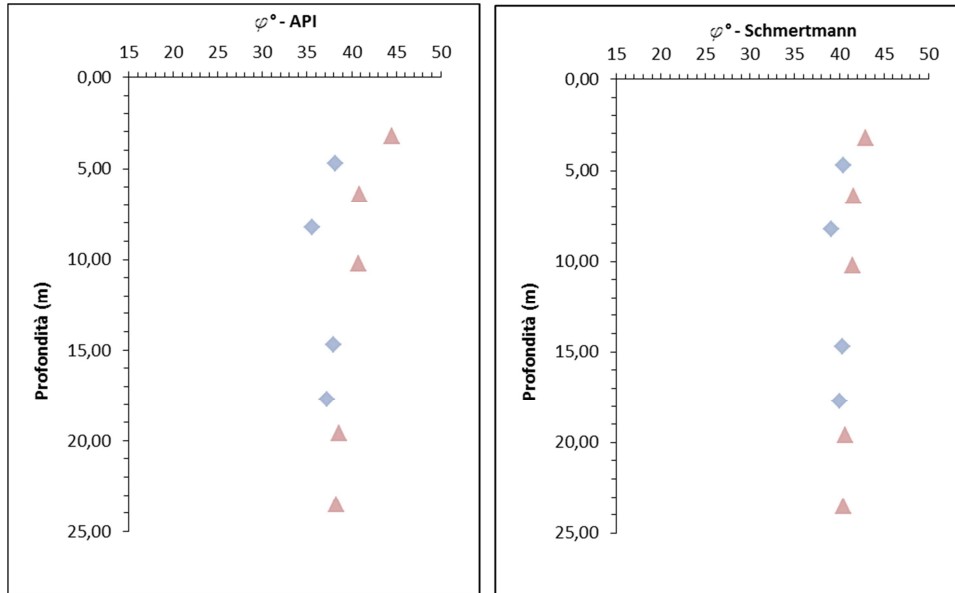
**Figura 17 – Formazione LLM: Involuppo a rottura delle prove di taglio diretto**

I valori dell'angolo d'attrito ricavati dalle elaborazioni delle prove penetrometriche dinamiche a disposizione (Figura 18) 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 19.



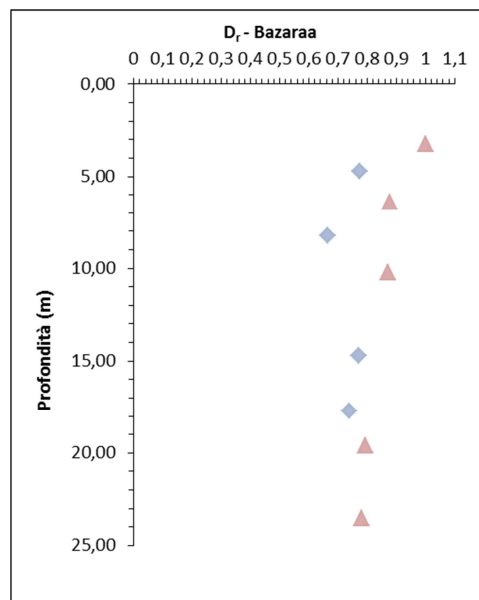
**Figura 18 – LLM: valori di  $N_{spt}$**





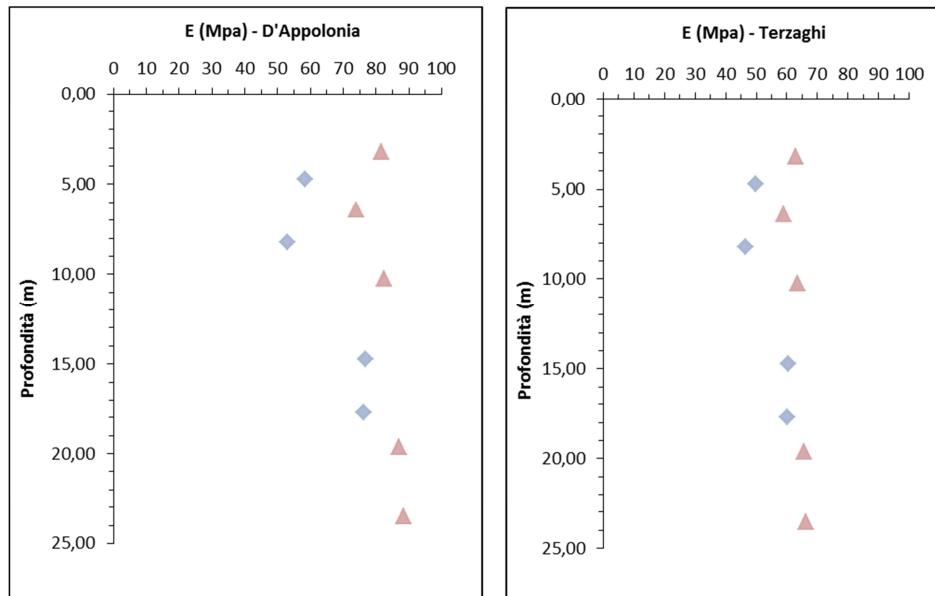
**Figura 19 – Formazione LLM: angolo d’attrito ricavato dalle prove SPT**

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 0,65 e 0,90, con un valore medio di 0,80 per i materiali indagati (Figura 20).



**Figura 20 – LLM: densità relativa**

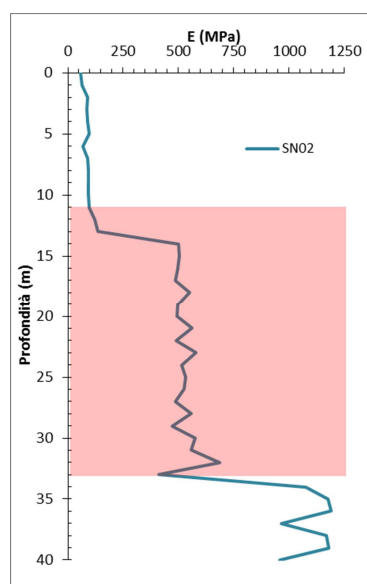
Le prove SPT eseguite nei fori di sondaggi hanno consentito di stimare anche l’andamento del modulo elastico con la profondità (Figura 21) adottando le correlazione di D’Appolonia (1970) e Terzaghi (1988).



**Figura 21 – Formazione LLM: moduli elastici ricavati dalle prove SPT**

Tali valori sono stati confrontati con i valori di rigidezza desunti dalle elaborazioni dalle indagini geofisiche in foro ed in superficie.

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 alla *down-hole* SN02 (solo le parti evidenziate in rosso sono relative alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).



**Figura 22 - LLM: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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 150 e 460 MPa.

### 8.3.2.3 *Riepilogo dei parametri geotecnici*

Per l'unità geotecnica "LLM" gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la gallerie Nizza ed Alì sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 3 - Gallerie Nizza ed Alì – Riepilogo parametri geotecnici - LLM**

| Unità geotecnica | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | c (KPa) | $\phi$ (°) | E (MPa) |
|------------------|-------------------------------|---------|------------|---------|
| LLM              | 19-21                         | 10-170  | 30-50      | 150-460 |

### 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 Alì (MMF).

Tali formazioni sono caratterizzate da struttura scistosa con presenza di lenti e livelli di quarzo (Figura 23), e generalmente risultano molto alterate nella porzione superficiale a causa delle azioni meccaniche indotte dalla tettonica.



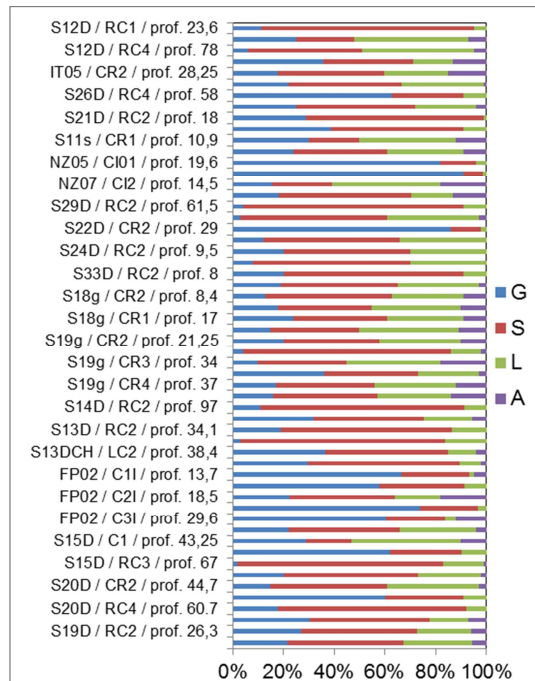
**Figura 23 – Sondaggio S15D, dettaglio della microstruttura scistosa con quarzo**

### 8.3.3.1 Caratteristiche fisiche

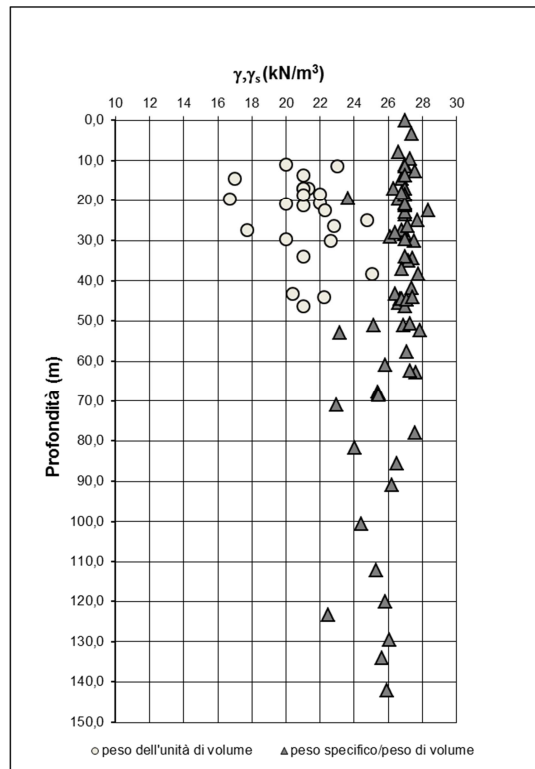
Ai fini di individuare le componenti granulometriche dell'unità per il possibile riutilizzo dei materiali di smarino delle gallerie in progetto, si riportano le analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati, le quali mostrano una prevalenza di sabbia (45%) e ghiaia (28%), (Figura 24), con un contributo inferiore di limo (21%) ed argilla (5%) (Figura 24).

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 25 è riportato, il peso di volume del materiale.



**Figura 24 - FDN/GLD/TAM/MMF: analisi granulometrica**

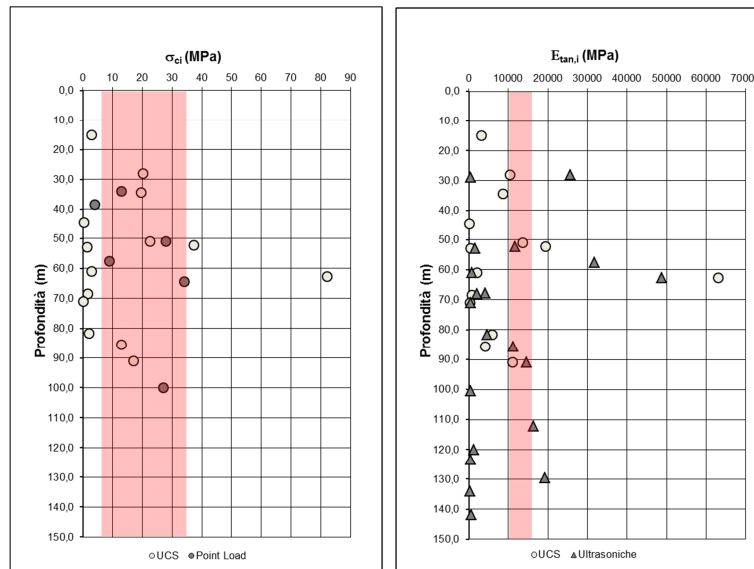


**Figura 25 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: peso di volume  $\gamma$**

### 8.3.3.2 Caratteristiche meccaniche

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

Riguardo le prove di laboratorio su campioni litoidi, si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale, prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 26. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.



**Figura 26 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF:  $\sigma_{ci}$  e  $E_{tan,i}$  della matrice**

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

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

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

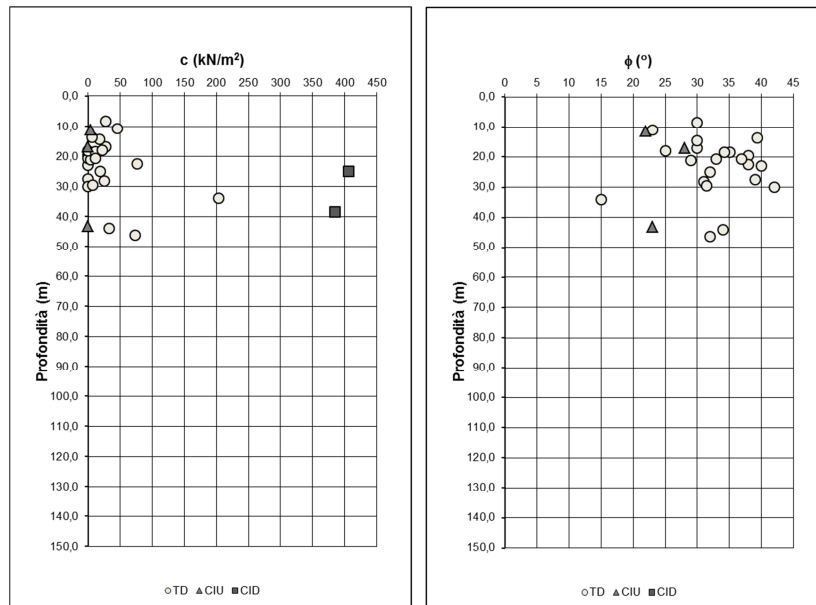
dove:

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

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

Tutti i dati raccolti hanno così permesso di caratterizzare l'ammasso investigato nella tratta di interesse della Gallerie Nizza ed Alì e di definire un *range* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, nell'intervallo  $5 \div 15$ , con i quali è stato inoltre possibile valutare la rigidità d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

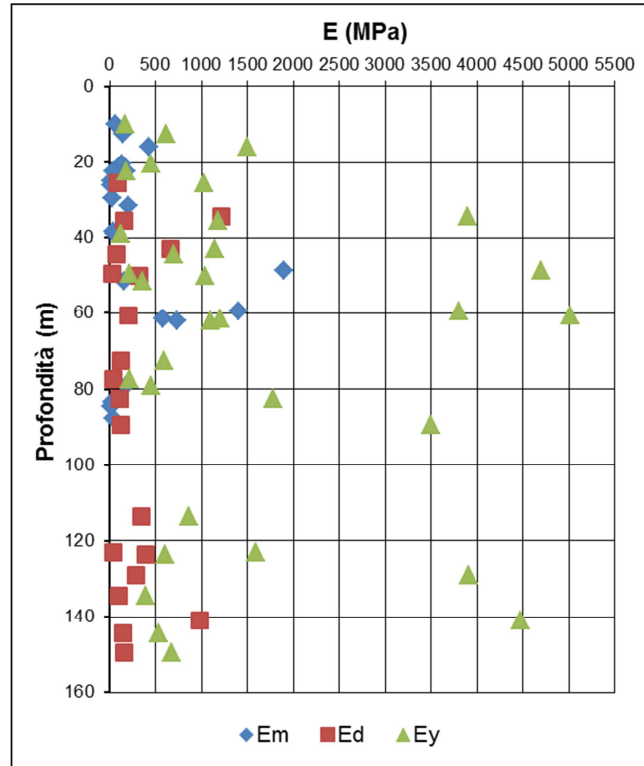
Prove di taglio diretto e triassiali sono state eseguite sui campioni a disposizione, i cui risultati in termini di coesione efficace ed angolo d'attrito sono riportati in Figura 27. Tali valori sono da riferirsi alla frazione alterata dalla tettonica e sono stati considerati, come estremo limite inferiore, nella definizione della resistenza attritiva d'ammasso.



**Figura 27 – Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: coesione drenata ed angolo di attrito**

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

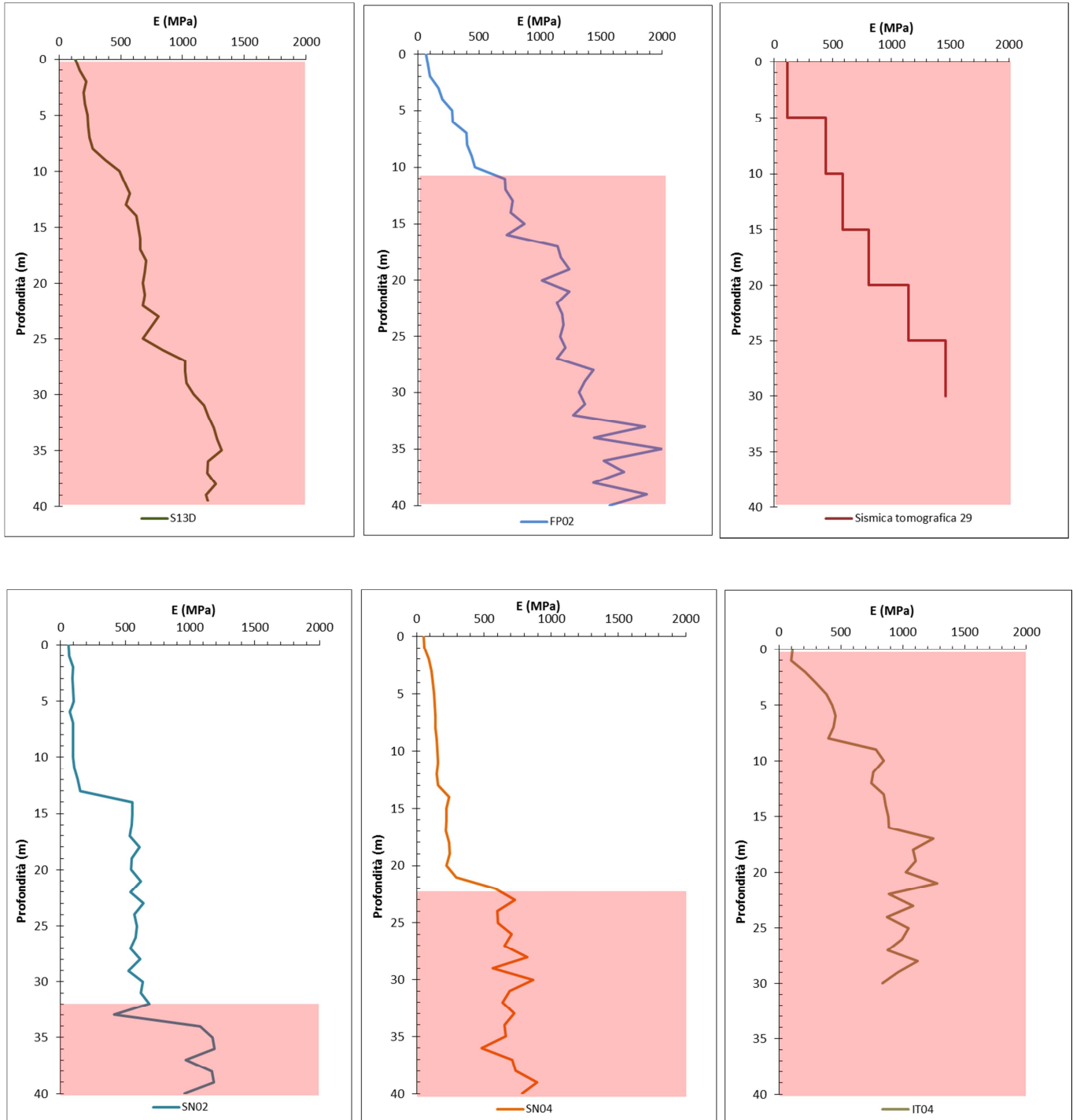
Nel grafico che segue sono riportati i moduli di rigidità ricavati dalle prove pressiometriche e dilatometriche nei fori di sondaggio T1÷T5, S12D÷S14D, S19D÷S22D, S26D, S28D, S29D, S31D, S33D, S34D, NS11, NS14, sia in riferimento alla fase di carico ( $E_m$  ed  $E_d$  rispettivamente) che ai cicli di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



**Figura 28 - 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).





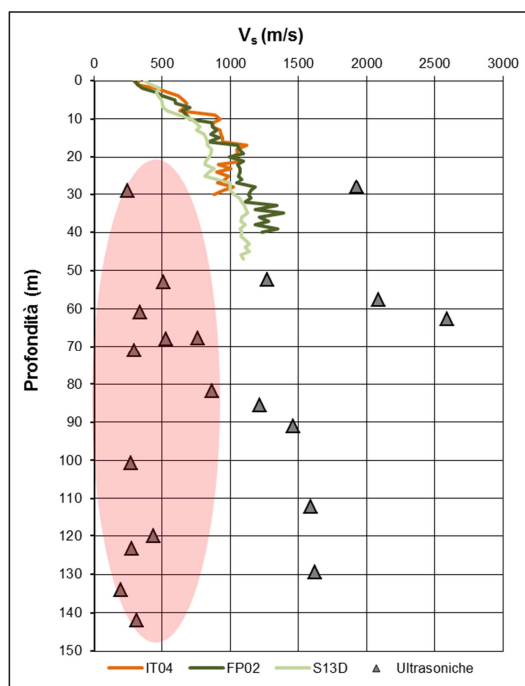
**Figura 29 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

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 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.

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 30) ha evidenziato valori di gran lunga inferiori.



**Figura 30 - 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 31).



**Figura 31 - 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 afferenti la gallerie Nizza ed Alì sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 4 - Gallerie Nizza ed Alì – Riepilogo parametri geotecnici - FDN/GLD/TAM/(MMF)**

| Unità geotecnica | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{ci}$<br>(MPa) | GSI  | $m_i$ | $E_i$ (MPa) | $\sigma_{cm}$<br>(MPa) | E (MPa) |
|------------------|----------------------------------|------------------------|------|-------|-------------|------------------------|---------|
| FDN/GLD/TAM/MMF  | 24-28                            | 15-35                  | 5-15 | 10    | 10000-15000 | 0,4-1,7                | 240-440 |

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 8.3.4 VEP1/VEP2 – Metareniti/arenarie

L'unità delle metareniti/arenarie "VEP1/VEP2" raggruppa l'alternanza di metareniti e metasiltiti del Verrucano peloritano di Alì (VEP1) e l'alternanza di arenarie e siltiti del Verrucano peloritano di Taormina (VEP2). L'unità risulta spesso molto alterata nella porzione superficiale a causa delle azioni meccaniche indotte dalla tettonica (Figura 32).



Figura 32 – Sondaggio S35D, cassetta da 55 a 60 m dal p.c.

#### 8.3.4.1 Caratteristiche fisiche

In Figura 33 è riportato il peso di volume del materiale.

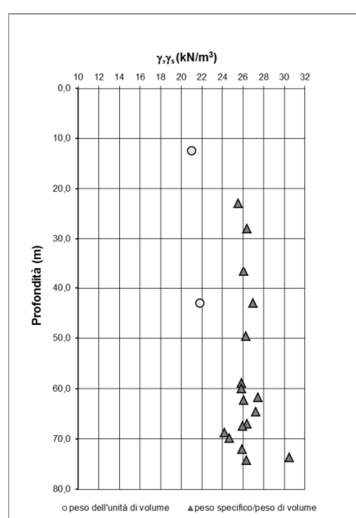
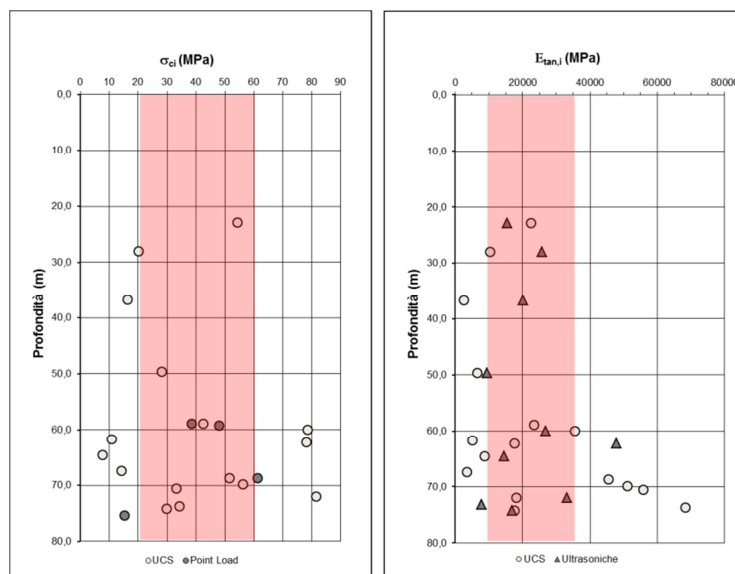


Figura 33 – Formazione VEP1/VEP2: peso di volume  $\gamma$

### 8.3.4.2 Caratteristiche meccaniche

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

Riguardo le prove di laboratorio su campioni litoidi, si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale e prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 34. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.



**Figura 34 - Formazione VEP1/VEP2:  $\sigma_{ci}$  e  $E_{tan,i}$  della matrice**

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

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

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

dove:

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

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

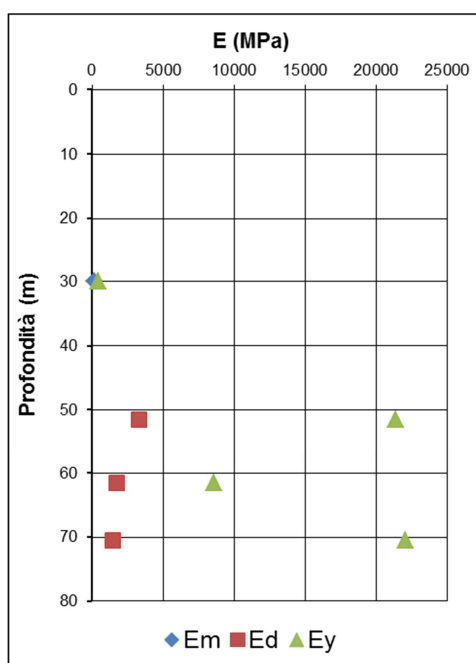
Tutti i dati raccolti hanno così permesso di caratterizzare l'ammasso investigato nella tratta di interesse della Gallerie Nizza ed Alì e di definire un *range* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

progressiva chilometrica, nell'intervallo 20 ÷ 35, con il quale è stato inoltre possibile valutare la rigidità d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

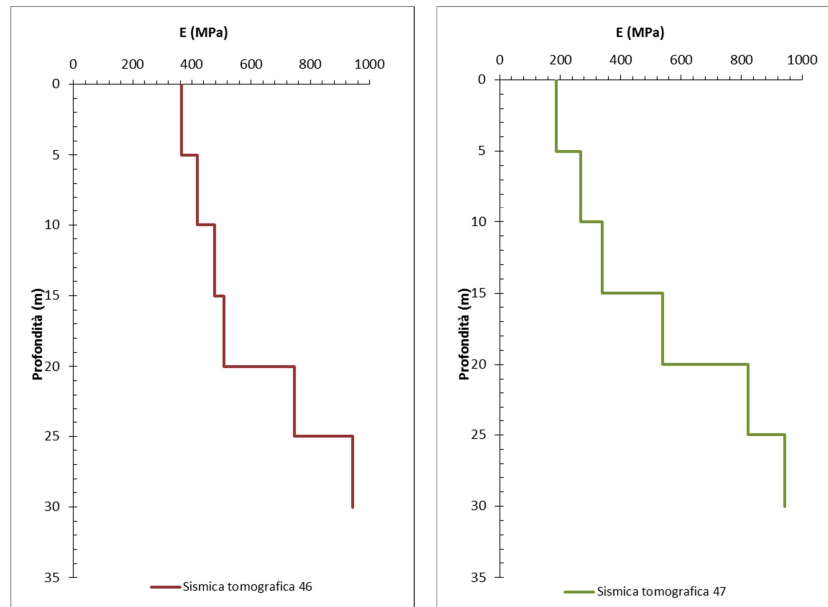
Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidità dell'ammasso, sono state condotte prove pressiometriche e dilatometriche, oltre alle indagini geofisiche in superficie.

Nel grafico che segue sono riportati i moduli di rigidità ricavati dalle prove pressiometriche e dilatometriche nei fori di sondaggio S27D ed S33D, sia in riferimento alla fase di carico ( $E_m$  ed  $E_d$  rispettivamente) che ai cicli di carico-scarico ( $E_y$ ).



**Figura 35 - Formazione VEP1/VEP2: moduli pressiometrici e dilatometrici**

I moduli di rigidità derivati dall'interpretazione delle prospezioni geofisiche sono stati ottenuti a partire dai moduli a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,15 in considerazione delle deformazioni di taglio attese per l'opera in progetto (Rif. [29]). Tali moduli sono quindi riportati nel grafico che segue in riferimento alle sismiche tomografiche n.46 e n.47.



**Figura 36 – Formazione VEP1/VEP2: 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.

#### 8.3.4.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

Per l’unità geotecnica “VEP1/VEP2” gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la gallerie Nizza ed Alì sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 5 - Gallerie Nizza ed Alì – Riepilogo parametri geotecnici - VEP1/VEP2**

| Unità geotecnica | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{ci}$<br>(MPa) | GSI   | $m_i$ | $E_i$ (MPa) | $\sigma_{cm}$<br>(MPa) | E (MPa)  |
|------------------|----------------------------------|------------------------|-------|-------|-------------|------------------------|----------|
| VEP1/VEP2        | 26-28                            | 20-60                  | 20-35 | 17    | 10000-35000 | 0,8-4,4                | 250-1400 |

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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

Di seguito si riportano gli intervalli dei principali parametri fisico-meccanici delle unità interessate dalle opere afferenti le Gallerie Nizza ed Alì.

**Tabella 6 - Gallerie Nizza ed Alì – Riepilogo parametri geotecnici**

| Unità geotecnica       | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{ci}$<br>(MPa) | GSI   | $m_i$ | $E_i$ (MPa) | c (KPa) | $\phi$ (°) | $\sigma_{cm}$<br>(MPa) | E (MPa)  |
|------------------------|----------------------------------|------------------------|-------|-------|-------------|---------|------------|------------------------|----------|
| <i>b2;ba;bb;g1;MSS</i> | 19-21                            | -                      | -     | -     | -           | 0-20    | 25-40      | -                      | 40-100   |
| <i>LLM</i>             | 19-21                            | -                      | -     | -     | -           | 10-170  | 30-50      | -                      | 150-460  |
| <i>FDN/GLD/TAM/MMF</i> | 24-28                            | 15-35                  | 5-15  | 10    | 10000-15000 | -       | -          | 0,4-1,7                | 240-440  |
| <i>VEP1/VEP2</i>       | 26-28                            | 20-60                  | 20-35 | 17    | 10000-35000 | -       | -          | 0,8-4,4                | 250-1400 |

### 8.3.6 Il regime idraulico

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

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

#### 8.3.6.1 Complesso metamorfico (FDN, VEP1).

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

#### 8.3.6.2 Complesso conglomeratico-ghiaioso (LLM).

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.

#### 8.3.6.3 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 - Gallerie Nizza ed Alì” (Rif. [10]) e alla “Relazione geologica ed idrogeologica” (Rif. [13]).

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

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

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

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

## 9 FASE DI DIAGNOSI

Nella fase di diagnosi, sulla base del modello geotecnico scaturito dagli studi e dalle indagini effettuati nella fase conoscitiva, si procede alla previsione della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione. La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS (Rif. [15]), 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. [15]) la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi, che forniscono indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. Dati sperimentali e analisi teoriche hanno dimostrato che il comportamento della cavità è significativamente condizionato, oltre che dalle caratteristiche geometriche della galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

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

#### Categoria A: nucleo-fronte stabile

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

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

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

|   |   |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI  | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### Categoria C: nucleo-fronte instabile

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

## 9.2 Determinazione delle categorie di comportamento

La valutazione del comportamento deformativo del fronte è stata condotta utilizzando:

- 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),

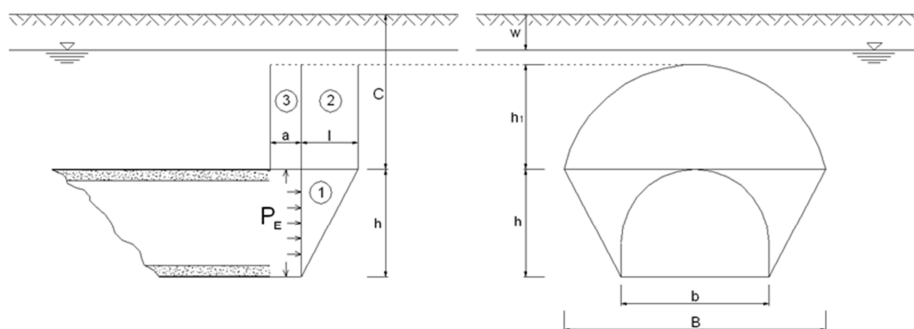
Le analisi nella fase di diagnosi sono state condotte con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni.

### 9.2.1 *Analisi con i metodi all'equilibrio limite*

#### 9.2.1.1 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 37 - 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<sub>3</sub>, 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)

#### 9.2.1.2 Sezioni analizzate

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

**Tabella 7 - Sezioni di analisi: dati di input**

| Sez di calcolo              | pk. [m] | C [m] | Stratigrafia di calcolo |                        |
|-----------------------------|---------|-------|-------------------------|------------------------|
|                             |         |       | Formazione              | Profondità da p.c. [m] |
| D1                          | 33+567  | 4.5   | FDN                     | omogeneo               |
| D3                          | 33+871  | 24.5  | LLM                     | omogeneo               |
| C = copertura sulla calotta |         |       |                         |                        |

Si fa riferimento ad uno scavo di raggio equivalente pari a 6.4 m, e lunghezza del tratto non sostenuto pari a 1 m.

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 9.2.1.3 Risultati delle analisi

In Tabella 8 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 8 – Sezioni di analisi: risultati**

| Sez<br>di calcolo. | Parametri equivalenti al<br>fronte |             |                   | Parametri equivalenti sulla<br>calotta |             |                   | $h_1$<br>[m] | FSF<br>[-] | FS <sub>3</sub><br>[-] | Cat.<br>[-] |
|--------------------|------------------------------------|-------------|-------------------|--|-------------|-------------------|--------------|------------|------------------------|-------------|
|                    | $\gamma_{eq}$                      | $c'_{k,eq}$ | $\varphi'_{k,eq}$ | $\gamma$                               | $c'_{k,eq}$ | $\varphi'_{k,eq}$ |              |            |                        |             |
|                    | [kN/m <sup>3</sup> ]               | [kPa]       | [°]               | [kN/m <sup>3</sup> ]                   | [kPa]       | [°]               |              |            |                        |             |
| D1                 | 26.0                               | 37.0        | 24.0              | 26.0                                   | 37.0        | 24.0              | 4.50         | 0.94       | 3.07                   | C           |
| D3                 | 21.0                               | 50.0        | 38.0              | 21.0                                   | 50.0        | 38.0              | 24.50        | 1.39       | 5.13                   | C           |

## 9.2.2 Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

### 9.2.2.1 Metodo di analisi

Il metodo delle linee caratteristiche (o convergenza-confinamento) è un metodo di calcolo che consente l'analisi 3D semplificata dello scavo di gallerie in relazione alle proprietà meccaniche dell'ammasso attraversato, alle caratteristiche geometriche dell'opera, agli interventi previsti di precontenimento e contenimento, e all'installazione dei rivestimenti provvisori e definitivi.

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

Le ipotesi alla base del metodo sono le seguenti:

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

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

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

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

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

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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

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

### 9.2.2.2 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 9 - Sezioni di analisi: dati di input**

| Sez di calcolo | Unità | pk [m] | H [m] | $\sigma_0$ [MPa] | $p_{w0}$ [MPa] | $p_{wR}$ [MPa] | $R_w$ [m] | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $c'_k$ [MPa] | $\phi'_k$ [°] | $E_k$ [MPa] |
|----------------|-------|--------|-------|------------------|----------------|----------------|-----------|-------------------------------|--------------|---------------|-------------|
| D2             | VEP1  | 33+768 | 63.4  | 1.71             | -              | -              | -         | 27.0                          | 0.160        | 34.0          | 990.0       |

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

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

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

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

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

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

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

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

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

Considerata la bassa permeabilità dell'ammasso roccioso VEP1, la presenza di acqua è stata trascurata.

### 9.2.2.3 Risultati delle analisi

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

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

**Tabella 10 - Criterio 1**

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

**Tabella 11 - 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 12 - Sezioni di analisi: risultati**

| Sezione di analisi | $\sigma_c$ [MPa] | $p_c$ [MPa] | $\sigma_c / p_c$ [-] | $u_F$ [m] | $u_F / R_{eq}$ [%] | $R_{PF}$ [m] | $R_{PF} / R_{eq}$ [-] | Categoria |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------|-----------|--------------------|--------------|-----------------------|-----------|
| D2                 | 0.60             | 0.49        | 1.24                 | 0.012     | 0.18               | 8.00         | 1.25                  | A         |

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

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

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

$R_{PF}$  = raggio plastico al fronte

$R_{eq}$  = raggio di scavo equivalente della galleria pari a 6.4 m

### 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. [10])

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

## 10 FASE DI TERAPIA

Nel presente capitolo sono definiti gli interventi necessari per garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine, in accordo con le indicazioni provenienti dalla fase conoscitiva e dall'analisi del comportamento allo scavo (fase di diagnosi §9). Sono descritte le caratteristiche principali delle sezioni tipo di avanzamento, il loro campo di applicazione e la successione delle fasi esecutive.

### 10.1 Definizione delle sezioni tipo

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

In funzione delle caratteristiche geotecniche delle formazioni attraversate e del loro comportamento allo scavo, sono state definite 5 diverse sezioni tipo, intese come complesso di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione, drenaggi e relative tecnologie esecutive, denominate A1, A2, B1, C1 e C2v.

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

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

Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo si rimanda invece al "Profilo geotecnico - Gallerie Nizza e Ali" (Rif. [10]).

#### 10.1.1 Sezione tipo A1

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

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

- scavo a piena sezione per sfondi di dimensioni massime 2,80 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,40 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,70 m) e murette in calcestruzzo non armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 5 diametri;
- calotta (spessore 0,60 m) in calcestruzzo non armato gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.



|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 10.1.2 Sezione tipo A2

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

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

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

### 10.1.3 Sezione tipo B1

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

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 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;
- 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.

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

#### 10.1.4 Sezione tipo C1

La C1 è una sezione tronco-conica 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 C1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 microtrattamenti in jet-grouting Ø300 armati con elementi strutturali in VTR, L=20,0 m (sovrapposizione minima 8,0 m) ±20%;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 61 colonne in jet-grouting Ø600, L=16,5 m (sovrapposizione minima 4,5 m) ±20% e ulteriori 8+8 colonne al piede centina;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 12,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,30 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN200 con passo 1,0 m ± 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.

#### 10.1.5 Sezione tipo C2v

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

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 50 elementi strutturali in VTR, L=20,0 m (sovrapposizione minima 11,5 m) ±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) ±20% cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR al piede centina;
- 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 cm a 1,35 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

## 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. [31]).

### Interventi di presostegno

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

### Interventi di precontenimento

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

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

### Rivestimento provvisorio

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

| <b>Acciaio per centine</b>             |                               |
|--|-------------------------------|
| Tipo                                   | <i>S 275</i>                  |
| Tensione caratteristica di rottura     | $f_{tk} \geq 430 \text{ MPa}$ |
| Tensione caratteristica di snervamento | $f_{yk} \geq 275 \text{ MPa}$ |
| Tensione di snervamento di calcolo     | $f_{yd} = 261.9 \text{ MPa}$  |

### Rivestimenti definitivi

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

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

| <b>Calcestruzzo non armato</b>   |                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Classe di resistenza di calcolo  | <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 (§ 9.2.2.1) e all'equilibrio limite secondo col metodo di Tamez (§ 9.2.1.1).

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 ( $\Delta c$ ) valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte ( $\sigma_3$ ) determinata sulla base del valore più basso tra resistenza a trazione e resistenza a sfilamento dei singoli elementi, secondo le seguenti relazioni:

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

con:

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

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

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

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

dove:

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

$L_A$  = lunghezza utile dell'elemento,

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

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

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

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

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

|   |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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.

|   |  |                  |                  |                |                         |           |
|---|--|------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                  |                  |                |                         |           |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br>RS2S | LOTTO<br>02 D 07 | CODIFICA<br>RB | DOCUMENTO<br>GN0700 001 | REV.<br>B |

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:

$\delta$  = interasse centine;

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

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

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

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

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

Nelle analisi di interazione con modelli numerici bidimensionali, 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.

|   |  |                  |                |                         |           |                    |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                  |                |                         |           |                    |
| GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI  | COMMESSA<br>RS2S   | LOTTO<br>02 D 07 | CODIFICA<br>RB | DOCUMENTO<br>GN0700 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>58 di 67 |

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.

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 10.3.2 Sezione A2

#### 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 33+768 (sezione D2 in fase di diagnosi).

**Tabella 13 - Sezione A2 - stabilità del fronte: dati di input**

| Sez. di calcolo | Unità | $R_{eq}$<br>[m] | H<br>[m] | $\sigma_0$<br>[MPa] | $p_{w0}$<br>[MPa] | $p_{wR}$<br>[MPa] | $R_w$<br>[m] | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $c'_d$<br>[MPa] | $\phi'_d$<br>[°] | $E_d$<br>[MPa] |
|-----------------|-------|-----------------|----------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| A2              | VEP1  | 5.8             | 62.8     | 1.70                | -                 | -                 | -            | 27                               | 0.128           | 28.4             | 990.0          |

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

**Tabella 14 - Sezione A2 - stabilità del fronte: risultati**

| Sezione di calcolo | $u_F$<br>[m] | $R_{PF}$<br>[m] |
|--------------------|--------------|-----------------|
| A2                 | 0.016        | 8.36            |

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

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 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 15 – Sezione A2 – analisi di interazione: dati di input**

| Sez di calcolo | R <sub>eq</sub> (m) | Unità | pk [m] | H [m] | h <sub>w</sub> [m] | σ <sub>o</sub> [MPa] | p <sub>w0</sub> [MPa] | p <sub>wR</sub> [MPa] | R <sub>w</sub> [m] | γ [kN/m <sup>3</sup> ] | c' <sub>kp</sub> [MPa] | φ' <sub>kp</sub> [°] | E <sub>k</sub> [MPa] |
|----------------|---------------------|-------|--------|-------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| A2             | 5.8                 | VEP1  | 33+768 | 62.80 | 5.80               | 1.70                 | 0.0                   | -                     | -                  | 27.0                   | 0.160                  | 34.0                 | 990.0                |

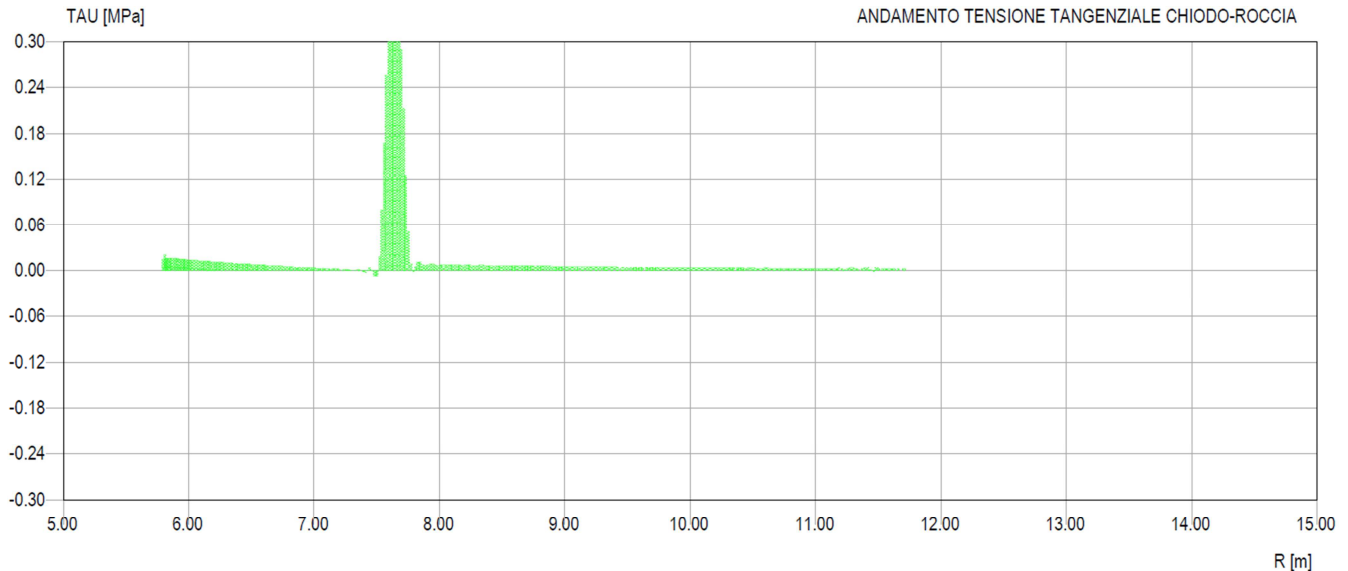
H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 s<sub>0</sub> = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 p<sub>w0</sub> = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 p<sub>wR</sub> = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 R<sub>w</sub> = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce p<sub>w0</sub>  
 γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 c'<sub>kp</sub> = valore caratteristico della coesione efficace di picco dell'ammasso  
 φ'<sub>kp</sub> = valore caratteristico dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso  
 E<sub>k</sub> = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 16 - Sezione A2 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Tipo di priverimento      | Centine + Spritz beton |
| Spessore dello spritz [m] | 0.20                   |
| Centine                   | 2 IPN180               |
| Passo delle centine [m]   | 1.20                   |

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Tipo di intervento       | Chiodatura radiale     |
| Chiodi                   | Ø24 / L=6.0 m          |
| Tipo di rivestimento     | Anello di calcestruzzo |
| Spessore dell'anello [m] | 0.70                   |

Per la verifica dell'intervento di chiodatura si riporta in Figura 38 l'andamento delle tensioni tangenziali agenti all'interfaccia elemento strutturale/roccia. Lungo tutto lo sviluppo del bullone radiale tali tensioni risultano ben inferiori rispetto alla tensione limite di aderenza del materiale definita pari a 0,3 MPa. pertanto si ritiene la verifica soddisfatta.



**Figura 38 – 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 4.35 MPa per lo spritz beton e 26.66 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 1.47 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            | $(4.35 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 5.65 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$   | verifica soddisfatta |
| • Centine                 | $(26.66 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 34.65 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |
| • Rivestimento definitivo | $(1.47 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 1.91 \text{ MPa} < 6.22 \text{ MPa}$    | verifica soddisfatta |

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

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 10.3.3 Sezione C1

#### 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 C1 eseguita con il metodo dell'equilibrio limite di Tamez, con riferimento alla pk 33+871 (sezione D3 in fase di diagnosi).

**Tabella 17 – Sezione C1 - stabilità del fronte: dati di input**

| Sez.<br>di calcolo | C    | Stratigrafia di calcolo |                       |
|--------------------|------|-------------------------|-----------------------|
|                    | [m]  | Formazione              | Profondità<br>da p.c. |
|                    |      | [-]                     | [m]                   |
| C1                 | 24.5 | LLM                     | omogeneo              |

C = copertura sulla calotta

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

**Tabella 18 – Sezione C1 – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte**

| $n_{jet}$ | $L_A$ | $\phi_{jet}$ | $\tau_{bk}$ | $\sigma_{3A}^{jet}$ | $A_{VTR}$         | $f_{tk}$ | $\sigma_{3B}^{VTR}$ | $\sigma_3$ | $\Delta c'_k$ |
|-----------|-------|--------------|-------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|------------|---------------|
| [-]       | [m]   | [m]          | [kPa]       | [kPa]               | [m <sup>2</sup> ] | [MPa]    | [kPa]               | [kPa]      | [kPa]         |
| 30        | 8     | 0.3          | 250         | 471                 | 1.571E-03         | 450      | 177                 | 177        | 181           |

$n_{jet}$  = numero di microtrattamenti in jet-grouting

$L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR

$\Phi_{jet}$  = diametro di perforazione

$\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno

$\sigma_{3A}^{jet}$  = resistenza a sfilamento della colonna di jet armata con VTR

$A_{VTR}$  = area del VTR

$f_{tk}$  = resistenza a trazione del VTR

$\sigma_{3B}^{VTR}$  = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR

$\sigma_3$  = tensione minima resistente al fronte

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

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

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

**Tabella 19 – Sezione C1 – consolidamento al contorno**

| $\sigma_{c,jet}$ | $\varphi'_K$ | $c'_k$ | $S_{jet}$          |               |
|------------------|--------------|--------|--------------------|---------------|
|                  |              |        | calotta /piedritti | piede centina |
| [MPa]            | [°]          | [kPa]  | [m]                |               |
| 2.50             | 38.0         | 610.0  | 0.5                | 0.5           |

$\sigma_{c,jet}$  = resistenza caratteristica a compressione monoassiale del jet-grouting  
 $\varphi'_K$  = angolo d'attrito efficace caratteristico del materiale al contorno  
 $c'_k$  = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento al contorno  
 $S_{jet}$  = spessore dell'intervento in jet-grouting

In Tabella 20 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 20 - 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 <sup>3</sup> ]            | [kPa]       | [°]               | [kN/m <sup>3</sup> ]                | [kPa]       | [°]               |
| 26.00                           | 268.21      | 24.00             | 26.00                               | 86.33       | 24.00             |

**Tabella 21 - Sezione C1 - stabilità del fronte: risultati**

| Sez. di calcolo | h1   | FSF  | FS <sub>3</sub> |
|-----------------|------|------|-----------------|
|                 | [m]  | [-]  | [-]             |
| C1              | 4.50 | 4.70 | 5.74            |

I rapporti FSF e FS<sub>3</sub> sono tali da poter ritenere la verifica di stabilità del fronte soddisfatta.

### 10.3.3.2 Interazione opera-terreno

Per le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo C1 si rimanda all'analisi di interazione con modello numerico agli elementi finiti eseguito per la galleria Sciglio.

|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

### 10.3.4 Sezione C2v

#### 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 33+567 (sezione D1 in fase di diagnosi).

**Tabella 22 – Sezione C1 - stabilità del fronte: dati di input**

| Sez.<br>di calcolo          | C   | Stratigrafia di calcolo |                       |
|-----------------------------|-----|-------------------------|-----------------------|
|                             | [m] | Formazione              | Profondità<br>da p.c. |
|                             |     | [-]                     | [m]                   |
| C2v                         | 4.5 | FDN                     | omogeneo              |
| C = copertura sulla calotta |     |                         |                       |

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

**Tabella 23 – Sezione C2v – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte**

| $n_{VTR}$ | $L_A$ | $\phi_{perf}$ | $\tau_{bk}$ | $\sigma_{3A}^{VTR}$ | $A_{VTR}$         | $f_{tk}$ | $\sigma_{3B}^{VTR}$ | $\sigma_3$ | $\Delta c'_k$ |
|-----------|-------|---------------|-------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|------------|---------------|
| [-]       | [m]   | [m]           | [kPa]       | [kPa]               | [m <sup>2</sup> ] | [MPa]    | [kPa]               | [kPa]      | [kPa]         |
| 50        | 11.5  | 0.1           | 250         | 377                 | 7.200E-04         | 1000     | 300                 | 300        | 231           |

$n_{VTR}$  = numero di VTR al fronte

$L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR

$\phi_{perf}$  = diametro di perforazione

$\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno

$\sigma_{3A}^{VTR}$  = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR

$A_{VTR}$  = area del VTR

$f_{tk}$  = resistenza a trazione del VTR

$\sigma_{3B}^{VTR}$  = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR

$\sigma_3$  = tensione minima resistente al fronte

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

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



|  |  |                         |                         |                       |                                |                  |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|  | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI   | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

**Tabella 24 – Sezione C2v – consolidamento al contorno**

| $\gamma$             | $c'_{cons}$ | $\phi'_{k}$ | $E_{cons}$ | $s_{cons}$         |               |
|----------------------|-------------|-------------|------------|--------------------|---------------|
|                      |             |             |            | calotta /piedritti | piede centina |
| [kN/m <sup>3</sup> ] | [kPa]       | [°]         | [MPa]      | [m]                |               |
| 26.00                | 185.00      | 24          | 963        | 1.5                | 1             |

$\gamma_{cons}$  = peso per unità di volume terreno consolidato al contorno  
 $c'_{cons}$  = coesione terreno consolidato al contorno  
 $\phi_{cons}$  = 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 25 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 25 - Parametri equivalenti di progetto**

| Parametri equivalenti al fronte |             |                | Parametri equivalenti sulla calotta |             |                |
|---------------------------------|-------------|----------------|-------------------------------------|-------------|----------------|
| $\gamma_{k,eq}$                 | $c'_{k,eq}$ | $\phi'_{k,eq}$ | $\gamma_{k,eq}$                     | $c'_{k,eq}$ | $\phi'_{k,eq}$ |
| [kN/m <sup>3</sup> ]            | [kPa]       | [°]            | [kN/m <sup>3</sup> ]                | [kPa]       | [°]            |
| 21.00                           | 230.98      | 38.00          | 21.00                               | 61.42       | 38.00          |

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

| Sez. di calcolo | h1    | FSF  | FS <sub>3</sub> |
|-----------------|-------|------|-----------------|
|                 | [m]   | [-]  | [-]             |
| C2v             | 24.50 | 3.21 | 5.06            |

I rapporti FSF e FS<sub>3</sub> 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 Taormina Lotto 1.

|   |   |                         |                         |                       |                                |                  |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b><br><b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b> |                         |                         |                       |                                |                  |
|   | GALLERIE NIZZA E ALI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI  | COMMESSA<br><b>RS2S</b> | LOTTO<br><b>02 D 07</b> | CODIFICA<br><b>RB</b> | DOCUMENTO<br><b>GN0700 001</b> | REV.<br><b>B</b> |

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

### 11.1 Monitoraggio in corso d'opera

Nella fase realizzativa dovrà essere posto in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare gli effetti indotti dalla realizzazione delle opere in sotterraneo e a gestire l'applicazione delle sezioni di scavo e consolidamento previste, ottimizzandole nell'ambito delle variabilità indicate in progetto.

Per il dettaglio di quanto previsto nel programma di monitoraggio si rimanda al paragrafo 12 della relazione tecnica delle opere in sotterraneo (Rif. [1]) e a quanto indicato sul profilo geotecnico della galleria (Rif. [10]).

### 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 delle gallerie Nizza e Alì, incluse 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. [15]), 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)

GALLERIE NIZZA ED ALÌ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI  
CALCOLO DELLE GALLERIE NATURALI

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | ALLEGATO |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| RS2S     | 02 D 07 | RB       | GN0700 001 | B    | 1        |

## ALLEGATO 1

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>TITOLO</b>             | Analisi con i metodi delle curve caratteristiche e dell'equilibrio limite per le fasi di diagnosi e terapia |
| <b>TIPO DI DOCUMENTO:</b> | Documento - Formato A4  |
| <b>CODIFICA:</b>          | -   |
| <b>PAGINE:</b>            | 17  |
| <b>DATA:</b>              | Gennaio 2018  |
| <b>SORGENTE:</b>          | U.O. Gallerie Italferr S.p.A.   |
| <b>NOTE:</b>              | -   |

# 1 DIAGNOSI

## 1.1 Sez. D1

### Metodo di Tamez

| DATI GEOMETRICI  |        |   |
|--|--------|---|
| Z (m)  | 4.5    | copertura sulla calotta   |
| W (m)  | 4.5    | profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z  |
| h (m)  | 12.8   | altezza dello scavo   |
| b (m)  | 12.8   | larghezza dello scavo   |
| a (m)  | 1.0    | lunghezza non sostenuta   |
| DATI GEOTECNICI  |        |   |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 37.0   | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 37.0   | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 37.0   | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\phi_m$ (°)   | 24.0   | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| $\phi$ (°)   | 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 |        |   |
| $\phi_m$ (°)   | 24.00  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 37.00  | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\sigma_c$ (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)  | 8.312  | $l = h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$   |
| B (m)  | 29.425 | $B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$  |
| $h_1$ (m)  | 4.500  | $h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$   |
| s (m)  | 0.000  | $S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di $\tau_{m2}$ e $\tau_{m3}$   |
| DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'                 |        |   |
| $\phi$ (°)   | 24.00  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a $h_1$  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 37.00  | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 37.00  | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 10     | peso dell'unità di volume dell'acqua  |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| K <sub>0</sub> (-)   | 0.4    | coefficiente di spinta a riposo <b>0.593263</b>   |
| K <sub>A</sub> (-)   | 0.3    | coefficiente di spinta attiva <b>0.422</b>  |
| Z/h (-)  | 0.4    | discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3   |
| U (kPa)  | 0      | $U = \gamma_w(Z - W)$   |
| $\gamma^*Z$ (kPa)  | 117    |   |

|                       |       |  |
|-----------------------|-------|--|
| $\tau_{m2}$ (kPa)     | 83    | $\tau_{m2} = \begin{cases} \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| $\tau_{m3}$ (kPa)     | 37    | $\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \varphi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$   |
| A                     | 51.7  | $A = \left[ \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$  |
| B                     | 42.4  | $B = \left[ \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$   |
| C                     | 183.0 | $C = \left[ \frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$  |
| D                     | 293.8 | $D = \left[ 1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$  |
| <b>RISULTATI</b>      |       |  |
| $P_E$ (kPa)           | 0     | <b>Galleria superficiale</b>   |
| F.S.F. (-)            | 0.94  | $CS = \frac{(A + B + C) \cdot D}{\gamma Z - P_E}$  |
| F.S. <sub>3</sub> (-) | 3.07  | $CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma Z - P_E} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$   |

## 1.2 Sez. D2

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



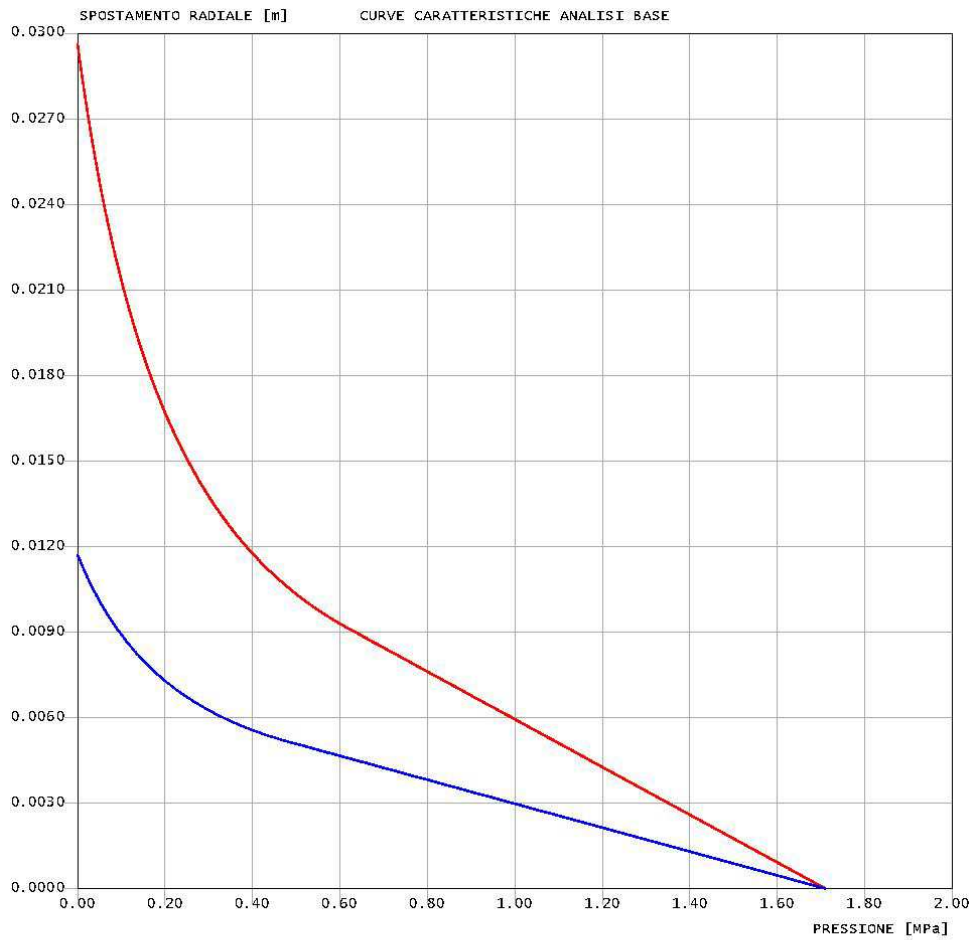
Nizza  
Diagnosi  
Sez\_D2

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

Nizza  
 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] .....                                 | 6.40000   |
| PARAMETRI GEOTECNICI -----                           |           |
| Tensione originaria [MPa] .....                      | 1.71000   |
| Modulo di Young [MPa] .....                          | 990.00000 |
| Coefficiente di Poisson .....                        | .30000    |
| Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] .. | .00000    |
| Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..  | .00000    |
| Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..  | .00000    |
| Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....   | 6.40000   |
| Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..  | .00000    |
| Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....   | 6.40000   |
| RESISTENZA ROCCIA                                    |           |
| Coesione picco [MPa] .....                           | .16000    |
| Angolo attrito picco [deg] .....                     | 34.00000  |
| Coesione residua [MPa] .....                         | .16000    |
| Angolo attrito residuo [MPa] .....                   | 34.00000  |
| 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] .....              | .029645   |
| Raggio plastico galleria [m] .....                  | 10.667082 |
| Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....      | .000000   |
| Spostamento radiale fronte sferico [m] .....        | .011720   |
| Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....   | .002950   |
| Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ... | .008597   |
| Raggio plastico fronte sferico [m] .....            | 7.995789  |

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] .....  | .029645   |
| Raggio plastico galleria fine calcolo [m] ..... | 10.667082 |



## Metodo di Tamez

| DATI GEOMETRICI  |        |   |
|--|--------|---|
| Z (m)  | 24.5   | copertura sulla calotta   |
| W (m)  | 24.5   | profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z                                  |
| h (m)  | 12.8   | altezza dello scavo   |
| b (m)  | 12.8   | larghezza dello scavo   |
| a (m)  | 1.0    | lunghezza non sostenuta   |
| DATI GEOTECNICI  |        |   |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| $C_1$ (kPa)  | 50.0   | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| $C_2$ (kPa)  | 50.0   | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| $C_{2m}$ (kPa)   | 50.0   | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\phi_m$ (°)   | 38.0   | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna                          |
| $\phi$ (°)   | 38.0   | 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 |        |   |
| $\phi_m$ (°)   | 38.00  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna                          |
| $C_{2m}$ (kPa)   | 50.00  | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\sigma_c$ (kPa)   | 205.0  | $\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$  |
| f  | 1.025  | $f = \begin{cases} tg \phi_m & \text{se } c' = 0 \\ tg \phi_m + \frac{c'}{\sigma_c} & \text{se } c' \neq 0 \end{cases}$ |
| l (m)  | 6.243  | $l = h \times tg \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$  |
| B (m)  | 25.286 | $B = b + 2h \times tg \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$   |
| $h_1$ (m)  | 24.500 | $h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$   |
| s (m)  | 0.000  | $S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di $\tau_{nL}$ e $\tau_{nB}$                                       |
| DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'                 |        |   |
| $\phi$ (°)   | 38.00  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a $h_1$                              |
| $C_2$ (kPa)  | 50.00  | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| $C_1$ (kPa)  | 50.00  | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 10     | peso dell'unità di volume dell'acqua  |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| $K_0$ (-)  | 0.4    | coefficiente di spinta a riposo <b>0.384339</b>   |
| $K_A$ (-)  | 0.3    | coefficiente di spinta attiva <b>0.238</b>  |
| Z/h (-)  | 1.9    | discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3   |
| U (kPa)  | 0      | $U = \gamma_w (Z - W)$  |
| $\gamma^* Z$ (kPa)   | 514.5  | -   |

|                             |             |  |
|-----------------------------|-------------|--|
| $\tau_{m2}$ (kPa)           | 112         | $\tau_{m2} = \begin{cases} \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| $\tau_{m3}$ (kPa)           | 50          | $\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$  |
| <b>A</b>                    | 368.0       | $A = \left[ \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$  |
| <b>B</b>                    | 301.2       | $B = \left[ \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$   |
| <b>C</b>                    | 230.6       | $C = \left[ \frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$  |
| <b>D</b>                    | 647.6       | $D = \left[ 1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$  |
| <b>RISULTATI</b>            |             |  |
| $P_E$ (kPa)                 | 0           | <b>Galleria superficiale</b>   |
| <b>F.S.F. (-)</b>           | <b>1.39</b> | $CS = \frac{(A + B + C) \cdot D}{\gamma Z - P_E}$  |
| <b>F.S.<sub>3</sub> (-)</b> | <b>5.13</b> | $CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma Z - P_E} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$   |

## 2 TERAPIA

### 2.1 Sez. A2

#### 2.1.1 Fronte

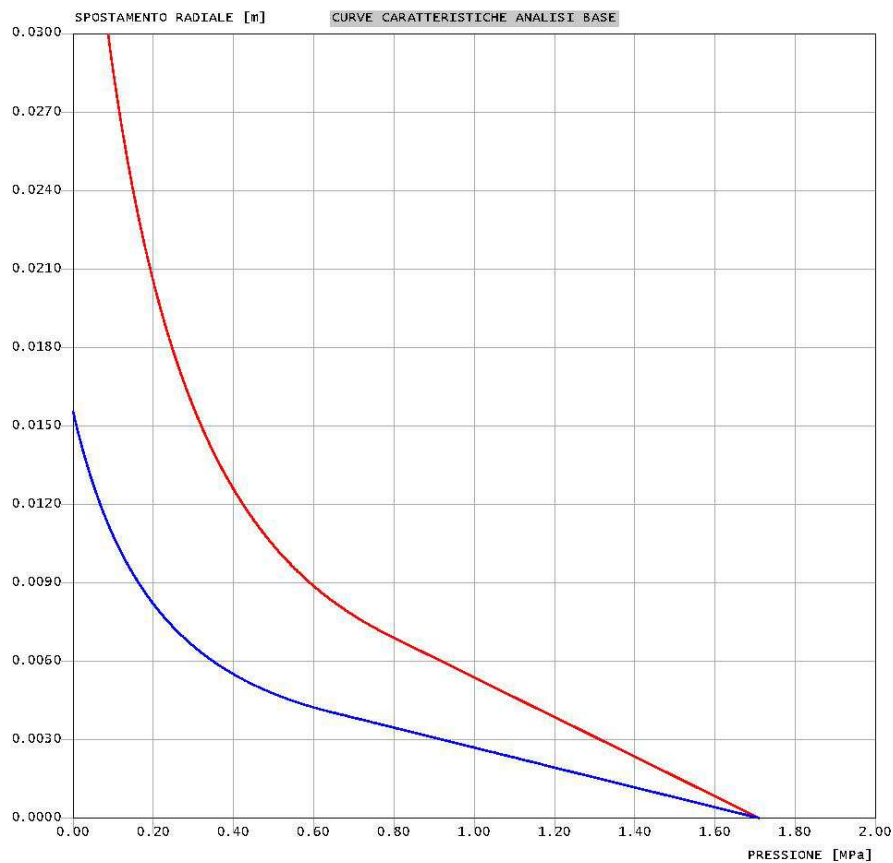
Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



Nizza  
Diagnost  
Sez\_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

Nizza  
 Diagnosi  
 Sez\_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] .....                                 | 5.80000   |
| PARAMETRI GEOTECNICI -----                           |           |
| Tensione originaria [MPa] .....                      | 1.71000   |
| Modulo di Young [MPa] .....                          | 990.00000 |
| Coefficiente di Poisson .....                        | .30000    |
| Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] .. | .00000    |
| Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..  | .00000    |
| Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa] .. | .00000    |
| Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....   | 5.80000   |
| Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa] .. | .00000    |
| Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....   | 5.80000   |
| RESISTENZA ROCCIA                                    |           |
| Coesione picco [MPa] .....                           | .12800    |
| Angolo attrito picco [deg] .....                     | 28.40000  |
| Coesione residua [MPa] .....                         | .12800    |
| Angolo attrito residuo [MPa] .....                   | 28.40000  |
| 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] .....              | .044312   |
| Raggio plastico galleria [m] .....                  | 13.036583 |
| Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....      | .000000   |
| Spostamento radiale fronte sferico [m] .....        | .015572   |
| Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....   | .004409   |
| Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ... | .012850   |
| Raggio plastico fronte sferico [m] .....            | 8.355577  |

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] .....  | .044312   |
| Raggio plastico galleria fine calcolo [m] ..... | 13.036583 |

## 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

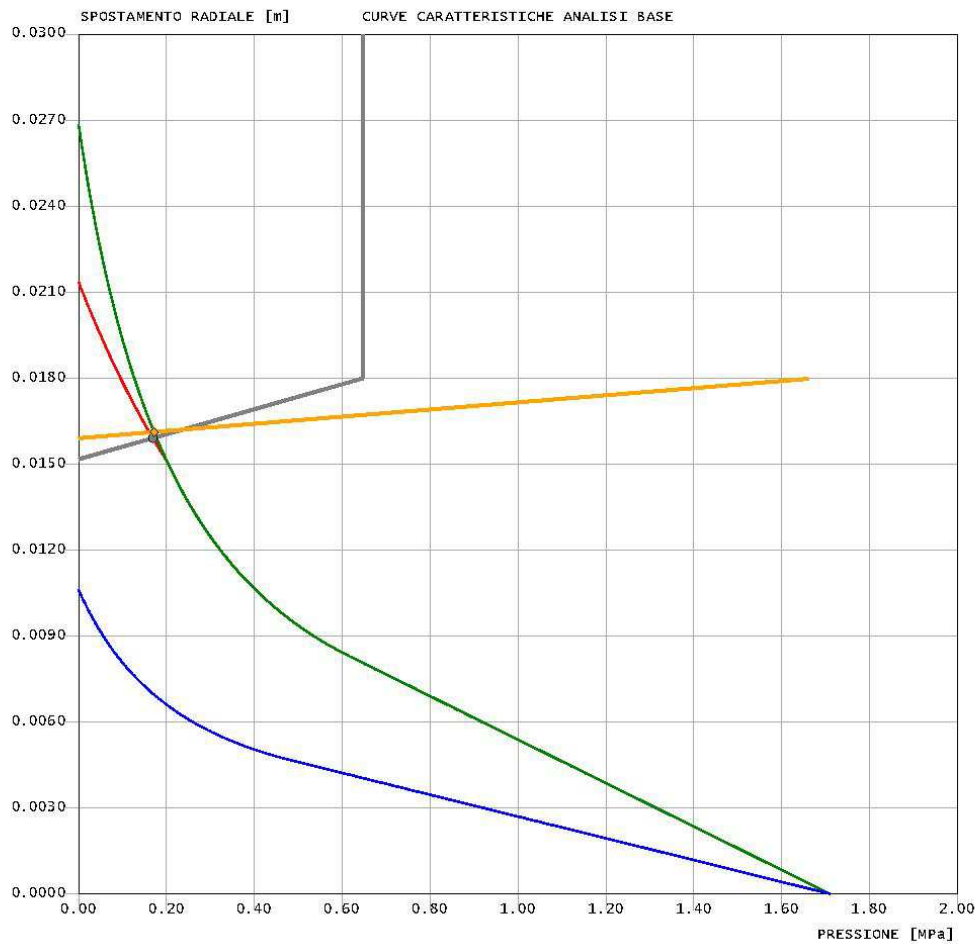


Nizza  
Terapia Rivestimento  
Sez\_A2

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.17  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.17

— 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

Nizza  
Terapia Rivestimento  
Sez\_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] ..... 5.80000

PARAMETRI GEOTECNICI -----
Tensione originaria [MPa] ..... 1.71000
Modulo di Young [MPa] ..... 990.00000
Coefficiente di Poisson ..... .30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] . .00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] .. .00000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa].. .00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] ..... 5.80000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa].. .00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] ..... 5.80000
RESISTENZA ROCCIA
Coesione picco [MPa] ..... .16000
Angolo attrito picco [deg] ..... 34.00000
Coesione residua [MPa] ..... .16000
Angolo attrito residuo [MPa] ..... 34.00000
Angolo dilatanza [deg] ..... .00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] ..... .00000
Modulo di softening H [MPa] ..... .00000
RESISTENZA ROCCIA (CREEP A LUNGO TERMINE)
Coesione picco [MPa] ..... .16000
Angolo attrito picco [deg] ..... 34.00000
Coesione residua [MPa] ..... .16000
Angolo attrito residuo [MPa] ..... 34.00000
Angolo dilatanza [deg] ..... .00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] ..... .00000
Modulo di softening H [MPa] ..... .00000

PRERIVESTIMENTO -----
Distanza dal fronte alla messa in opera [m] ..... 2.40000
Coefficiente riduzione rigidzza ..... 1.00000
Forma del prerivestimento ..... CIRCOLARE CHIUSO

BARRE AD ADERENZA CONTINUA -----
Modulo di Young [MPa] ..... 210000.00000
Resistenza a trazione [MPa] ..... 391.30000
Tensione tesatura iniziale [MPa] ..... .00000
Lunghezza [m] ..... 6.00000
Sezione reagente [m2] ..... .00045
Spaziatura circonferenziale [deg] ..... 11.00000
Spaziatura longitudinale [MPa] ..... 1.20000
Coesione interfaccia barra-roccia [MPa] ..... .30000
Angolo attrito interfaccia barra-roccia [deg] ..... 43.00000
Perimetro sezione sfilamento [m] ..... .16000
Opzione dispositivo di ripartizione ..... 1
[0 dispositivo di ripartizione assente]
Distanza dal fronte attivazione barre [m] ..... 2.30000
SPRITZ-BETON E CENTINE
Spessore spritz [m] ..... .20000
Modulo Young spritz [MPa] ..... 31476.00000
Coefficiente di Poisson spritz ..... .20000
Sezione centina [m2] ..... .00279
Altezza sezione centina [m2] ..... .18000
```

|   |              |
|---|--------------|
| Posizione baricentro sezione centina [m] .....      | .09000       |
| Momento inerzia baricentrico sezione centina [m4] . | .00001450    |
| Passo centine [m] .....                             | .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] .....    | 60.00000    |
| Spessore CLS [m] .....                               | .70000      |
| 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] .....              | .021366  |
| Raggio plastico galleria [m] .....                  | 8.775203 |
| Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....      | .000000  |
| Spostamento radiale fronte sferico [m] .....        | .010621  |
| Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....   | .002673  |
| Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ... | .007791  |
| Raggio plastico fronte sferico [m] .....            | 7.246184 |

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

|  |        |
|--|--------|
| Metodo Panet-Guenot  |        |
| U [m] :  | .01725 |
| LAMBDA :   | .91606 |
| Trasformazione Omotetica   |        |
| U [m] :  | .02333 |
| LAMBDA :   | .97721 |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico  |        |
| U [m] :  | .01519 |
| LAMBDA :   | .88387 |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns          |        |
| U [m] :  | .01080 |
| LAMBDA :   | .77152 |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica |        |
| U [m] :  | .01351 |
| LAMBDA :   | .85020 |

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

|  |         |
|--|---------|
| Metodo Panet-Guenot  |         |
| U [m] :  | .02664  |
| LAMBDA :   | .99870  |
| Trasformazione Omotetica   |         |
| U [m] :  | .02687  |
| LAMBDA :   | 1.00000 |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico  |         |
| U [m] :  | .01594  |
| LAMBDA :   | .99966  |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns          |         |
| U [m] :  | .01215  |
| LAMBDA :   | .99933  |
| Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica |         |
| U [m] :  | .01446  |
| LAMBDA :   | .99956  |

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

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| Metodo Panet-Guenot      |        |
| U [m] :                  | .01704 |
| LAMBDA :                 | .91309 |
| Trasformazione Omotetica |        |
| U [m] :                  | .02312 |

LAMBDA : .97566

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico  
 U [m] : .01514  
 LAMBDA : .88303

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns  
 U [m] : .01072  
 LAMBDA : .76835

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica  
 U [m] : .01345  
 LAMBDA : .84886

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] .....      | .021366    |
| Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....     | 8.775203   |
| Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....           | .000000    |
| Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ... | .026866    |
| Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] .. | 9.667043   |
| PRERIVESTIMENTO -----                               |            |
| Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....       | 7.73766    |
| Pressione punto di equilibrio [MPa] .....           | .16910     |
| Spostamento punto di equilibrio [m] .....           | .01591     |
| Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....  | .01517     |
| Convergenza radiale prerivestimento [m] .....       | .00074     |
| Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....   | .883867    |
| BARRE AD ADERENZA CONTINUA -----                    |            |
| Fattore di sicurezza rottura a trazione .....       | 10.77240   |
| Fattore di sicurezza sfilamento .....               | 7.59640    |
| Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....  | .01514     |
| Convergenza radiale barre [m] .....                 | .00623     |
| Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....   | .883029    |
| SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)              |            |
| Tensione spritz [MPa] .....                         | 4.34593    |
| Tensione centine [MPa] .....                        | 26.65607   |
| Coefficiente di sicurezza spritz .....              | 3.83577    |
| Coefficiente di sicurezza centine .....             | 9.82515    |
| Pressione rottura spritz [MPa] .....                | .64689     |
| Pressione rottura centine [MPa] .....               | 1.65698    |
| Rigidezza spritz [MPa] .....                        | 1160.25920 |
| Rigidezza centinatura [MPa] .....                   | 168.36207  |
| RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----          |            |
| Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....       | 7.78961    |
| Pressione punto di equilibrio [MPa] .....           | .17186     |
| Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....         | .01612     |
| Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....  | .01591     |
| Convergenza radiale rivestimento [m] .....          | .00021     |
| Tensione CLS [MPa] .....                            | 1.46654    |
| Coefficiente di sicurezza CLS .....                 | 9.66220    |
| Pressione rottura CLS [MPa] .....                   | 1.66055    |
| Rigidezza anello CLS [MPa] .....                    | 4501.71625 |
| Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....   | .999658    |



## 2.2 Sez. C1

### 2.2.1 Fronte

## Metodo di Tamez

| DATI GEOMETRICI  |        |   |
|--|--------|---|
| Z (m)  | 4.5    | copertura sulla calotta   |
| W (m)  | 4.5    | profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z  |
| h (m)  | 12.4   | altezza dello scavo   |
| b (m)  | 12.4   | larghezza dello scavo   |
| a (m)  | 1.0    | lunghezza non sostenuta   |
| DATI GEOTECNICI  |        |   |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 268.2  | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 86.3   | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 86.3   | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\phi_m$ (°)   | 24.0   | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| $\phi$ (°)   | 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 |        |   |
| $\phi_m$ (°)   | 19.61  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 69.07  | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\sigma_c$ (kPa)   | 195.8  | $\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$  |
| 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)  | 8.714  | $l = h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$   |
| B (m)  | 29.783 | $B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$  |
| $h_1$ (m)  | 4.500  | $h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$   |
| s (m)  | 0.000  | $S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di $\tau_{m2}$ e $\tau_{m3}$   |
| DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'                 |        |   |
| $\phi$ (°)   | 19.61  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a $h_1$  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 69.07  | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 214.57 | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 10     | peso dell'unità di volume dell'acqua  |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 26.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| K <sub>0</sub> (-)   | 0.4    | coefficiente di spinta a riposo <b>0.664466</b>   |
| K <sub>A</sub> (-)   | 0.3    | coefficiente di spinta attiva <b>0.498</b>  |
| Z/h (-)  | 0.4    | discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3   |
| U (kPa)  | 0      | $U = \gamma_w (Z - W)$  |
| $\gamma^* Z$ (kPa)   | 117    |   |

|                             |             |  |
|-----------------------------|-------------|--|
| $\tau_{m2}$ (kPa)           | 335         | $\tau_{m2} = \begin{cases} \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| $\tau_{m3}$ (kPa)           | 69          | $\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$  |
| <b>A</b>                    | 206.5       | $A = \left[ \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$  |
| <b>B</b>                    | 82.4        | $B = \left[ \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$   |
| <b>C</b>                    | 1071.8      | $C = \left[ \frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$  |
| <b>D</b>                    | 289.3       | $D = \left[ 1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$  |
| <b>RISULTATI</b>            |             |  |
| $P_E$ (kPa)                 | 0           | <b>Galleria superficiale</b>   |
| <b>F.S.F. (-)</b>           | <b>4.70</b> | $CS = \frac{(A + B + C)}{D}$   |
| <b>F.S.<sub>3</sub> (-)</b> | <b>5.74</b> | $CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{(\gamma Z - P_E)} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$   |

## 2.3 Sez C2v

### 2.3.1 Fronte

## Metodo di Tamez

| DATI GEOMETRICI  |        |   |
|--|--------|---|
| Z (m)  | 24.5   | copertura sulla calotta   |
| W (m)  | 24.5   | profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z  |
| h (m)  | 12.4   | altezza dello scavo   |
| b (m)  | 12.4   | larghezza dello scavo   |
| a (m)  | 1.0    | lunghezza non sostenuta   |
| DATI GEOTECNICI  |        |   |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.0   | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 231.0  | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 61.4   | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 61.4   | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\phi_m$ (°)   | 38.0   | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| $\phi$ (°)   | 38.0   | 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 |        |   |
| $\phi_m$ (°)   | 32.01  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna  |
| C <sub>2m</sub> (kPa)  | 49.14  | valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna  |
| $\sigma_c$ (kPa)   | 177.3  | $\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$  |
| f  | 0.902  | $f = \begin{cases} \operatorname{tg} \phi_m & \text{se } c' = 0 \\ \operatorname{tg} \phi_m + \frac{c'}{\sigma_c} & \text{se } c' \neq 0 \end{cases}$ |
| l (m)  | 6.847  | $l = h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$   |
| B (m)  | 26.049 | $B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$  |
| $h_1$ (m)  | 24.500 | $h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$   |
| s (m)  | 0.000  | $S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di $\tau_{m2}$ e $\tau_{m3}$   |
| DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'                 |        |   |
| $\phi$ (°)   | 32.01  | valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a $h_1$  |
| C <sub>2</sub> (kPa)   | 49.14  | valore medio della coesione dalla calotta fino a $h_1$  |
| C <sub>1</sub> (kPa)   | 184.78 | valore medio della coesione al fronte (su h)  |
| $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 10     | peso dell'unità di volume dell'acqua  |
| $\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su $h_1$ )  |
| $\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)   |
| $\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda   |
| $\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )                                    | 21.00  | peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda   |
| K <sub>0</sub> (-)   | 0.4    | coefficiente di spinta a riposo <b>0.469984</b>   |
| K <sub>A</sub> (-)   | 0.3    | coefficiente di spinta attiva <b>0.307</b>  |
| Z/h (-)  | 2.0    | discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3   |
| U (kPa)  | 0      | $U = \gamma_w (Z - W)$  |
| $\gamma^* Z$ (kPa)   | 514.5  |   |

|                             |             |  |
|-----------------------------|-------------|--|
| $\tau_{m2}$ (kPa)           | 279         | $\tau_{m2} = \begin{cases} \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[ \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[ W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| $\tau_{m3}$ (kPa)           | 49          | $\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$  |
| <b>A</b>                    | 887.6       | $A = \left[ \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$  |
| <b>B</b>                    | 310.5       | $B = \left[ \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$   |
| <b>C</b>                    | 873.3       | $C = \left[ \frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$  |
| <b>D</b>                    | 646.2       | $D = \left[ 1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$  |
| <b>RISULTATI</b>            |             |  |
| $P_E$ (kPa)                 | 0           | <b>Galleria superficiale</b>   |
| <b>F.S.F. (-)</b>           | <b>3.21</b> | $CS = \frac{(A + B + C)}{D}$   |
| <b>F.S.<sub>3</sub> (-)</b> | <b>5.06</b> | $CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{(\gamma Z - P_E)} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$   |