

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. GALLERIE

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA (LOTTO 4A)

Galleria Trinacria

Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

SCALA:

-

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

RS3U 40 D 07 CL GN0300 001 C

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato/Data |
|------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---|
| A | EMISSIONE ESECUTIVA | ROCKSOIL | Gennaio 2020 | S.Vagnozzi | Gennaio 2020 | A.Barreca | Gennaio 2020 | A.SCIOTTI Maggio 2020 ITALFERR S.P.A. U.O. GALLERIE Dott. Ing. Alessandra Scattolon Ordine degli Ingegneri di Roma n° 13846 |
| B | EMISSIONE ESECUTIVA | ROCKSOIL | Febbraio 2020 | S.Vagnozzi | Febbraio 2020 | A.Barreca | Febbraio 2020 | |
| C | EMISSIONE ESECUTIVA | ROCKSOIL | Maggio 2020 | S.Vagnozzi | Maggio 2020 | A.Barreca | Maggio 2020 | |
| | | | | | | | | |

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|----------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>2 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 2 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 2 di 201 | | | | | | | | |

INDICE

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | PREMESSA | 6 |
| 2 | SCOPO DEL DOCUMENTO | 6 |
| 3 | NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO | 7 |
| 4 | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 7 |
| 4.1 | DOCUMENTI CORRELATI | 8 |
| 5 | ALLEGATI | 8 |
| 6 | DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO | 8 |
| 7 | DESCRIZIONE DELL'OPERA | 11 |
| 7.1 | LA GALLERIA TRINACRIA | 11 |
| 7.2 | OPERE PER LA SICUREZZA IN GALLERIA | 14 |
| 7.3 | OPERE TECNOLOGICHE | 16 |
| 7.4 | INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO | 17 |
| 8 | FASE CONOSCITIVA | 18 |
| 8.1 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO | 18 |
| 8.1.1 | <i>Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato</i> | 18 |
| 8.2 | INDAGINI GEOTECNICHE | 18 |
| 8.3 | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA | 22 |
| 8.4 | FORMAZIONE TRV | 23 |
| 8.3.1.1 | <i>Caratteristiche fisiche</i> | 23 |
| 8.3.1.2 | <i>Caratteristiche meccaniche: resistenza non drenata</i> | 28 |
| 8.3.1.3 | <i>Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio: resistenza drenata</i> | 34 |
| 8.3.1.4 | <i>Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio TRV Lotto 4</i> | 36 |
| 8.3.1.5 | <i>Caratterizzazione TRV ad alte coperture</i> | 38 |

| | |
|--|----|
| 8.3.1.6. Caratteristiche meccaniche: deformabilità | 39 |
| 8.3.1.7. Caratteristiche di permeabilità | 48 |
| 8.3.1.8. Parametri geotecnici | 49 |
| 8.5 FORMAZIONE TRVA | 50 |
| 8.3.1.9. Caratteristiche fisiche (trva argilloso) | 50 |
| 8.3.1.10. Caratteristiche fisiche (trva sabbioso) | 54 |
| 8.3.1.11. Caratteristiche meccaniche: resistenza non drenata (facies argilloso) | 60 |
| 8.3.1.12. Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio: resistenza drenata | 61 |
| 8.3.1.13. Caratteristiche meccaniche: deformabilità (facies argillosa) | 63 |
| 8.3.1.14. Caratteristiche meccaniche: deformabilità (facies sabbiosa) | 64 |
| 8.3.1.15. Caratteristiche di permeabilità (facies argillosa) | 65 |
| 8.3.1.16. Parametri geotecnici | 66 |
| 8.6 VALORI CARATTERISTICI UTILIZZATI NELLE ANALISI | 67 |
| 9 FASE DI DIAGNOSI | 68 |
| 9.1 CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO | 68 |
| 9.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO | 69 |
| 9.2.1 Analisi con il metodo delle linee caratteristiche | 69 |
| 9.2.2 Analisi della stabilità del fronte | 72 |
| 9.3 DEFINIZIONE DELLE TRATTE A COMPORTAMENTO TENSIO-DEFORMATIVO OMOGENEO | 76 |
| 10 FASE DI TERAPIA | 77 |
| 10.1 SCELTA DEL METODO DI SCAVO | 77 |
| 10.2 SCAVO MECCANIZZATO | 77 |
| 10.3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI | 79 |
| 10.4 ANALISI E VERIFICA DEGLI INTERVENTI AL FRONTE E DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI | 82 |
| 10.4.1 Criteri di verifica | 83 |
| Definizione dell'azione sismica di progetto | 85 |

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

| | | |
|---------|---|------------|
| | <i>Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale</i> | <i>88</i> |
| | <i>Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione longitudinale.....</i> | <i>89</i> |
| 10.5 | ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO | 90 |
| 10.5.1 | <i>Requisiti conci rivestimento.....</i> | <i>91</i> |
| 10.5.2 | <i>Requisiti miscela bicomponente</i> | <i>92</i> |
| 10.5.3 | <i>Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 45 cm</i> | <i>93</i> |
| 10.5.4 | <i>Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 50 cm</i> | <i>113</i> |
| 10.5.5 | <i>Verifiche statiche in fase definitiva : modelli di calcolo e criteri di verifica.....</i> | <i>132</i> |
| 10.5.6 | <i>Requisiti Stati limite</i> | <i>135</i> |
| 10.6 | VERIFICHE STATICHE: PRESENTAZIONE E RISULTATI | 144 |
| 10.6.1 | <i>Modelli assialsimmetrici – Criteri di verifica</i> | <i>146</i> |
| 10.6.2 | <i>Modelli assialsimmetrici - Valutazione delle spinte massime di esercizio della TBM e dei fattori di rilascio dello stato tensionale.....</i> | <i>149</i> |
| 10.6.3 | <i>Modelli piani</i> | <i>151</i> |
| 10.6.4 | <i>Verifica dei giunti - pressioni di contatto.....</i> | <i>153</i> |
| 10.6.5 | <i>Verifica delle pressioni di contatto.....</i> | <i>153</i> |
| 10.6.6 | <i>Verifica alle trazioni indotte.....</i> | <i>154</i> |
| 10.6.7 | <i>Analisi n. 15 - Sezione di calcolo pk 25150.....</i> | <i>160</i> |
| 10.6.8 | <i>Analisi n. 16 - Sezione di calcolo pk 23850.....</i> | <i>168</i> |
| 10.6.9 | <i>Analisi n. 17 - Sezione di calcolo pk 19600.....</i> | <i>175</i> |
| 10.6.10 | <i>Analisi n. 18 - Sezione di calcolo pk 20150.....</i> | <i>182</i> |
| 10.6.11 | <i>Analisi n. 19 - Sezione di calcolo pk 20300.....</i> | <i>190</i> |
| | <i>Azioni di mitigazione dei potenziali rischi.....</i> | <i>198</i> |
| 11 | FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO..... | 199 |
| 11.1 | CRITERI GENERALI..... | 199 |
| 11.2 | MONITORAGGIO IN CORSO D’OPERA | 199 |



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA
TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo
della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 5 di 201 |

12 CONCLUSIONI.....201

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 6 di 201 |

1 PREMESSA

Nel presente documento sono analizzate le tematiche progettuali e gli aspetti tecnici relativi al progetto definitivo della galleria Trinacria facente parte dei lavori riguardanti il nuovo collegamento Palermo-Catania della Diretrice ferroviaria Messina-Palermo-Catania, tratta Lercara – Caltanissetta Xirbi, che si estende tra le stazioni di Lercara Diramazione (inclusa) e Caltanissetta Xirbi (inclusa), dal km 0+000 (coincidente con la pk 76+730 della linea storica Palermo Catania) al km 47+683 (coincidente con la pk 126+412 della linea storica Palermo Catania).

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Nel presente documento si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione della galleria naturale “Trinacria”, ubicata, per quanto riguarda la galleria di linea, fra le progressive km 13+427.00 (imbocco lato Ovest) e km 28+876.00 (imbocco lato Est), per una lunghezza comprensiva delle opere di imbocco di circa 13.449km.

Per la descrizione delle opere di imbocco e dei tratti di galleria artificiale si rimanda alla “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco” (0).

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (0), 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, geomorfologica ed idrogeologica” (Rif. [12]) a cui si rimanda per l’illustrazione del modello geologico; lo studio geotecnico con la definizione del modello geotecnico di sottosuolo e dei parametri di progetto è illustrata nel Capitolo 8.
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 (Cap. 0).
3. Fase di terapia: sulla base dei risultati delle precedenti fasi, si individuano le modalità di scavo e gli interventi di stabilizzazione idonei (sezioni tipo) per realizzare l’opera in condizioni di sicurezza (Cap.0). Le soluzioni progettuali sono state analizzate per verificarne l’adeguatezza: nel capitolo 0 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 (Cap 11). Nel piano di monitoraggio sono individuate le grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d’opera per controllare la risposta deformativa dell’ammasso al procedere dello scavo, verificare la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le soluzioni progettuali nell’ambito delle variabilità previste in progetto.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|----------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>7 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 7 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 7 di 201 | | | | | | | | |

3 NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO

- Rif. [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e Trasporti 17/01/2018, “Aggiornamento delle Nuove norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Rif. [2] C.S.LL.PP., Circolare n°7 del 21/01/2019, “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al DM 14/01/2018”.
- Rif. [3] Decreto Ministeriale 28/10/2005. “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”;
- Rif. [4] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1303/2014 - relativa alla Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente “la sicurezza nelle gallerie ferroviarie” nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [5] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1300/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente le “persone a mobilità ridotta” nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [6] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1299/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità.
- Rif. [7] RFI, doc RFI DTC SI SP IFS 001 C “Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili” (21/12/2018);
- Rif. [8] RFI, doc RFI DTC SI MA IFS 001 C “Manuale di Progettazione delle opere civili” (21/12/2018);
- Rif. [9] ITALFERR, Specifica Tecnica PPA.0002403 “Linee guida per la progettazione geotecnica delle gallerie naturali” (Dicembre 2015).

4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Rif. [10] Rif. [10] Italferr, Progetto Preliminare/Progetto di fattibilità tecnico economica [Dicembre 2018];
- Rif. [11] Rif. [11] ITALFERR - [RS3D00014RGMD0000001A], Dossier dati e requisiti di base [Maggio 2018].

Nel presente documento si fa inoltre riferimento ai seguenti elaborati allegati al progetto:

- Rif. [12] Rif. [12] U.O. Geologia - [RS3G30R69RHGE0005001B] “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica”
- Rif. [13] Rif. [13] U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità - [inserire codifica] “Elaborati specialistici”
- Rif. [14] Rif. [14] U.O. Impiantistica industriale - “Elaborati specialistici”
- Rif. [15] U.O. Gallerie, doc. RS3U40D07RHGN0000001B “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo”;
- Rif. [16] U.O. Gallerie, doc. RS3U40D07CLGA0000003A “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco”;
- Rif. [17] U.O. Gallerie, doc RS3U40D07F5GN0300001B “Profilo geotecnico 1/2 RS3U40D07F5GN0300002B “Profilo geotecnico 2/2 – Galleria Trinacria”.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 8 di 201 |

4.1 Documenti Correlati

- Rif. [18] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.).
- Rif. [19] 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. [20] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l’étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60.
- Rif. [21] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy.
- Rif. [22] Broms B.B., Bennermark H. (1967). Stability of a clay at a vertical opening. J.Soil Mech. Found. Div. ASCE

5 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

- All. [1] “Analisi con il metodo delle linee caratteristiche”;
- All. [2] “Analisi numeriche”;

6 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

I contenuti della presente relazione sono illustrati negli elaborati grafici specialistici allegati al progetto:

7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

7.1 La galleria Trinacria

La galleria Trinacria è costituita da un tratto in naturale di 13399.6 m e da due tratti in artificiale in corrispondenza dei due imbocchi (lato Palermo e lato Catania) di lunghezza complessiva pari a 49.4 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 38.4 m per l'imbocco lato Catania. L'opera interessa pertanto quattro tbm provenienti da imbocchi lato Catania e lato Palermo; la partenza dal lato Catania presenta una partenza previa realizzazione tramite allarghi da realizzare in tradizionale per accogliere un tratto contenente il doppio binario. Essa presenta un tratto di lunghezza complessiva pari a 13449 m, dal km 13+427.00 al km 28+876.00. Partendo dall'imbocco lato Palermo, posto ad una quota di 341.03 m s.l.m., il tracciato procede in discesa con pendenza del circa 3‰, fino a raggiungere l'imbocco lato Catania, posto ad una quota di 449 m s.l.m.. Il tracciato prevede il passaggio in punti a basse coperture, in corrispondenza delle progressive km 15+410 circa, km 15+950 e km 25+650. Lo scavo viene effettuato all'interno delle litologie incontrate con metodo meccanizzato (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). La copertura massima è di circa 500 metri.

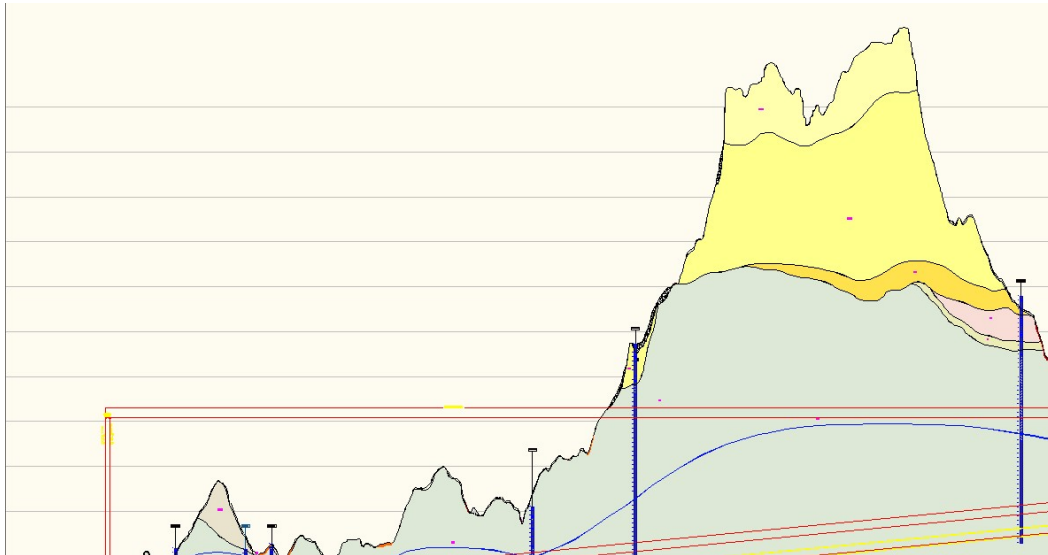


Figura 1 - Profilo galleria Trinacria

Sono di seguito illustrate le principali caratteristiche e i requisiti funzionali della galleria Trinacria. Per maggiori dettagli si rimanda alla “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo”

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 Progressive delle gallerie Trinacria

| Gallerie di linea | WBS | Opera | PK inizio | PK fine | Lunghezza parziale [m] | Lunghezza totale [m] |
|-------------------|------|--|-----------|-----------|------------------------|----------------------|
| Trinacria | GA06 | Galleria Artificiale e Portale di Imbocco - lato Palermo | 13+427.00 | 13+476.40 | 49.4 | 13449 |
| Trinacria | GN03 | Galleria naturale | 13+476.40 | 26+876.00 | 13399.6 | |

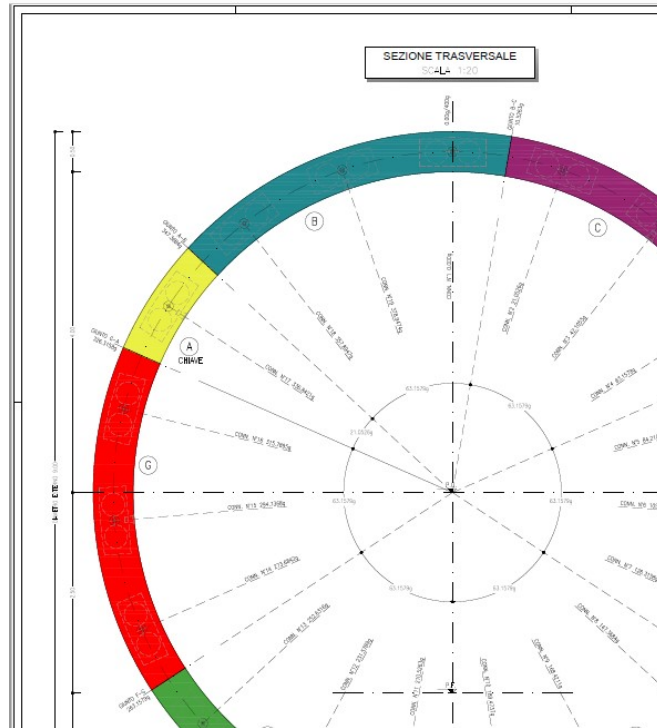
La galleria è progettata per consentire il transito del Gabarit C (PMO n°5) (Rif. [11]).

Le sezioni geometrico funzionali previste sono in accordo con le sezioni tipo del Manuale di Progettazione RFI (Rif. [8]) idonee al transito del Gabarit indicato e velocità di progetto sino 200 km/h. Al suo interno è previsto l'alloggiamento dell'armamento tradizionale con traverse tipo "RFI-240" poggiate su ballast ed elettrificazione a c.c. a 3 kV (Rif. [11]).

La sezione d'intradosso della galleria a singolo binario in scavo meccanizzato ha raggio pari a 4,00 m per i conchi di altezza pari a 0.5 m e 4.05 per i conchi di altezza pari a 0.45 m, sviluppa un'area libera di circa 43 m² e un perimetro pari a circa 25 m.

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 13 di 201 |



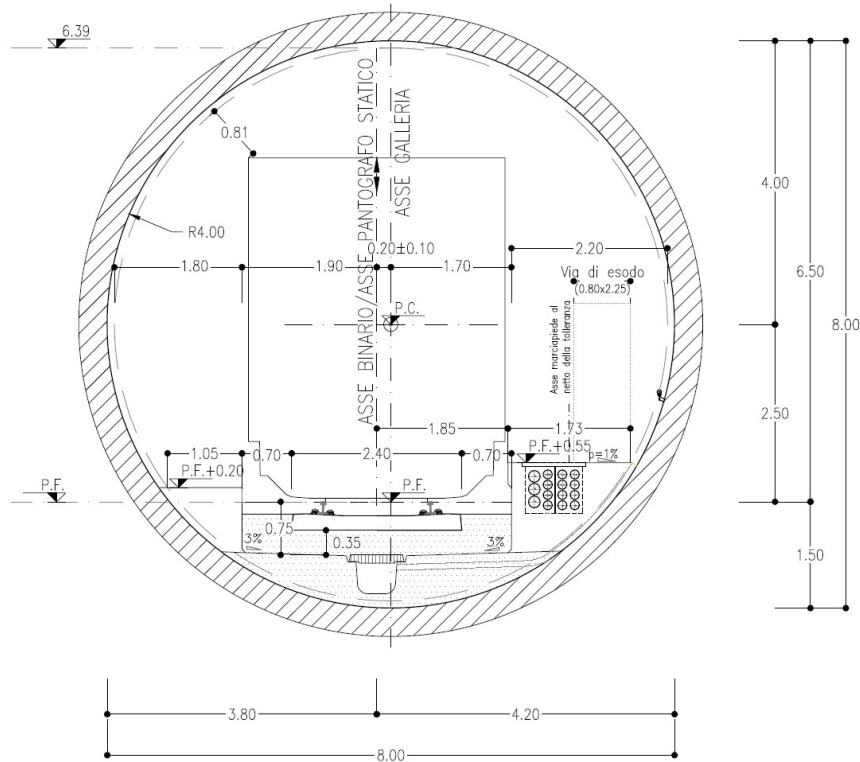


Figura 2 – Sezione di intradosso galleria di linea a singolo binario in scavo meccanizzato (sezione corrente)

7.2 Opere per la sicurezza in galleria

In accordo a quanto previsto negli elaborati della U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità (Rif. [13]), i requisiti di sicurezza previsti per la galleria Trinacria sono conformi alle disposizioni legislative emanate in campo europeo attraverso la Specifica Tecnica di Interoperabilità STI-SRT 2014 “Safety in Railway Tunnels” (Rif. [4]) e le indicazioni del Manuale di Progettazione RFI (Rif. [7]).

Al fine di garantire l’accesso alle aree di sicurezza, le gallerie sono dotate di uscite/accessi laterali pedonali ogni 1000 m e uscite/accessi laterali carrabili ogni 4000 m.

Per la galleria è stato previsto un cunicolo parallelo alla galleria di linea, avente medesima sezione. Il cunicolo parallelo è quindi connesso alla galleria di linea tramite collegamenti trasversali pedonali ogni 1000 m e carrabili ogni 4000 m. E’ prevista sul cunicolo parallelo, all’innesto coi by pass carrabili una piazzola di allargamento per consentire le manovre dei mezzi di soccorso.

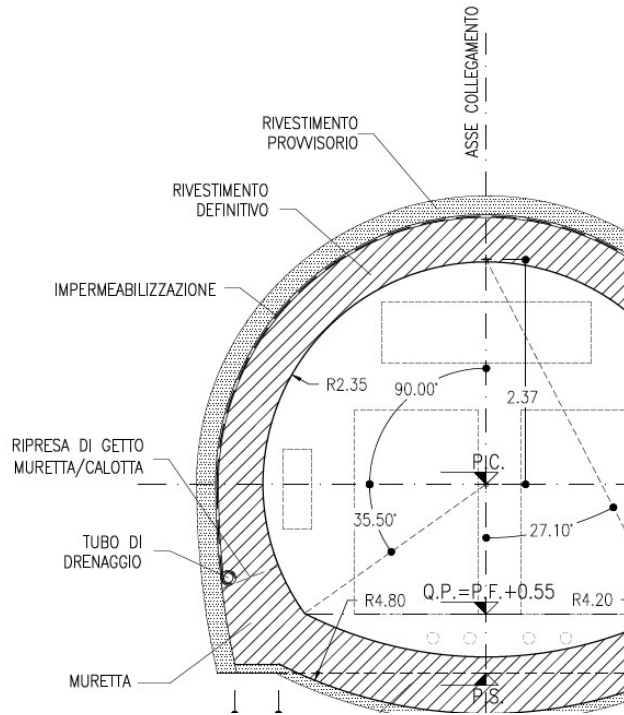


Figura 3 - Sezione di intradosso bypass pedonale (sezione corrente)

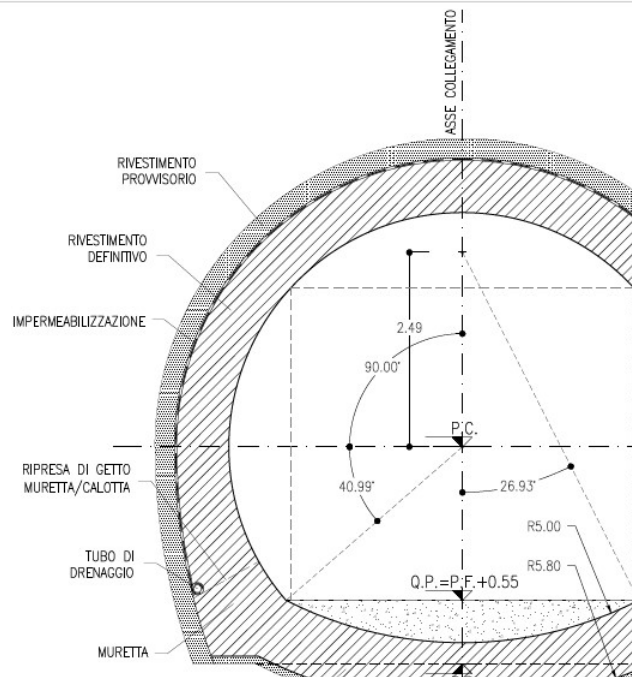


Figura 4 - Sezione di intradosso bypass carrabile (sezione corrente)

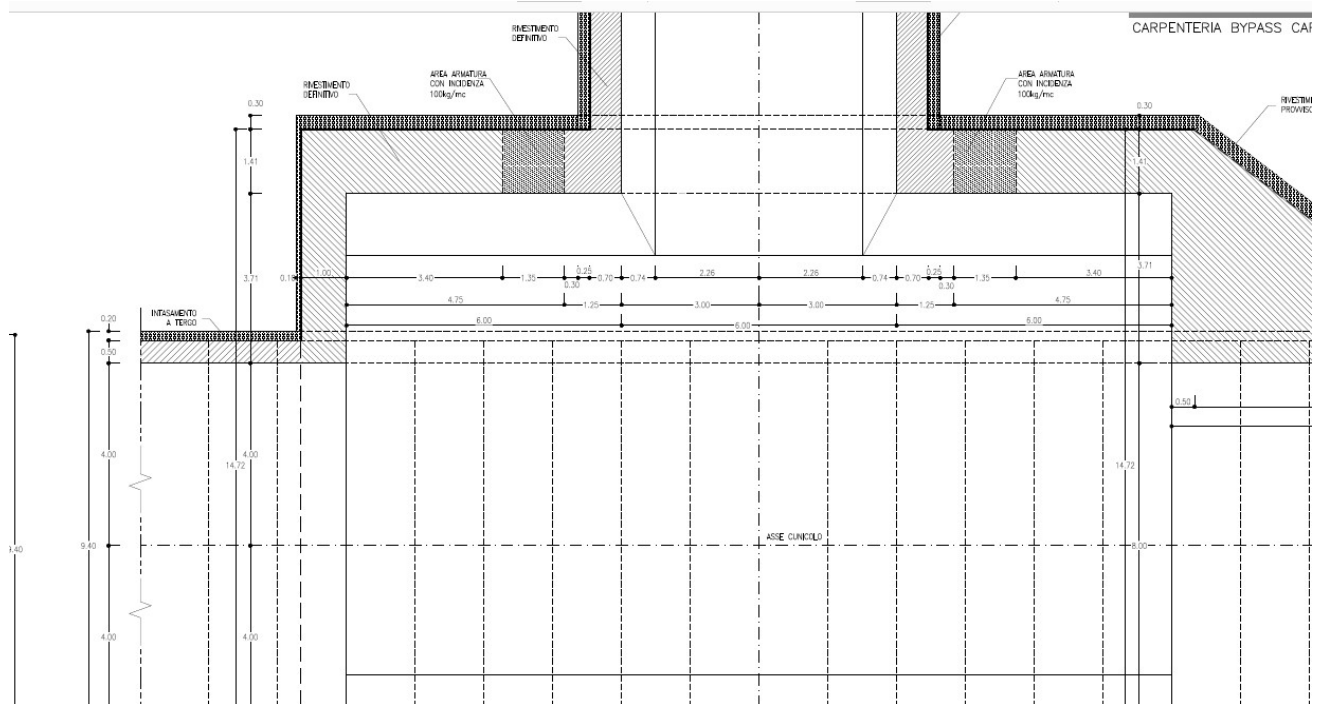


Figura 5 Innesto bypass carrabile su cunicolo parallelo (pianta)

7.3 Opere tecnologiche

In accordo al Manuale di Progettazione RFI (Rif. [8]), le gallerie non sono dotate di nicchie di ricovero personale.

Per quanto riguarda le gallerie di linea sono presenti:

- nicchie standard, aventi larghezza di 2.80m, lunghezza 3.55m e altezza di 2.45m;
- nicchie tecnologiche IS-TE, aventi larghezza di 2.80m, lunghezza 4.10m e altezza di 2.95m;
- nicchie tecnologiche TLC, aventi larghezza di 2.80m, lunghezza di 5.75m e altezza di 2.95m;
- nicchie cabine MT-BT, aventi larghezza di 5.60 m, lunghezza di 10.00m e altezza di 4.06m.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 17 di 201 |

7.4 Interferenze lungo il tracciato

Dall'analisi della cartografia di progetto è stato possibile appurare che nel tracciato della galleria naturale Trinacria vi siano nella maggiorparte dei casi (es. Enna) interferenze con opere preesistenti a coperture di sicurezza superiori a 100m per i quali si escludono fenomeni di interazione. Alcuni corpi di fabbrica isolati risultano a coperture inferiori; è stato analizzato il calcolo delle subsidenze e del relativo potenziale d danno enlla specifica relazione come da elenco elaborati.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 18 di 201 |

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 dalle opere in sotterraneo.

8.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

L'area di studio ricade nel settore centro-orientale della penisola siciliana, in corrispondenza del margine più orientale della Catena Appenninico-Maghrebide. Dal punto di vista geologico la Catena Appenninico-Maghrebide, affiorante nella porzione settentrionale dell'isola (Figura 13), è costituita da sequenze mesocenoiche sia di piattaforma che di bacino, con coperture flyschoidi mioceniche.

8.1.1 Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato

La galleria attraversa quasi esclusivamente i terreni di natura argilloso-marnosa, riferibili al membro pelitico della formazione di Terravecchia (TRV), che costituiscono la parte basale della rocca su cui sorge la città di Enna; l'unità TRV viene attraversata dall'imbocco ovest fino alla pk 26+550 ca. Tra la pk 26+550 ca. e l'imbocco lato Catania ca si prevede che il tunnel attraversi i termini sabbioso-limosi riferibili al membro arenaceo della medesima unità (TRVa), in contatto stratigrafico con il membro pelitico, evidenziati dalle stratigrafie dei sondaggi 4SD1 e 4a-GN3-S19.

La parte sommitale della rocca è impostata nelle sequenze messiniane e plioceniche (Gessoso-Solfifera e gruppo di Enna) che, data la loro giacitura suborizzontale a grande scala, non arrivano a quota tunnel.

Non vi sono indizi circa la possibile presenza di zone di faglia e/o contatti tettonici (sovrascorrimenti) a quota galleria.

È previsto lo scavo di un complesso fondamentalmente argilloso, con locali passaggi a facies marnose a comportamento più litoide, la cui distribuzione non può però essere assunta come una funzione della profondità a cui avviene lo scavo. L'alternanza di facies non litoidi, francamente argillose e facies litoidi marnose è di tipo stratigrafico, dipendendo da variazioni nelle condizioni di sedimentazione, e non dall'aumento del carico litostatico.

In linea di massima si stima che la quota di materiale a comportamento litoide non superi il 5% della lunghezza della galleria (cfr. tabella seguente). La relativa maggiore percentuale di materiale litoide ipotizzata per l'unità TRVa è legata alla possibile presenza di livelli di arenarie cementate, che comunque in genere hanno spessore metrico o plurimetrico al massimo.

8.2 Indagini geotecniche

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

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 19 di 201 |

Per la fase progettuale definitiva sono stati eseguiti:

- n. 96 sondaggi a carotaggio continuo (profondità variabili tra 5 m e 280 m dal piano campagna), attrezzati con piezometri ed inclinometri (laddove presenti);
- n. 36 prove dilatometriche/pressiometriche nei fori di sondaggio;
- n. 50 prove di permeabilità di tipo Lefranc e Lugeon;
- n. 12 prospezioni sismiche MASW.
- n. 16 prove sismiche in foro tipo down-hole;

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
RS3U 40 D 07 CL GN 03 0001 C 20 di 201

| ID | Prof. ipotizzata | in corso | log | Rilievo gas | Prove permeabilità | Prove pressiometriche e dilatometriche | Piezometro casagrande | Piezometro norton | Piezometro Elettrico | piezometro | DH | MASW | HVSR | inclinometro |
|----------------|------------------|----------|-----|-------------|--------------------|--|-----------------------|-------------------|----------------------|------------|----|------|------|--------------|
| 4a-S01 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4a-S02 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | |
| 4a-S03 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S04 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S06 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | 1 |
| 4a-S06bis | 10 | | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S07 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S08 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S09 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | 1 |
| 4a-S11 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S12 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S13 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4a-S14 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S15 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | |
| 4a-S16 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4a-S17 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | |
| 4a-GN1-S01 | 40 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4a-GN1-S02 | 85 | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | | | |
| 4a-GN1-S03 | 140 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN1-S04 | 135 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN1-S05 | 95 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a-GN1-S06 | 30 | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN1-S06a | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4a-GN1-S06b | 30 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | 1 |
| 4a-SIGN1 | 35 | | | | | | | | | | 1 | | | |
| 4a-SIGN1a | 35 | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a-SIGN1b | 20 | | | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a-S20 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 4a-S21 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | |
| 4a-S22 | 40 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S24 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | |
| 4a-GN2-S07 | 40 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN2-S07a | 40 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4a-GN2-S07b | 40 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a-GN2-S07bis | 50 | | 1 | 1 | | 1 | | | | | | | | |
| 4a-GN2-S08 | 145 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | |
| 4a-GN2-S09 | 70 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN2-S10 | 30 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a-GN2-S10a | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a-GN2-S10b | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4a-S26 | 40 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S27 | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | | 1 | 1 | |
| 4a-S28 | 40 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-S28a | 6 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | | | | |
| 4a-S29 | 40 | | 1 | | 1 | | 1 | | | | | 1 | 1 | |
| 4a-GN3-S11 | 30 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN3-S11a | 30 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4a-GN3-S12 | 75 | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | |
| 4a-GN3-S13 | 80 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN3-S13a | 20 | | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN3-S14 | 85 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN3-S15 | 265 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |
| 4a-GN3-S16 | 280 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | |
| 4a-GN3-S17 | 170 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | |
| 4a-GN3-S19 | 35 | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4a-GN3-S19b | 30 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4a-GN3-S20_int | 200 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 4a-S30/40m | 40 | | 1 | | | 1 | | | | | | | | |
| 4a-V01/30m | 40 | | 1 | | 1 | | | | | | | 1 | 1 | |
| 4aS31 | 30 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | |
| 4aS32 | 30 | | 1 | | 1 | | | | 1 | 1 | | | | |
| 4aS33 | 30 | | 1 | | 1 | | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | |
| 4aV02 | 30 | | 1 | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | |
| 4aV03 | 30 | | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | |
| 4aV05 | 30 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 4aV06 | 30 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 4a-V04 | 30 | | 1 | | 1 | | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | |
| 4aV07 | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4aV08 | 40 | | 1 | | | 1 | | | | | | | | |
| 4aV09 | 40 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4aV10 | 40 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4aV11 | 50 | | 1 | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | |
| 4aV12 | 40 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4aV12a | 12 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI 01 | 30 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI 01bis | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4a SI - 02 | 30 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | | |
| 4a SI - 03 | 30 | | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI - 04 | 30 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI - 06 | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a SI - 06a | 20 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI - 07 | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a SI - 07a | 15 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI - 08 | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a SI - 08a | 17 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a SI - 08b | 6 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4aV14 | 40 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4aV15 | 40 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4aV15a | 20 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4aV16 | 40 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4aV16a | 20 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4aV17 | 30 | | 1 | | | | | | 1 | | | | | |
| 4a SI 01bis | 30 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | |
| 4a-F01 | 30 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 4a-F01a | 30 | | 1 | | | | | | | | 1 | | | |
| 4a-F01b | 30 | | 1 | | | | | | | | | | | 1 |
| 4a-F02 | 45 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | |

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 21 di 201 |

Il numero totale dei campioni analizzati nella tratta di interesse e sottoposti a prove di laboratorio è di 184. Sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove meccaniche:

- prove di taglio diretto (TD);
- prove di compressione triassiale (CIU, CID, UU);
- prove di compressione monoassiale;
- prove di rigonfiamento impedito;
- prove di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg.

Nel corso della campagna di indagini eseguita nel 2018, complessivamente nel Lotto 4 sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- n. 14 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, di cui 13 strumentati con piezometri. All'interno dei fori di sondaggio sono state eseguite n. 24 prove di permeabilità, n. 16 prove pressiometriche ed n. 66 prove SPT.

Il numero totale dei campioni prelevati nel settore di intervento del Lotto 4 e sottoposti a prove di laboratorio è di 94, di cui 60 campioni indisturbati di terreno, 34 rimaneggiati. Sui campioni prelevati sono state compiute le seguenti prove:

- prove di taglio diretto (TD);
- prove di compressione triassiali (CIU, CID, UU);
- prove edometriche.

Nella campagna di indagini pregressa (2013) sono state, invece, eseguite le seguenti indagini:

- n. 4 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, strumentati con piezometri. Prove di permeabilità ed SPT in foro di sondaggio.
- n. 3 prospezioni sismiche MASW.
- prove di laboratorio.

Per ulteriori dettagli relativi alle campagne di indagini si rimanda al documento “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica”.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 22 di 201 |

8.3 Caratterizzazione geotecnica

I risultati delle indagini geotecniche, in situ e di laboratorio, hanno permesso di definire il modello geotecnico rappresentativo delle condizioni stratigrafiche e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni/rocce interessati dall'opera in sotterraneo lungo il suo tracciato. L'ubicazione dei sondaggi ed il modello geotecnico sono rappresentati nell'elaborato "Profilo geotecnico" (0). Nei paragrafi che seguono si riepilogano in sintesi i risultati della caratterizzazione e modellazione geotecnica per ciascuna delle formazioni interessate dallo scavo delle gallerie.

8.4 Formazione TRV

Di seguito si riportano i grafici e le tabelle contenenti i parametri per le singole gallerie in esame per la formazione del TRV. Questa formazione è composta da argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marrone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, talora con laminate e con strati irregolari e lentiformi, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre.

8.3.1.1. Caratteristiche fisiche

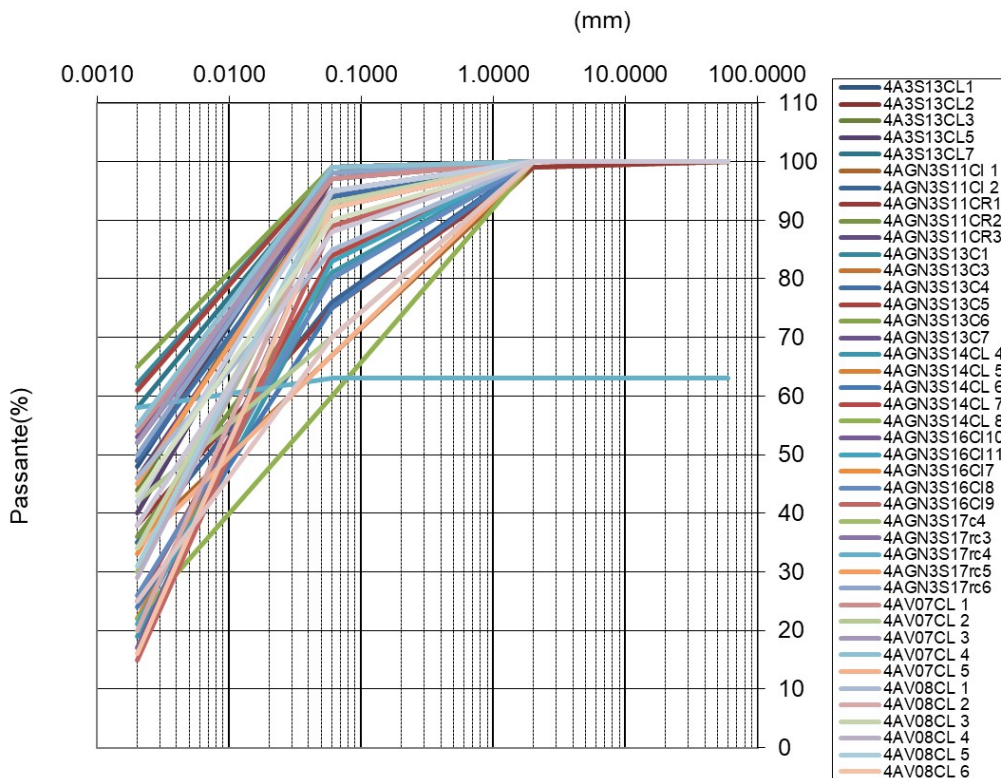


Figura 6: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRV - curve di distribuzione granulometrica

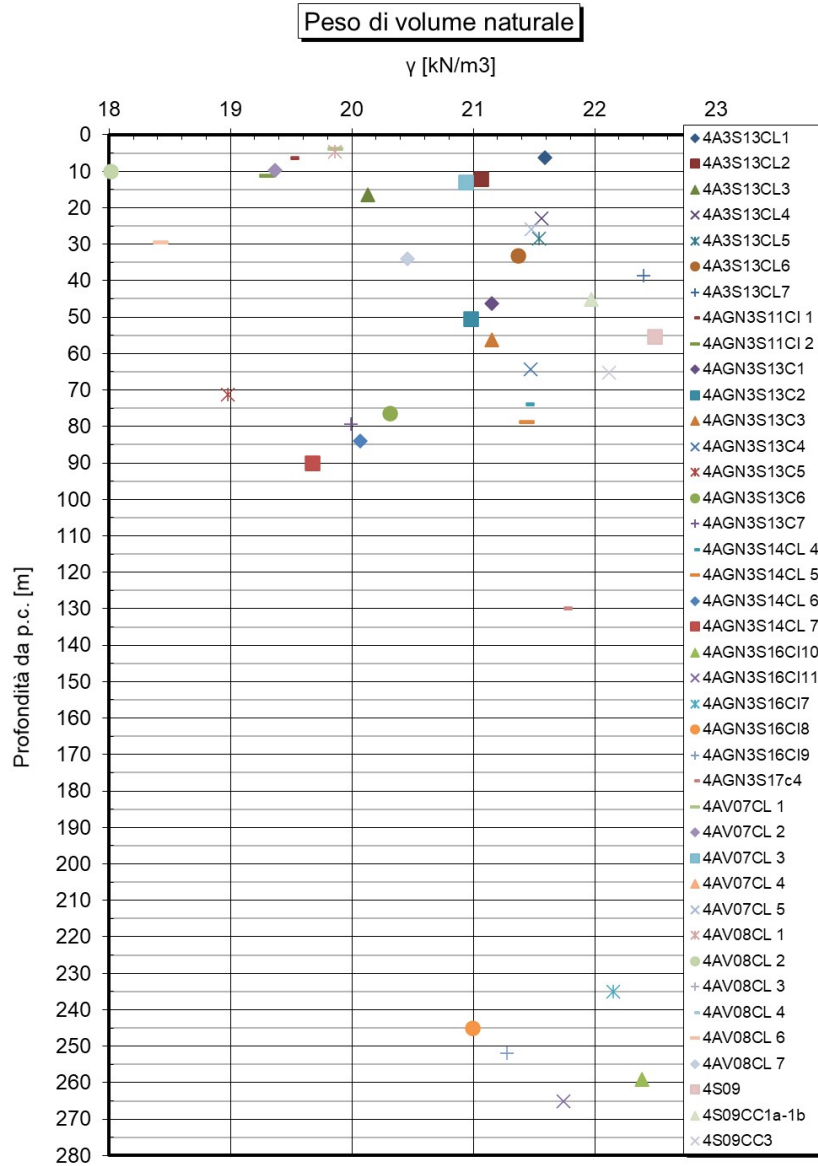


Figura 7: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRV - peso dell'unità di volume

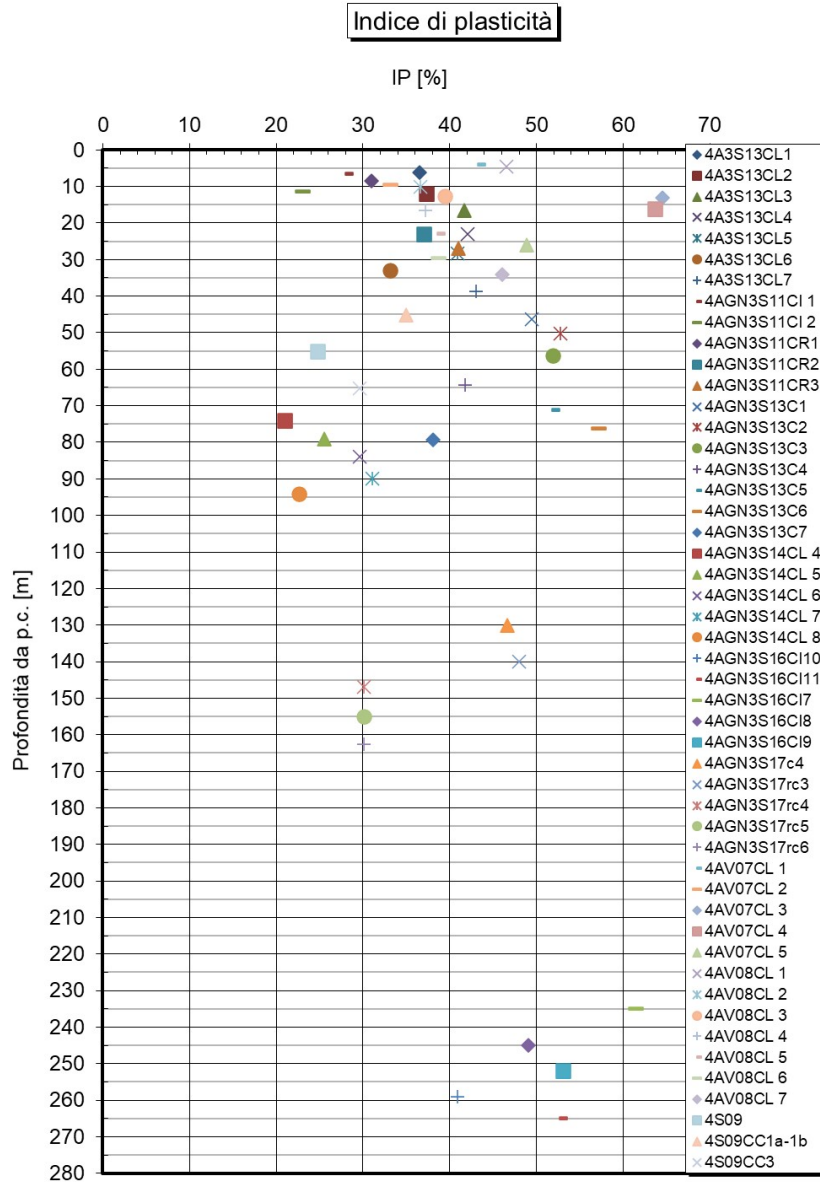


Figura 8: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRV – Indice di plasticità

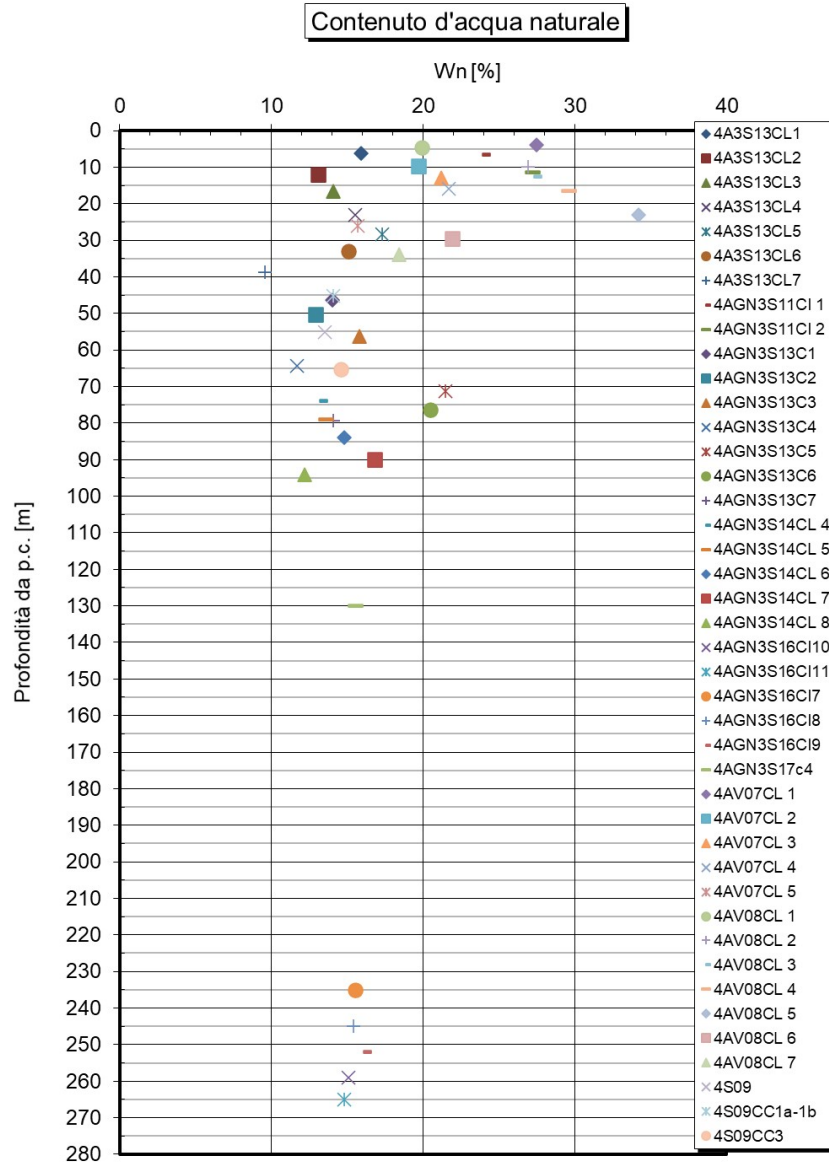


Figura 9: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRV – contenuto di acqua naturale

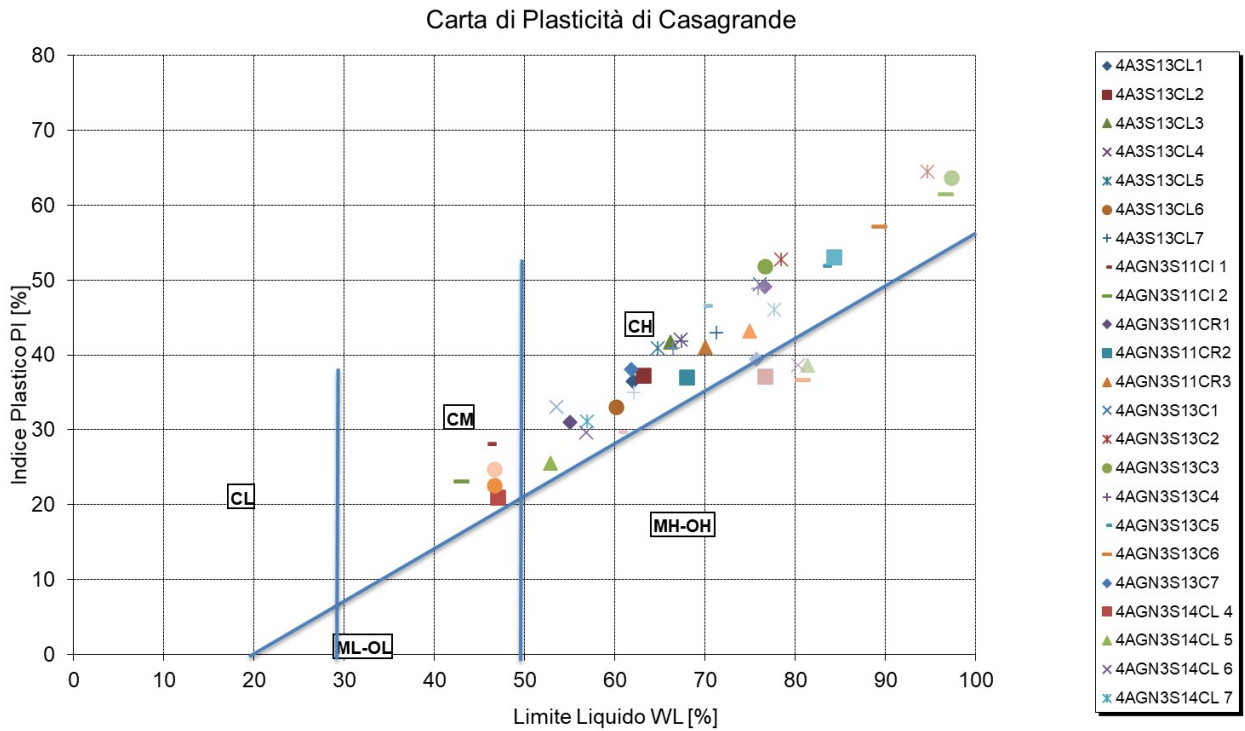


Figura 10: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRV – Carta di plasticità di Casagrande

8.3.1.2. Caratteristiche meccaniche: resistenza non drenata

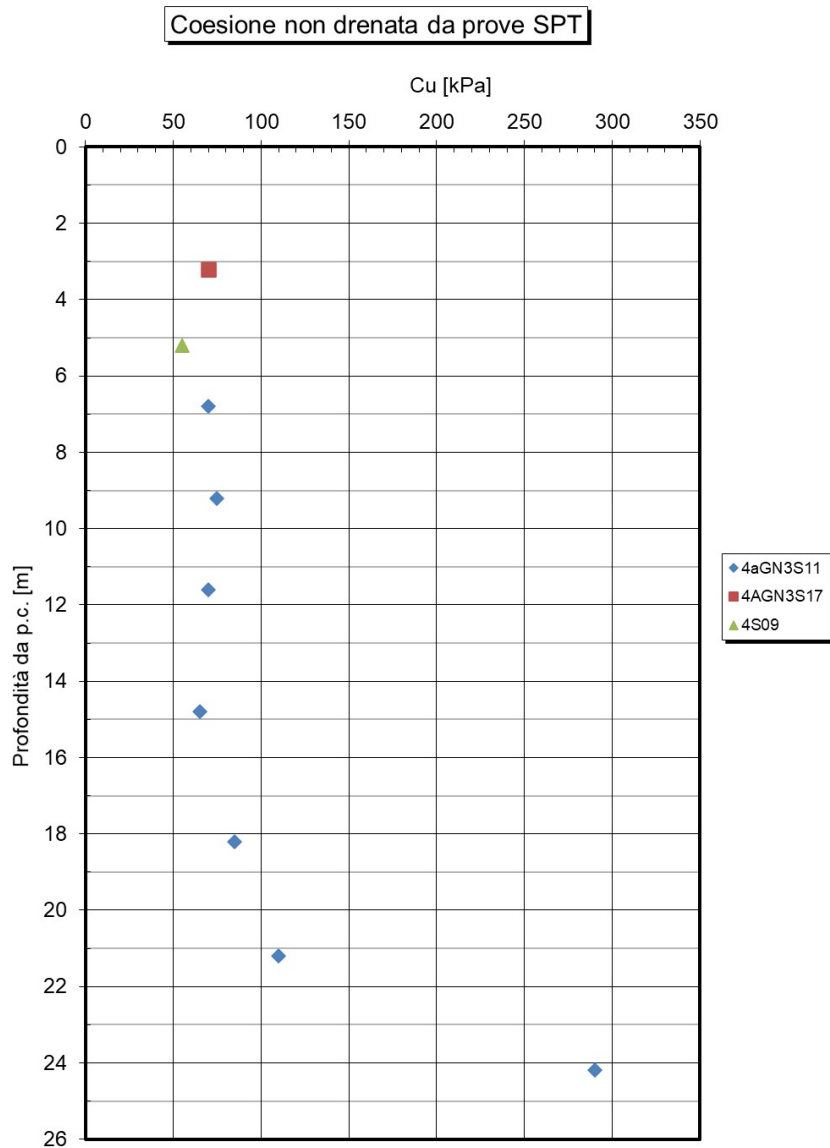


Figura 11: Galleria Trinacria - TRV – resistenza al taglio non drenata da NSPT

OCR da SPT

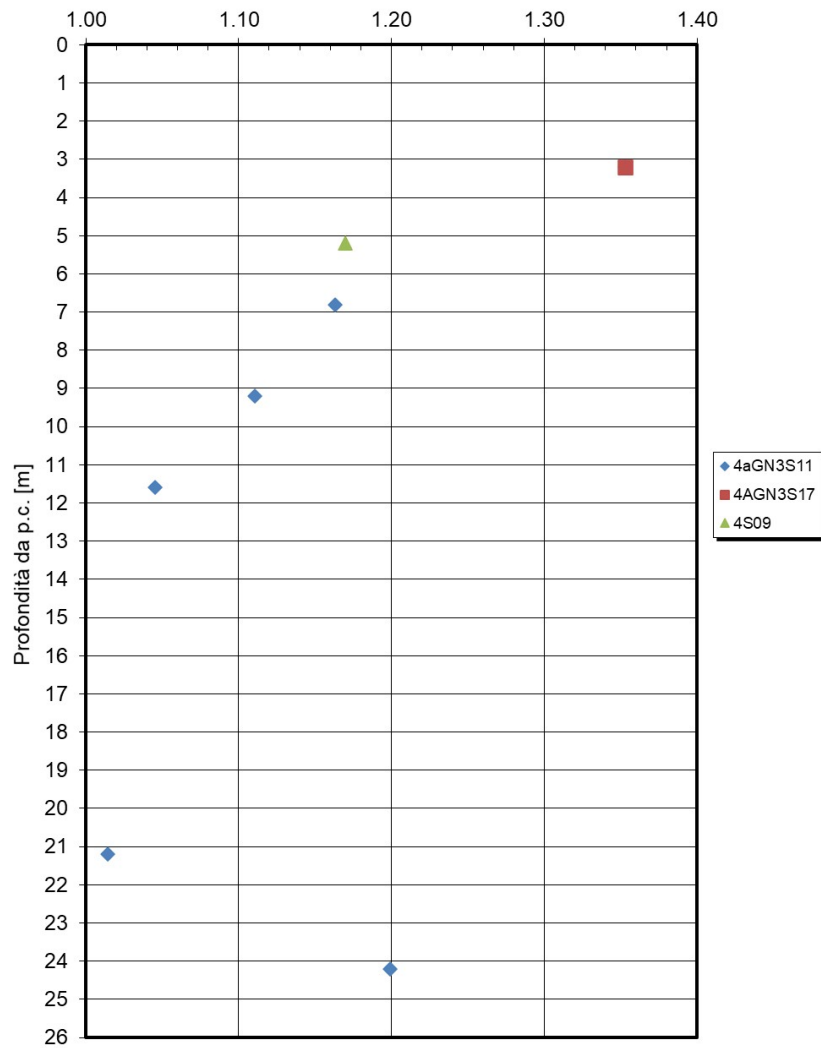


Figura 12: Galleria Trinacria - TRV – OCR da CU NSPT

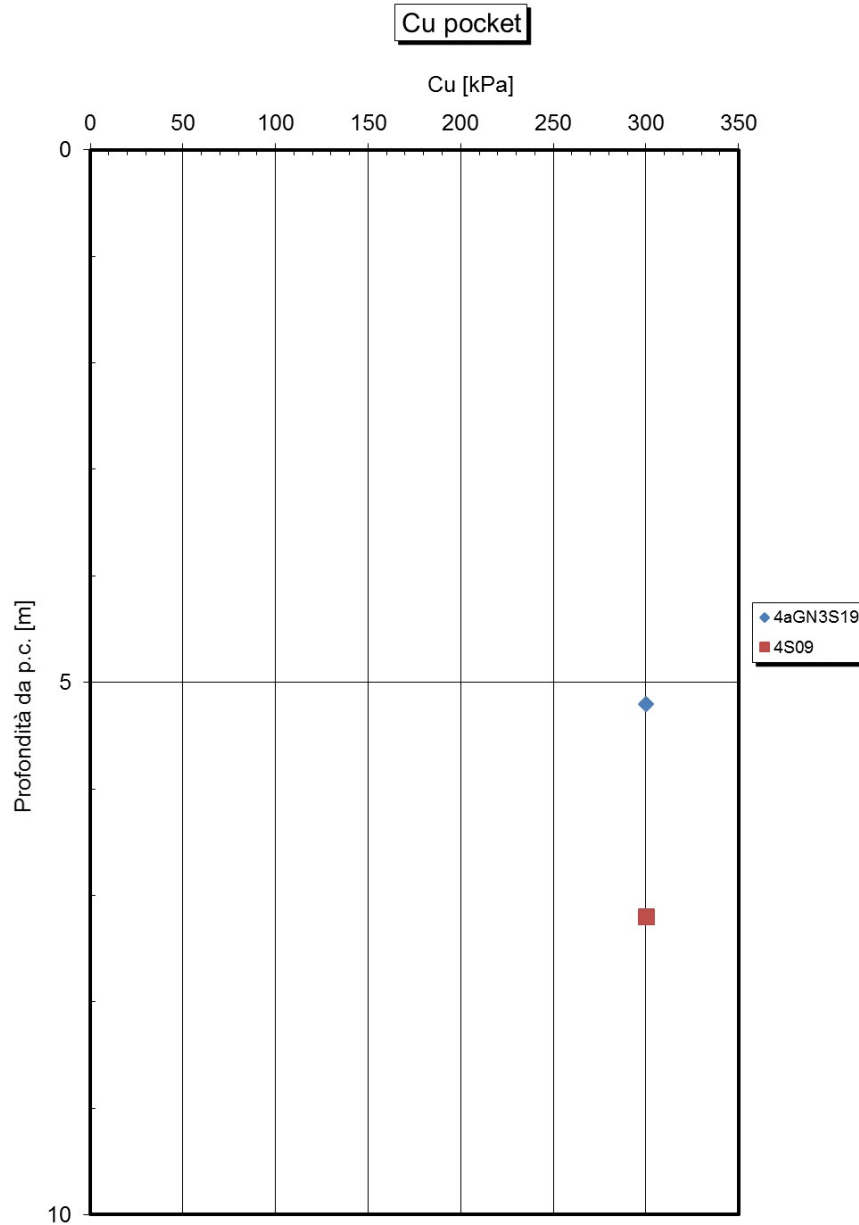


Figura 13: Galleria Trinacria - TRV – coesione non drenata da pocket

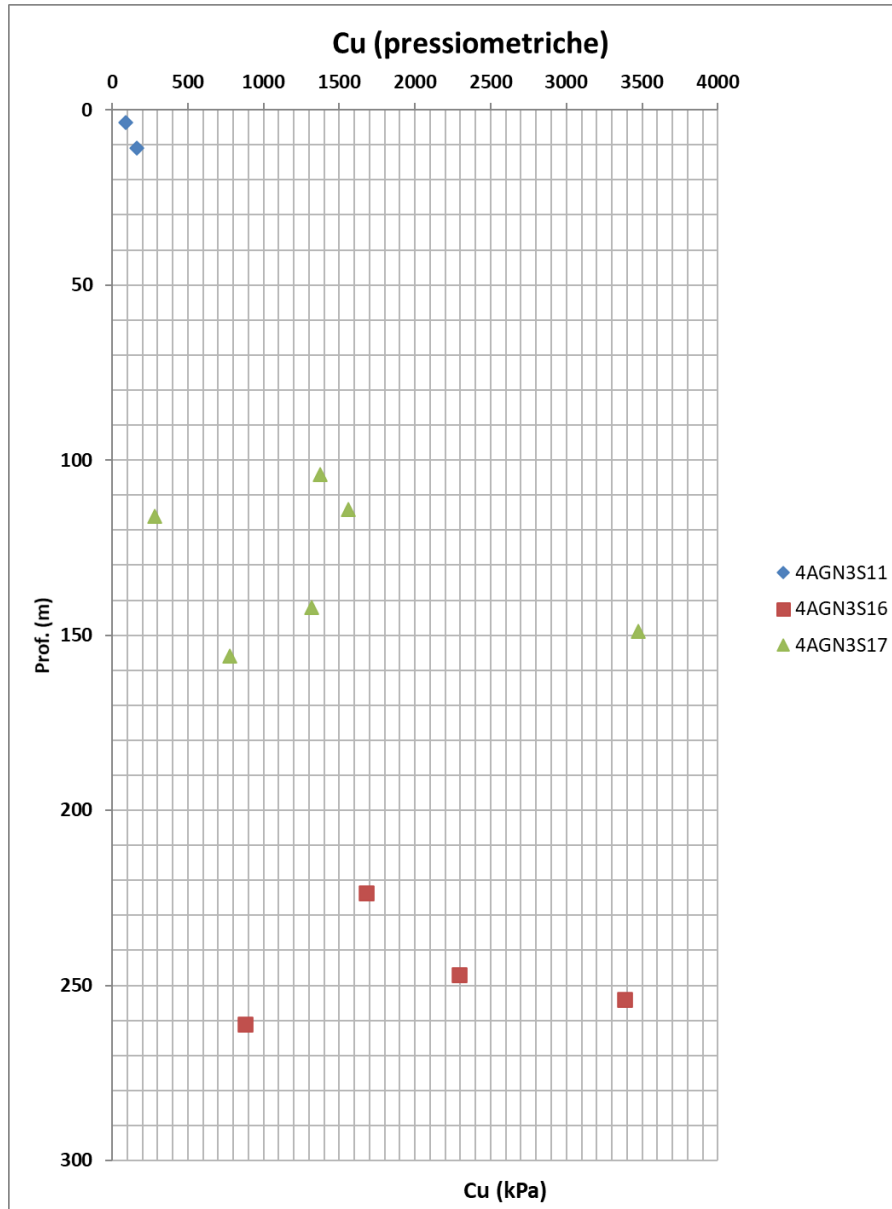


Figura 14: Galleria trinacria - TRV – coesione non drenata da pressiometriche


Per la determinazione dei valori sperimentali di C_u sono stati considerate prevalentemente le prove in situ, soprattutto ad elevate profondità, perché ritenute più affidabili e meno affette dal disturbo del campione che nella formazione in esame è risultato essere a volte particolarmente evidente. In questo caso una volta stimata la pressione limite efficace anche dalle prove dilatometriche si è pensato di sfruttare le note correlazioni di letteratura (Amar e Jezequel, 1972): $C_u = (p_l - p_o) / 5.5$ (KPa). Pertanto i valori di C_u hanno consentito di valutare la modifica delle caratteristiche di consistenza della formazione in esame anche ad elevate profondità e quindi avere indirettamente informazioni sulla modifica delle caratteristiche di rigidità ad essa correlata. Per i parametri di resistenza non drenati si evidenzia soprattutto se si analizzammo i dati dell'intero lotto una grande variabilità dei valori soprattutto nei primi 50m circa di profondità probabilmente connessa con strati sovraconsolidati e/o marnosi più consistenti. In profondità tale dispersione sembra essere meno evidente complice probabilmente anche il numero più esiguo di prove disponibili. Una valutazione teorica cautelativa dei range caratteristici e del relativo andamento è rappresentata nel grafico: per coperture maggiori di 50m si è assunto un profilo cautelativo linearmente crescente con la profondità pari a $C_u = 5.9z$ che interpola i dati disponibili e si avvicina ad un andamento tipico di un argilla NC.



Figura 15: Galleria trinacria - TRV – coesione non drenata lotto 4



Figura 16: Galleria Trinacria - TRV – coesione non drenata Da 0 – 50 m

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.3. Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio: resistenza drenata

Le tre prove triassiali consolidate non drenate condotte sul campione CI1 (12 m da p.c.) del sondaggio 4a-GN3-S11 e sui campioni CI2 e CI3 (11,4 e 56,3 m d p.c.) del sondaggio 4a-GN3-S13 restituiscono un involucro di resistenza nel piano degli invarianti t' ed s' con una buona correlazione con valori di coesione c' pari a 19 kPa e di resistenza al taglio ϕ' pari a 20° (Figura 17).

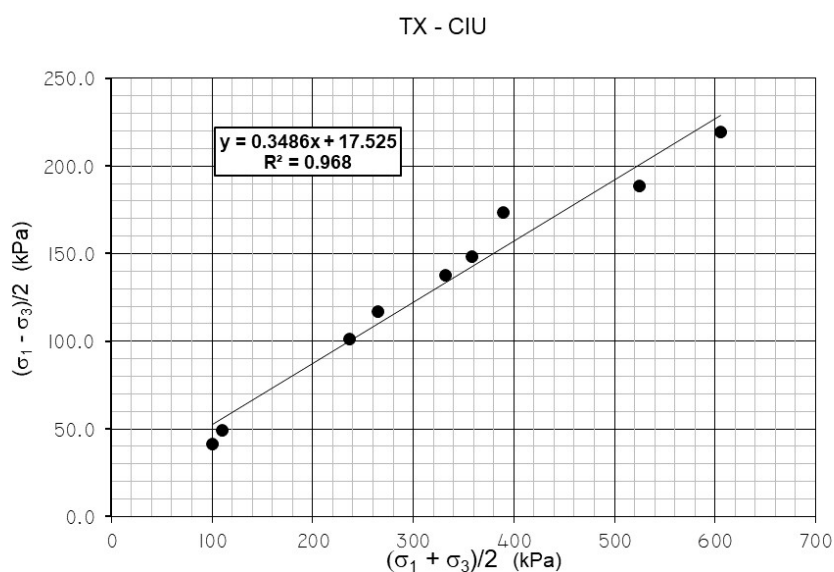


Figura 17: Galleria Trinacria – TRV - Involucro di resistenza delle prove triassiali

Le 9 prove di taglio diretto di picco eseguite sui campioni indisturbati dei sondaggi 4S8, 4S10, 4a-GN3-S13 e 4a-GN3-S17 evidenziano un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 18) con valori dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 36 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 19° . Le profondità di prelievo dei 9 campioni sono variabili tra 6 e 162,6 m da piano campagna.

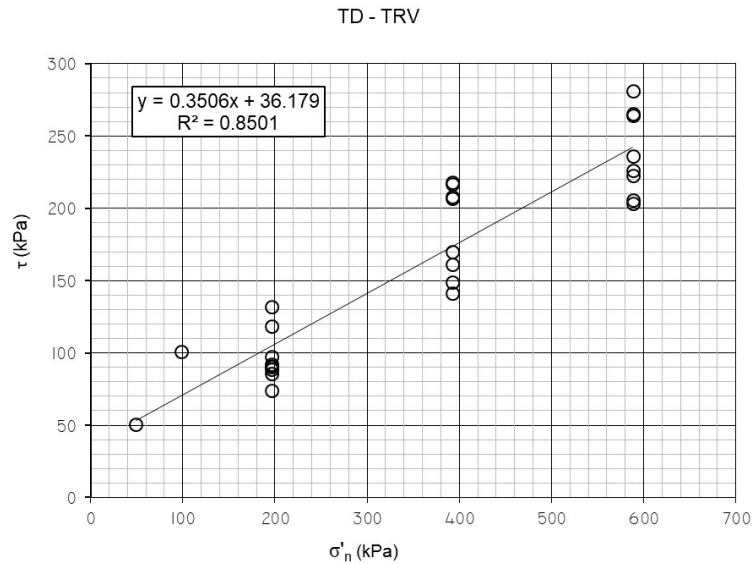


Figura 18: Galleria Trinacria – TRV – Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

Come si evince dalla Figura 18, risulta possibile definire un intervallo inferiore e superiore degli inviluppi di resistenza (Figura 19). Nello specifico l’inviluppo inferiore restituisce dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 22 kPa e angolo di resistenza al taglio φ' pari a 18° , mentre quello superiore coesione c' pari a 63 kPa e angolo di resistenza al taglio φ' pari a 21° .

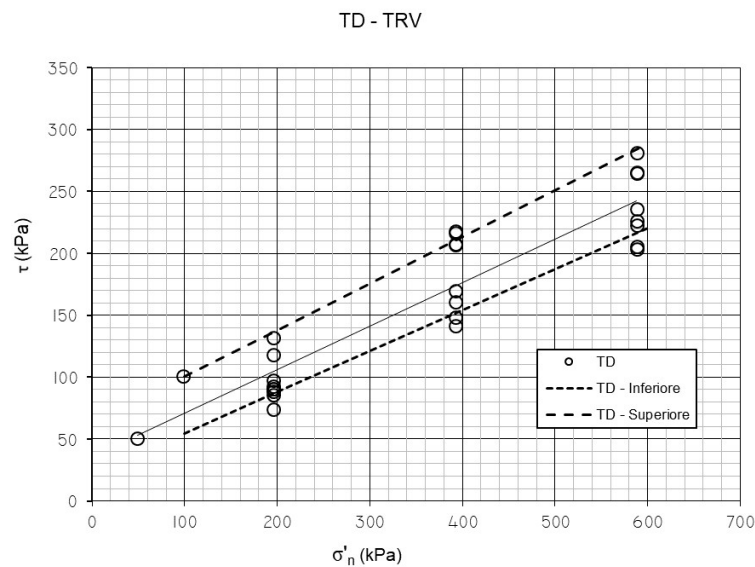


Figura 19: Galleria Trinacria – TRV - intervallo inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.4. Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio TRV Lotto 4

L'insieme delle prove rappresentate per le singole gallerie sono state elaborate in maniera complessiva così da definire un unico involucro di resistenza per la formazione TRV per il Lotto 4, per profondità fino a 50 m da piano campagna.

L'insieme delle prove di taglio diretto, per un totale di 39 prove, condotte sui campioni afferenti alla formazione TRV per il Lotto 4 evidenziano un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 20) con valori dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 35 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 22°. Le profondità di prelievo dei 39 campioni sono variabili tra 3,4 e 162,6 m da piano campagna.

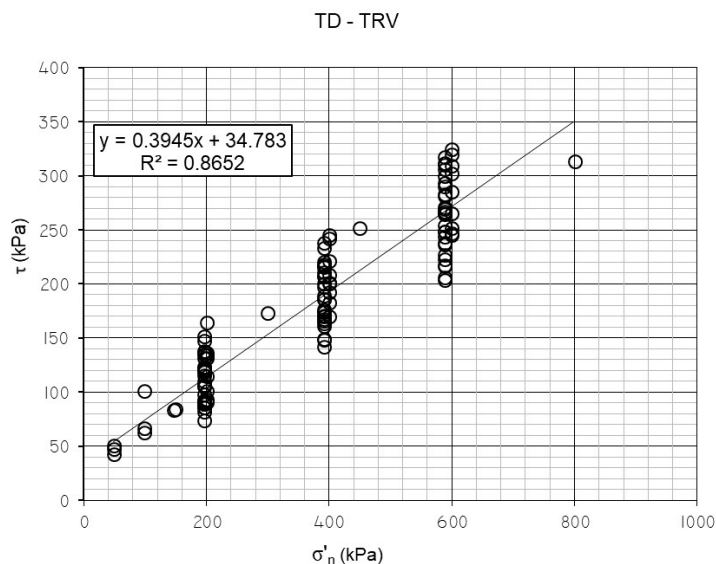


Figura 20: Lotto 4 – TRV - involucro di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

Come si evince dalla Figura 20, risulta possibile definire un intervallo inferiore e superiore degli involucchi di resistenza (Figura 21). Nello specifico l'involucro inferiore restituisce dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 25 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 18°, mentre quello superiore coesione c' pari a 55 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 24°.

TD - TRV

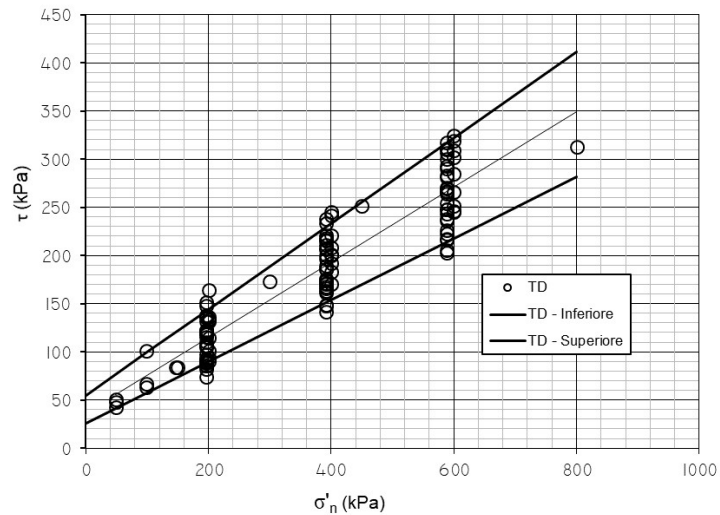


Figura 21: Lotto 4 – TRV - intervallo involucro di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

L'insieme delle 17 prove triassiali consolidate non drenate, condotte sui campioni afferenti alla formazione TRV per il Lotto 4 evidenziano un involucro di resistenza nel piano degli invarianti t' ed s' con una buona correlazione con valori dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 17 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 22° . Le profondità di prelievo dei 13 campioni sono variabili tra 3,5 e 76,3 m da piano campagna.

TX - TRV

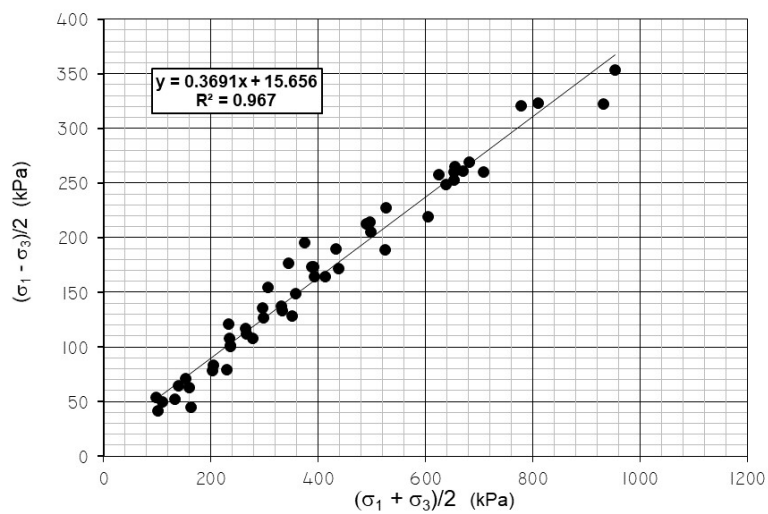


Figura 22: Lotto 4 – TRV - involucro di resistenza prove triassiali (TX-CIU)

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.5. Caratterizzazione TRV ad alte coperture

La caratterizzazione di tale formazione per coperture maggiori di 50 m (le coperture raggiungono anche i 600 m di profondità) si basa su un modello geotecnico che parte da alcune assunzioni di comportamento. A profondità molto elevate il numero e la rappresentatività delle prove è risultato un aspetto critico: gli stati tensionali di prova infatti per quanto spinti al massimo delle potenzialità delle attrezzature di laboratorio non sono risultati in linea con quelli litostatici. Anche il prelievo dei campioni ad elevate profondità ha mostrato delle criticità con un rischio di non rappresentatività dello stato indisturbato del campione e delle conseguenti prove di laboratorio. La consistenza della formazione ad elevate profondità (fino a 250 m), rilevata sia tramite ispezione visiva delle carote sia in base ai risultati delle prove a rottura dei campioni, non è risultata assimilabile a quella di una roccia.

Per la determinazione dei parametri di resistenza drenati è stato necessario ricorrere ad involuppi teorici, presenti nella letteratura tecnico-scientifica, per ricavare i parametri di resistenza a stati tensionali paragonabili a quelli litostatici. Gli involuppi sono stati tarati sui risultati delle prove di laboratorio disponibili eseguite a stati tensionali massimi raggiunti in laboratorio.

Poiché, come evidenziato in precedenza, per profondità elevate, le prove di laboratorio eseguite non risultano rappresentative dei relativi stati tensionali, per i parametri di resistenza drenati è stato fatto ricorso ad un involuppo curvilineo tarato sui dati sperimentali disponibili (cfr. relazione Geotecnica generale), dal quale è possibile ricavare i valori dei parametri di resistenza al variare dello stato tensionale.

Si riporta di seguito l'involuppo curvilineo, nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 23), tarato sull'insieme delle prove di taglio e delle prove triassiali eseguite per la formazione TRV del Lotto 4:

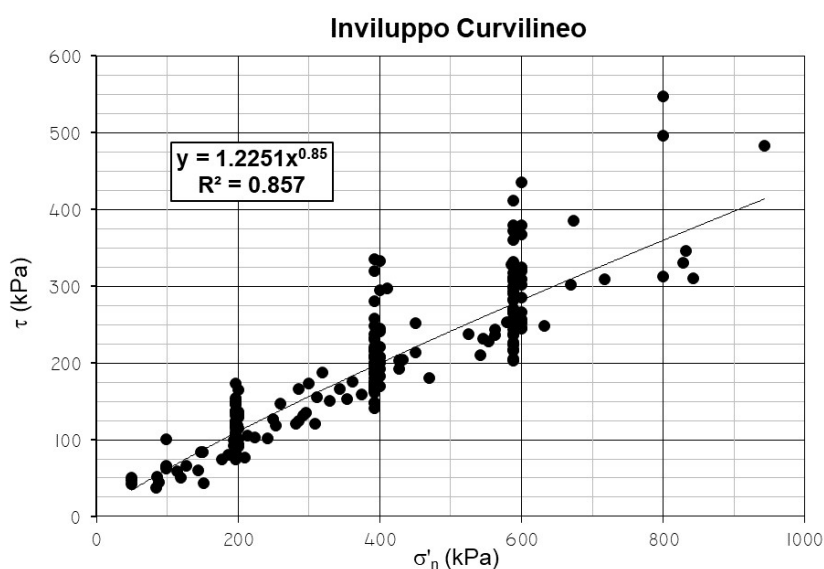


Figura 23: Lotto 4 – TRV ad alte coperture – involuppo curvilineo

8.3.1.6. Caratteristiche meccaniche: deformabilità

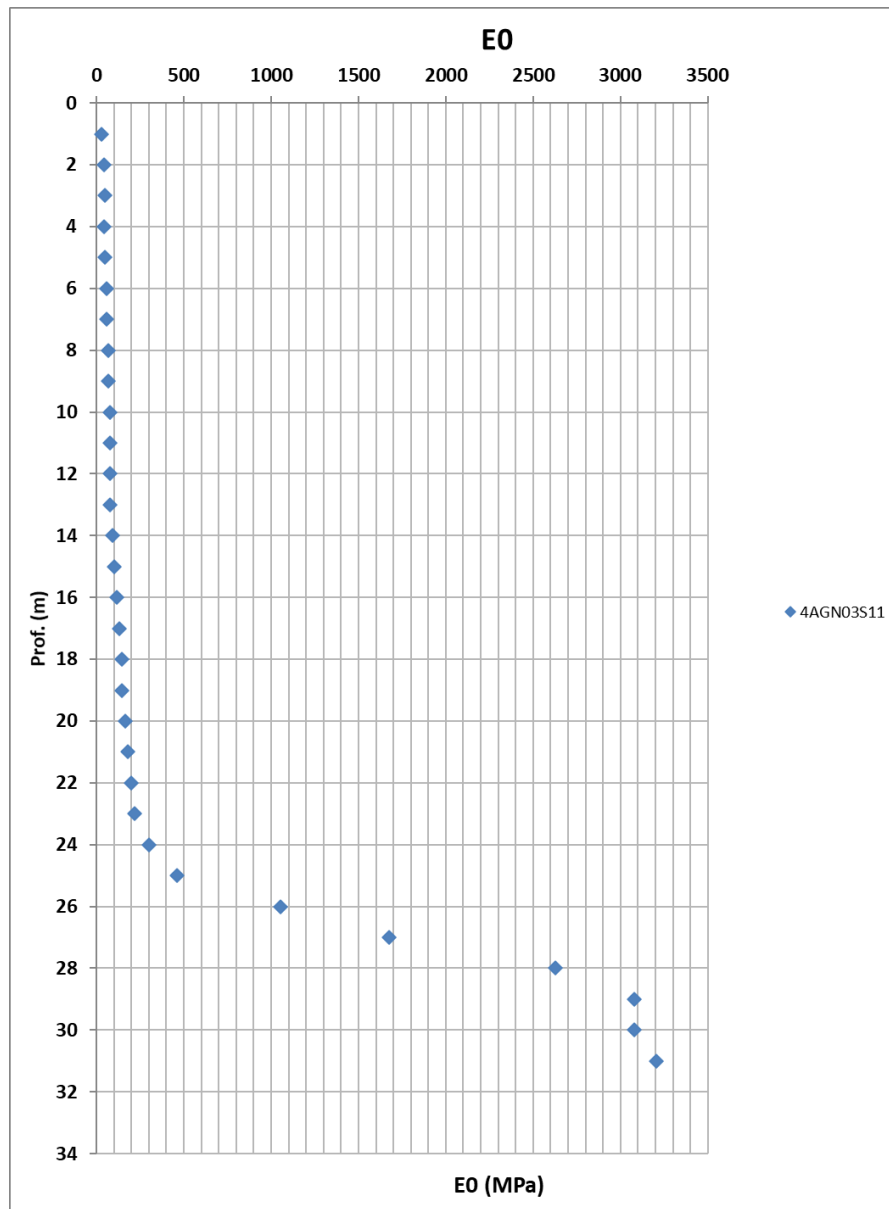


Figura 24: Galleria Trinacria - TRV – modulo di Young da sismiche

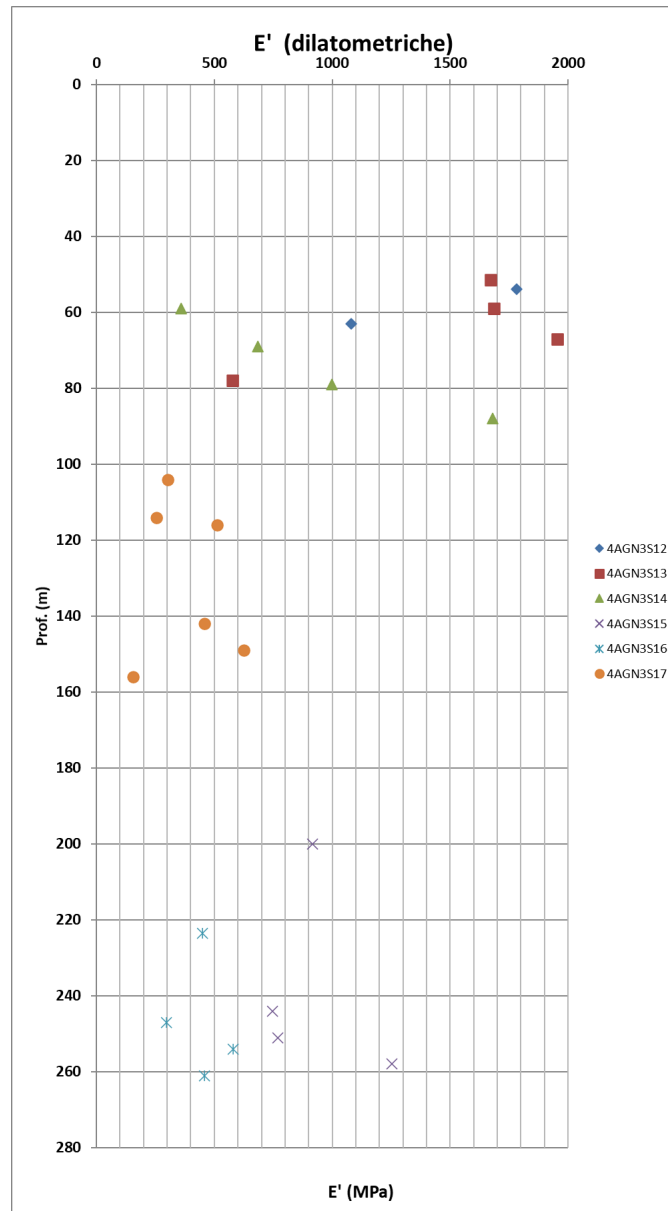


Figura 25: Galleria Trinacria - TRV – modulo di Young da dilatometriche

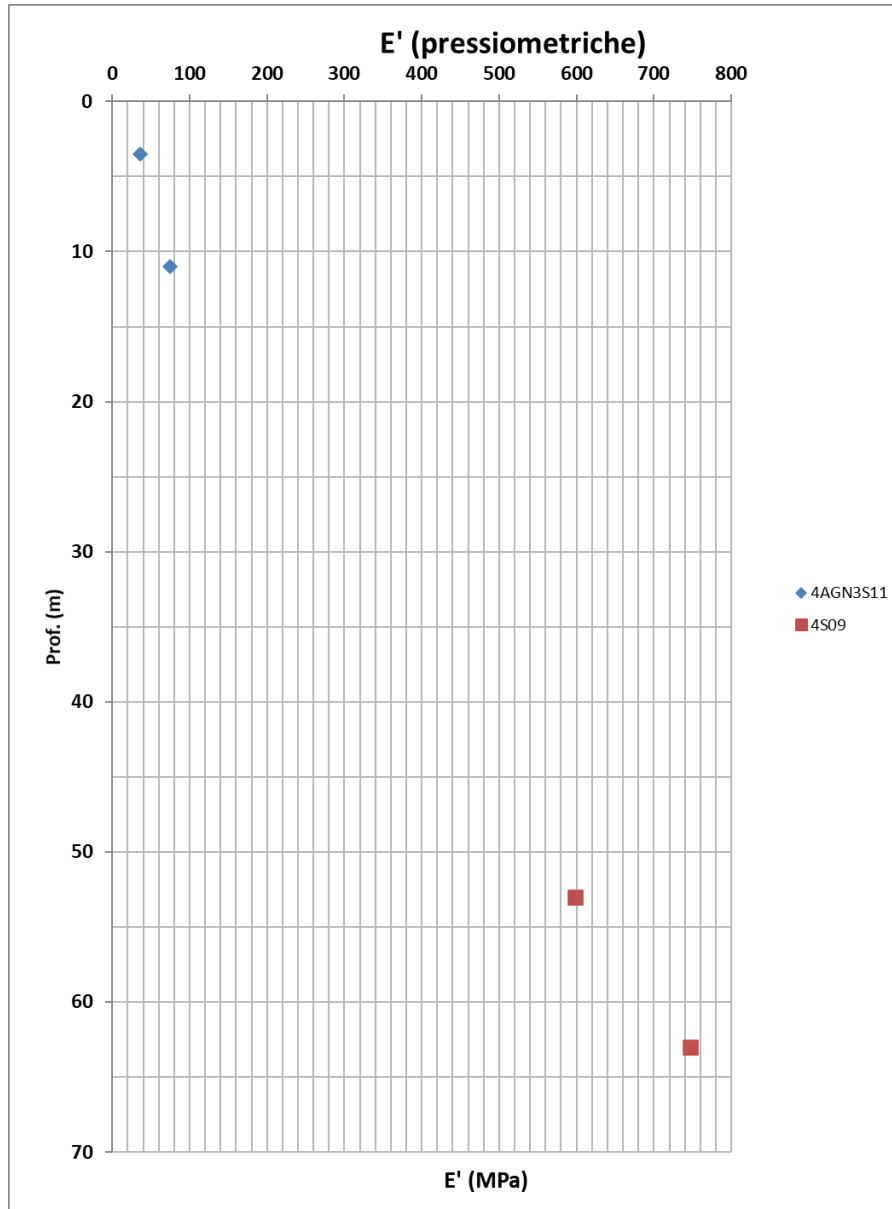
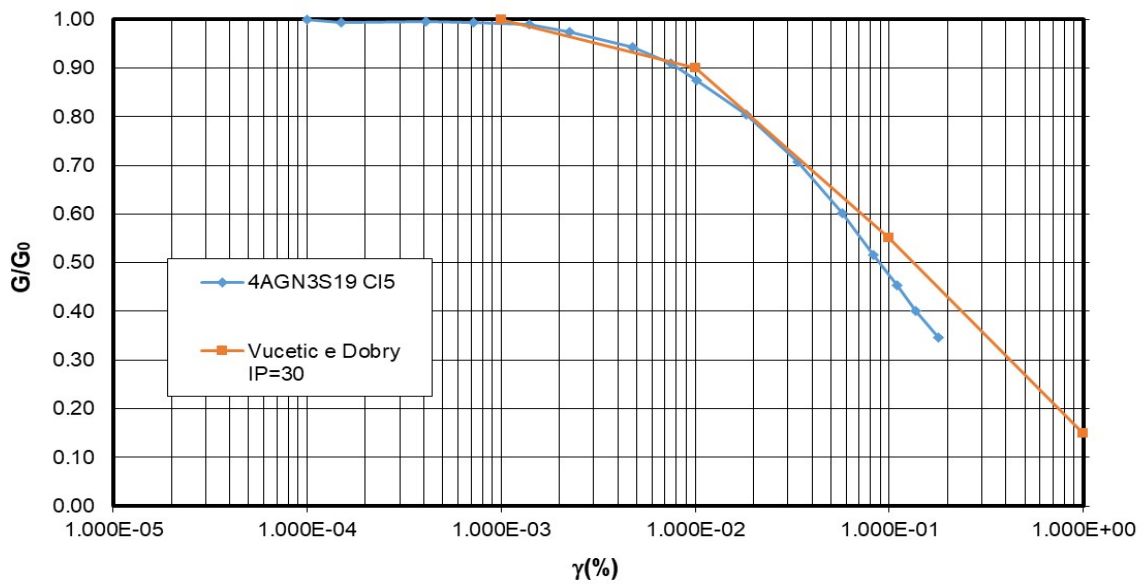


Figura 26: Galleria Trinacria - TRV – modulo di Young da pressiometriche

Si riportano di seguito le prove in colonna risonante effettuate in corrispondenza o in prossimità della tratta in esame; si riportano anche le curve teoriche che meglio approssimano l'andamento.



| 4AGN3S19 PROVINO CI5 | | | | |
|----------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| G [MPa] | G/Gmax | γ (%) | D (%) | D/D0 |
| 201.83 | 1.000 | 0.0001 | 2.17 | 1 |
| 200.36 | 0.993 | 0.00015 | 2.62 | 1.207373 |
| 200.89 | 0.995 | 0.00041 | 3.19 | 1.470046 |
| 200.46 | 0.993 | 0.00072 | 3.23 | 1.488479 |
| 199.73 | 0.990 | 0.0014 | 3.23 | 1.488479 |
| 196.66 | 0.974 | 0.00224 | 3.29 | 1.516129 |
| 190.43 | 0.944 | 0.00478 | 3.38 | 1.557604 |
| 183.73 | 0.910 | 0.00752 | 3.54 | 1.631336 |
| 176.72 | 0.876 | 0.01024 | 3.71 | 1.709677 |
| 162.47 | 0.805 | 0.01835 | 3.93 | 1.81106 |
| 142.57 | 0.706 | 0.0338 | 4.39 | 2.023041 |
| 121.39 | 0.601 | 0.0573 | 5.14 | 2.368664 |
| 104.05 | 0.516 | 0.083 | 6.12 | 2.820276 |
| 91.41 | 0.453 | 0.11 | 6.97 | 3.211982 |
| 80.85 | 0.401 | 0.137 | 7.96 | 3.668203 |
| 69.96 | 0.347 | 0.18 | 9.14 | 4.211982 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 43 di 201 |

| SONDAGGIO | PROFONDITA' | LITOLOGIA | ν | G ($\gamma=0.1$) | E (MPa) |
|------------|-------------|-----------|-------|--------------------|---------|
| 4A_GN3_S19 | 25.00-25.50 | TRV | 0.5 | 92 | 276 |

Il valore di G_0 alla profondità indagata fornisce valori più bassi di quelli sismici, comunque il grafico normalizzato fornisce per un fattore riduttivo pari a 0.2 un valore delle deformazioni compatibile con quanto ci si attende in base alle previsioni numeriche degli scavi della galleria.

Anche i moduli elastici (il modulo elastico statico derivato dal modulo sismico è stato assunto pari a 0.2 E_0 anche alla luce delle prove in colonna risonante) confermano che nei primi 50m di profondità il materiale appare più consistente che per le profondità immediatamente sottostanti per cui anche per la deformabilità si è assunta una legge di variabilità lineare con la profondità a partire dai 50m, $E'=3z$, assolutamente congruente con l'ipotesi effettuata per la coseione non drenata C_u e precedentemente descritta.

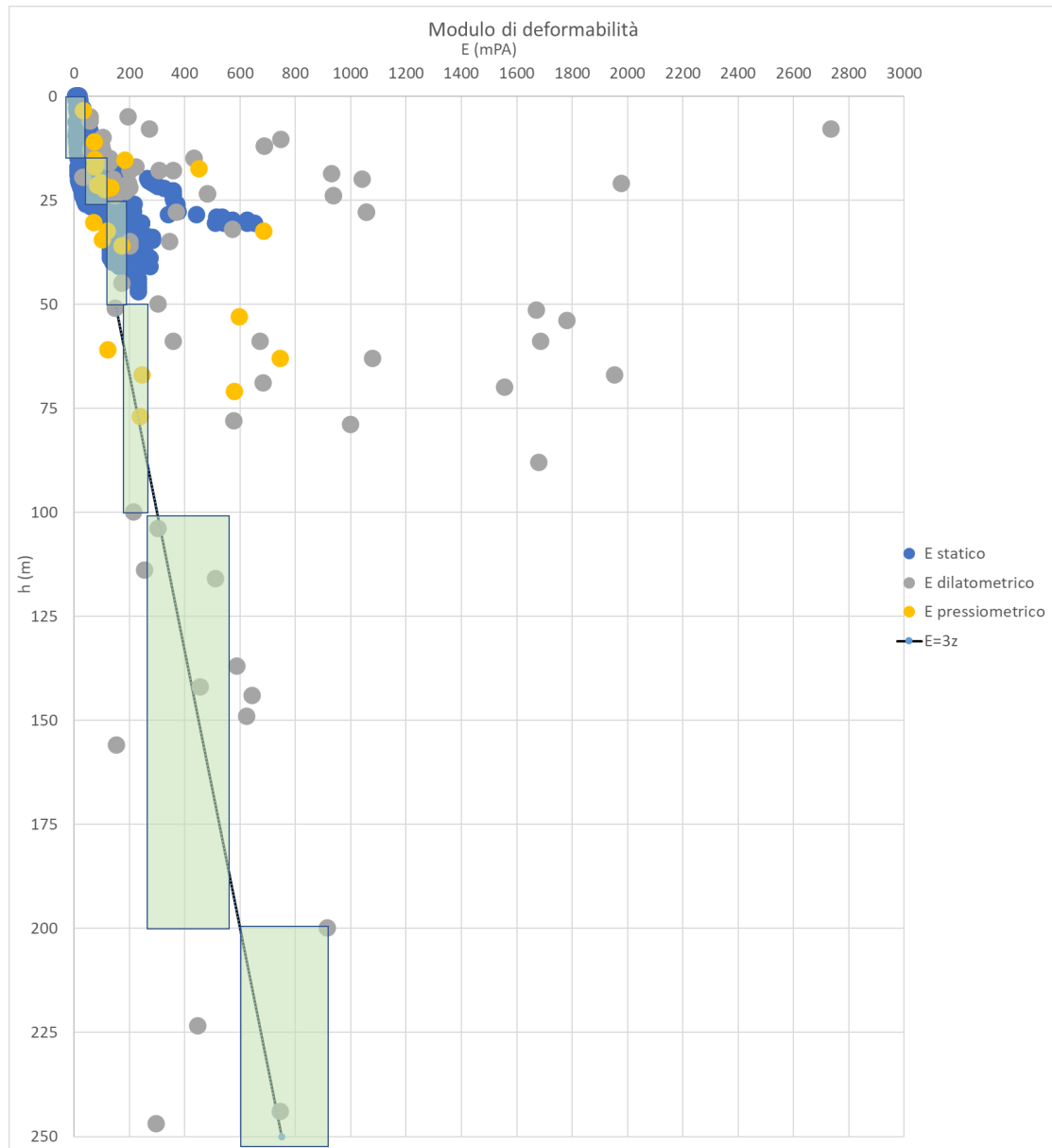


Figura 27: Galleria Trinacria - TRV – modulo di Young lotto 4

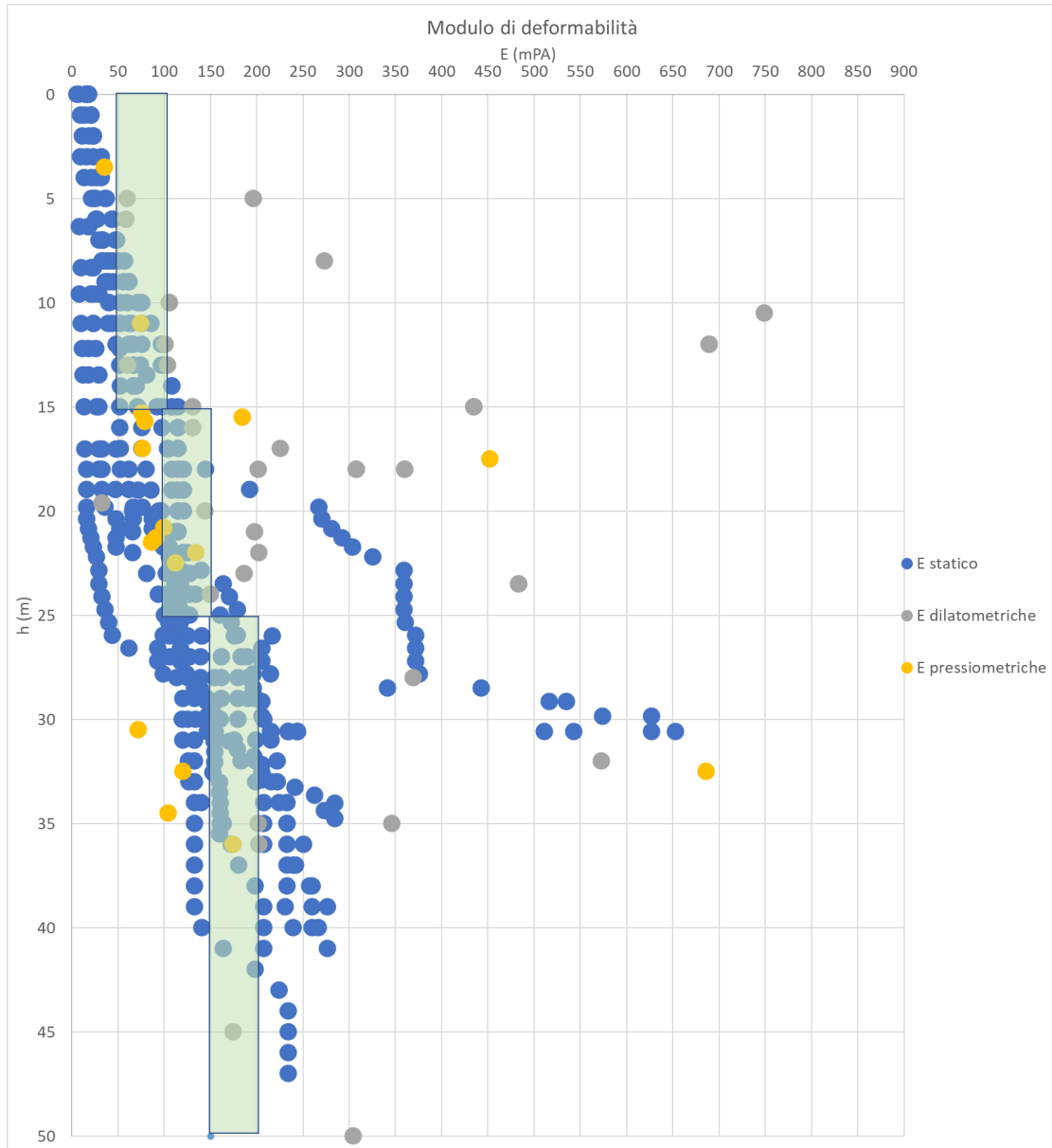


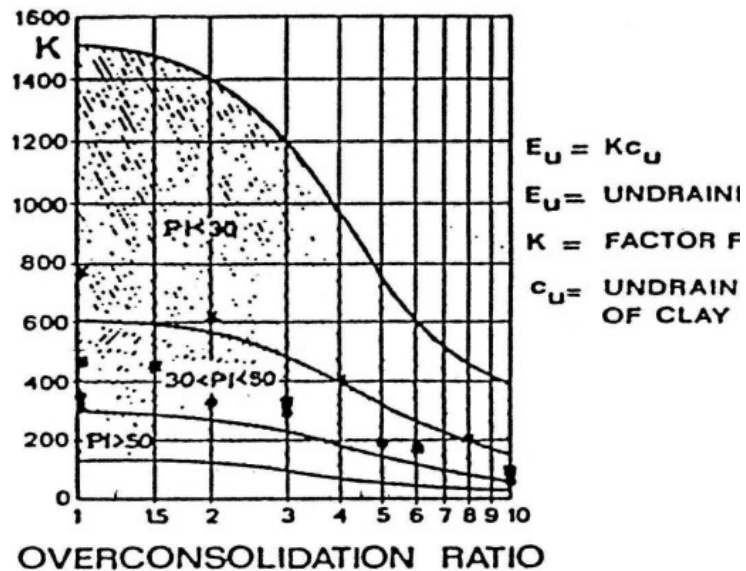
Figura 28: Galleria Trinacria - TRV – modulo di Young lotto 4 da 0-50m

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 46 di 201 |

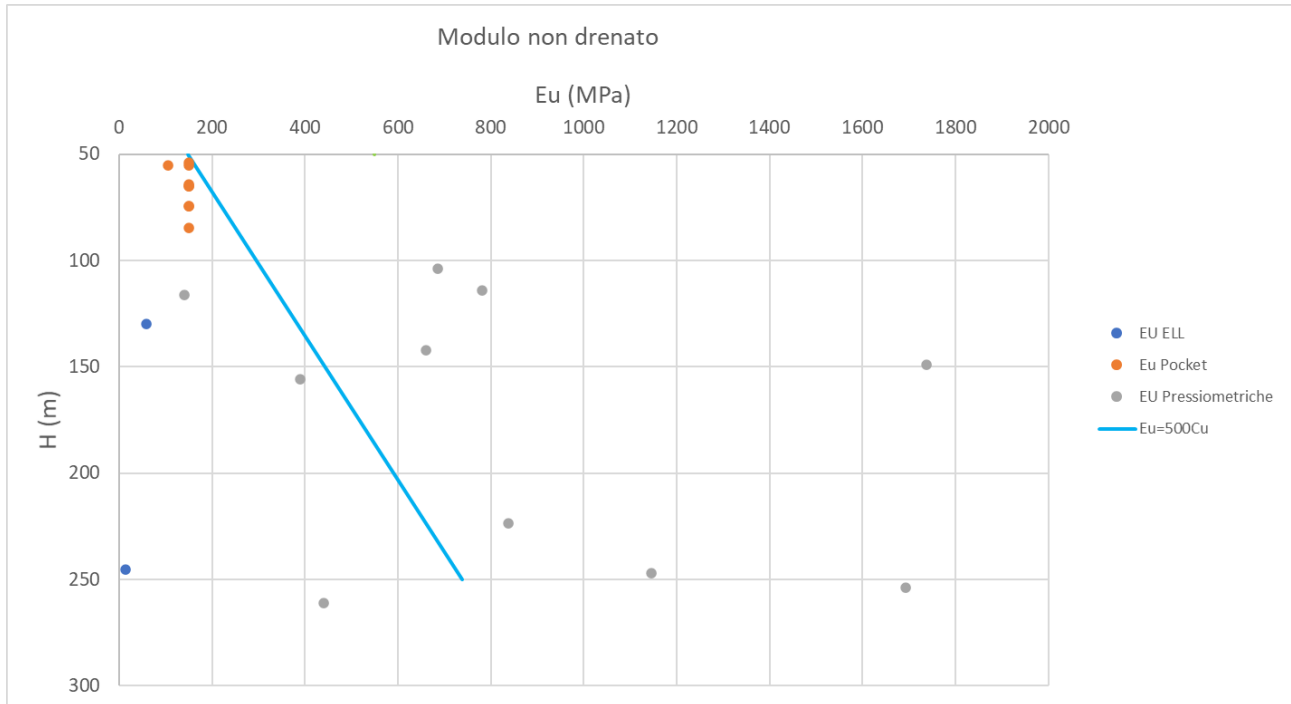
Infatti, ricavando il modulo non drenato dal valore di C_u secondo la correlazione sotto riportata ed assumendo $E_u=500C_u$, si ottengono dei valori dei moduli non drenati assolutamente congruenti con quelli drenati, come di seguito rappresentato.

lutato anche attraverso le correlazioni di *Jamiolkowski*



Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 47 di 201 |



8.3.1.7. Caratteristiche di permeabilità

Coefficiente di permeabilità da Le Franc

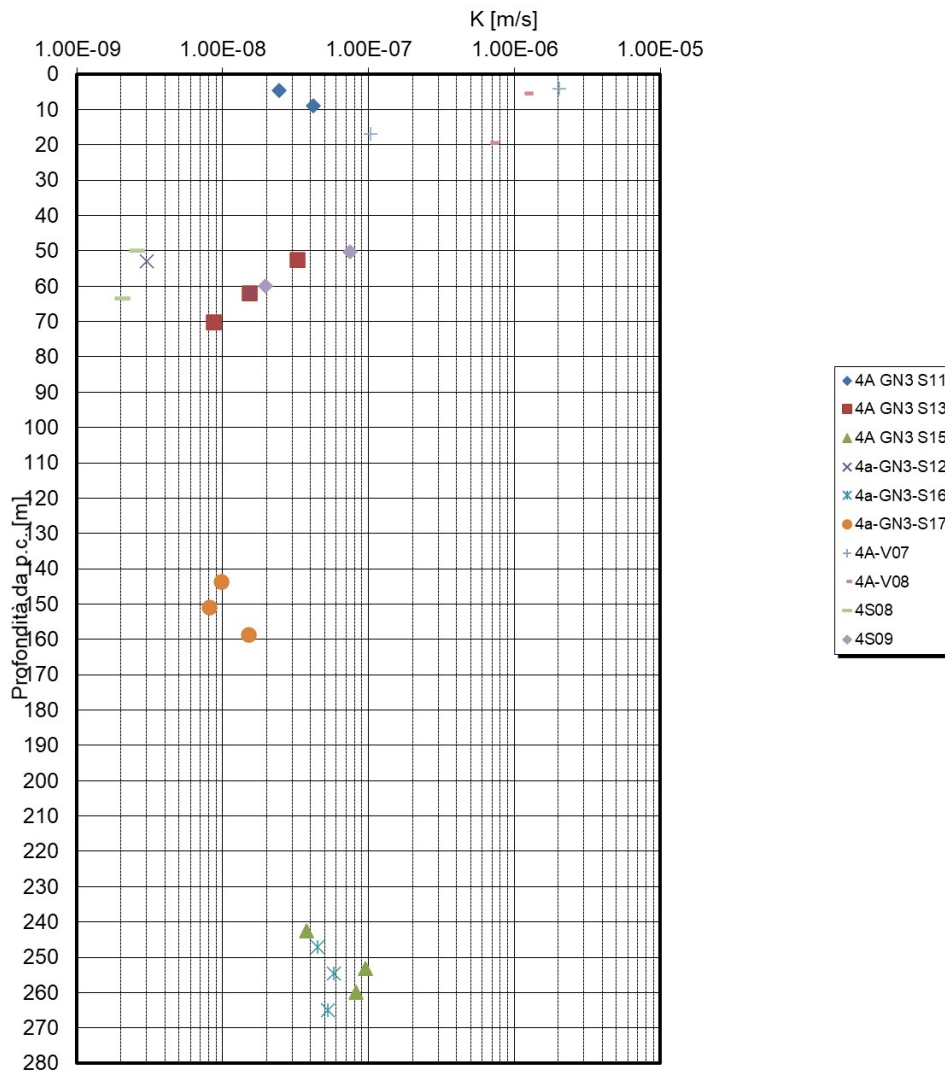


Figura 29: Galleria Trinacria – TRV – permeabilità da prove in sito

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.8. Parametri geotecnici

Tabella 2 – Parametri derivati dalla caratterizzazione geotecnica – Galleria Trinacria - TRV

| COPERTURA | FORMAZIONE | γ | GSI | mi | σ_m | ν | E' | c' | C_u | ϕ' |
|-----------|------------|----------------------|-----|----|------------|-------|-----------|---------|-----------|---------|
| | | [kN/m ³] | | | [MPa] | | [GPa] | [kPa] | | [kPa] |
| -- | | 21 | - | - | - | 0.3 | 0.05-0.10 | 25-55 | 225 | 18-24 |
| 0-15 | TRV | 21 | - | - | - | 0.3 | 0.10-0.15 | 25-55 | 225 | 18-24 |
| 15-25 | TRV | 21 | - | - | - | 0.3 | 0.15-0.2 | 25-55 | 500 | 18-24 |
| 25-50 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | 0.2-0.3 | 43-108 | 594 | 19-22 |
| 50-100 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | 0.3-0.6 | 78-196 | 594-1188 | 17-20 |
| 100-200 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | 0.6-0.9 | 145-265 | 1188-1782 | 16-18 |
| 200-300 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | 0.9-1.2 | 238-337 | 1782-2970 | 15-16 |
| 300-400 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | 1.2-1.5 | 330-419 | 2970-3564 | 15-16 |
| 400-500 | TRV | 22 | - | - | - | 0.3 | | | | |

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 GSI = geological strength index
 mi = costante del materiale
 σ_m = resistenza a compressione monoassiale
 c'_k = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso
 ϕ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso
 $c_{u,k}$ = valore caratteristico della coesione non drenata

Per i parametri di resistenza per profondità maggiori di 50 m da p.c., si è fatto riferimento all'inviluppo curvilineo riportato nel capitolo 8.3.1.5, che fornisce il valore di resistenza a taglio in funzione dello stato tensionale efficace in sito.

8.5 Formazione TRVa

Di seguito si riportano i grafici e le tabelle contenenti i parametri per le singole gallerie in esame per la formazione del TRVa.

8.3.1.9. Caratteristiche fisiche (trva argilloso)

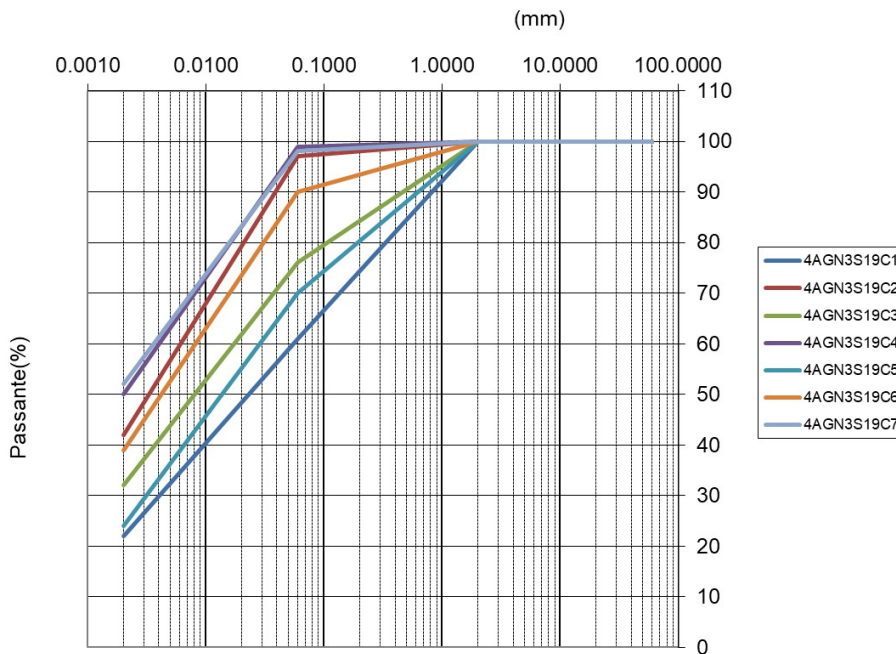


Figura 30: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRVa- curve di distribuzione granulometrica

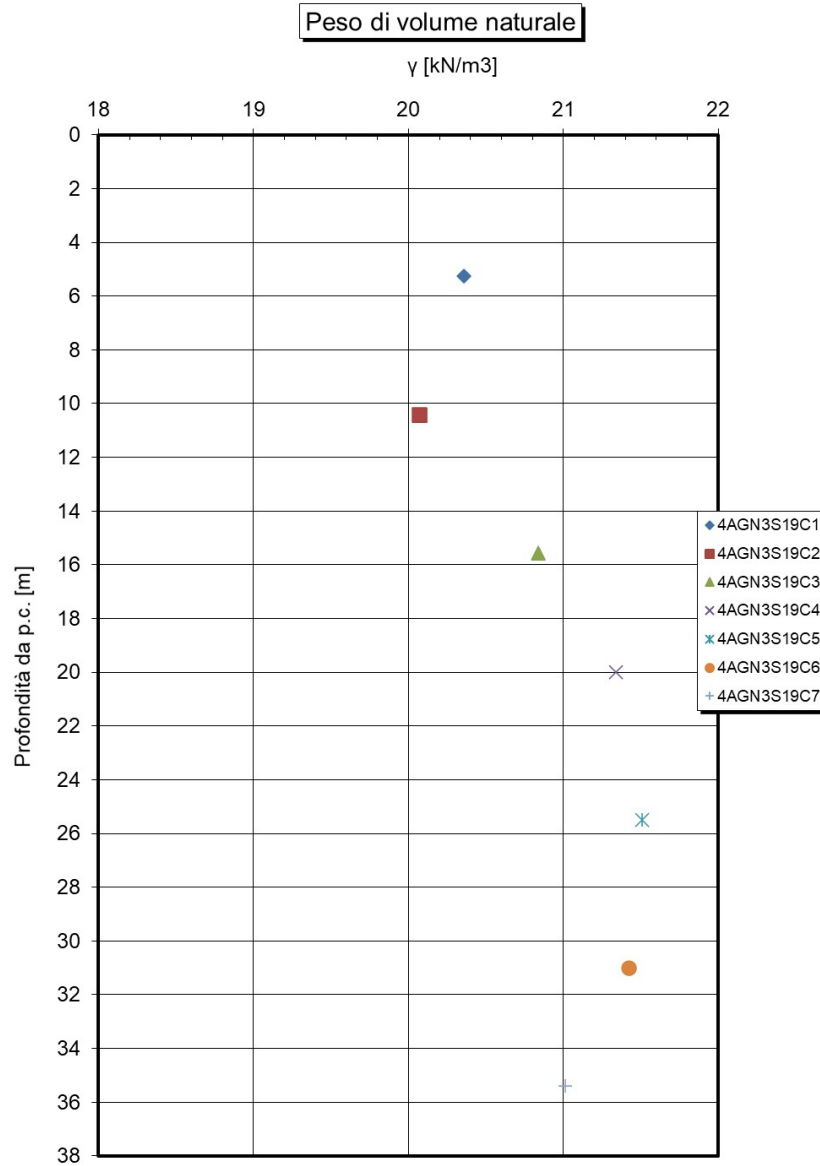


Figura 31: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRVa - peso dell'unità di volume

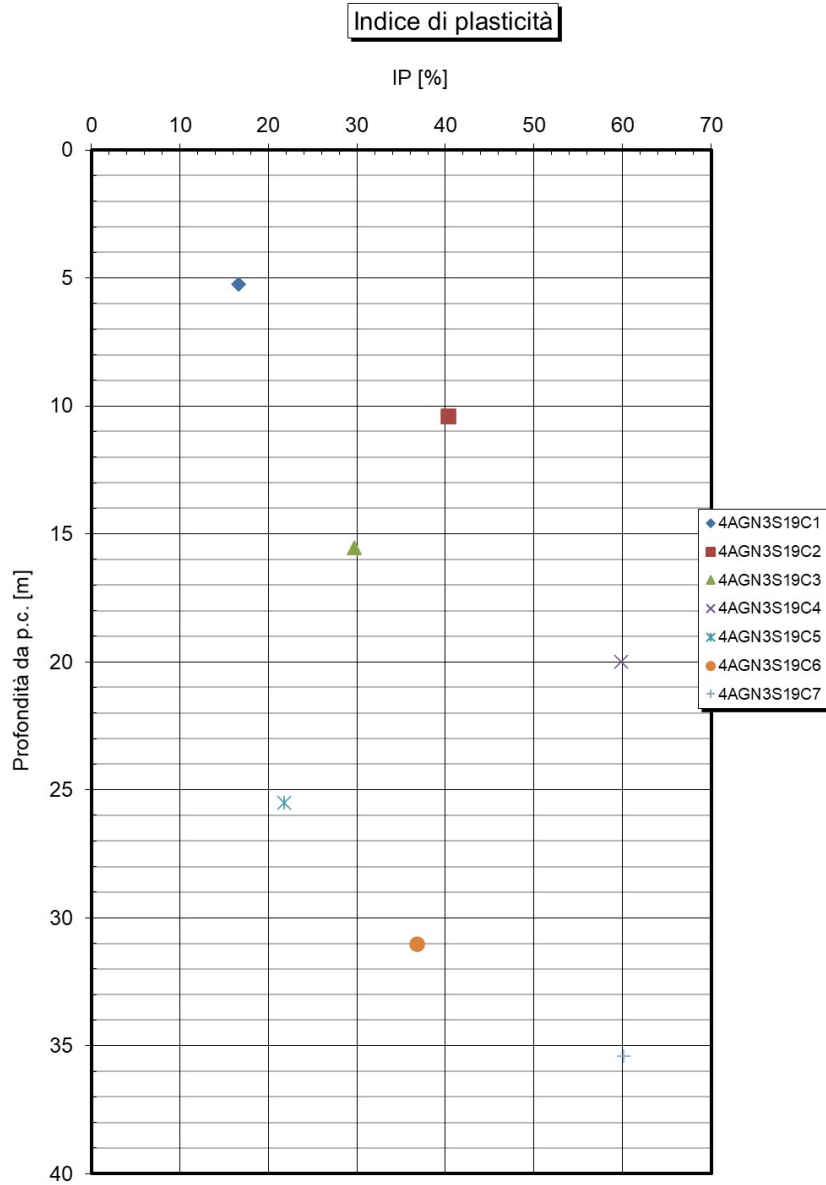


Figura 32: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRVa – Indice di plasticità

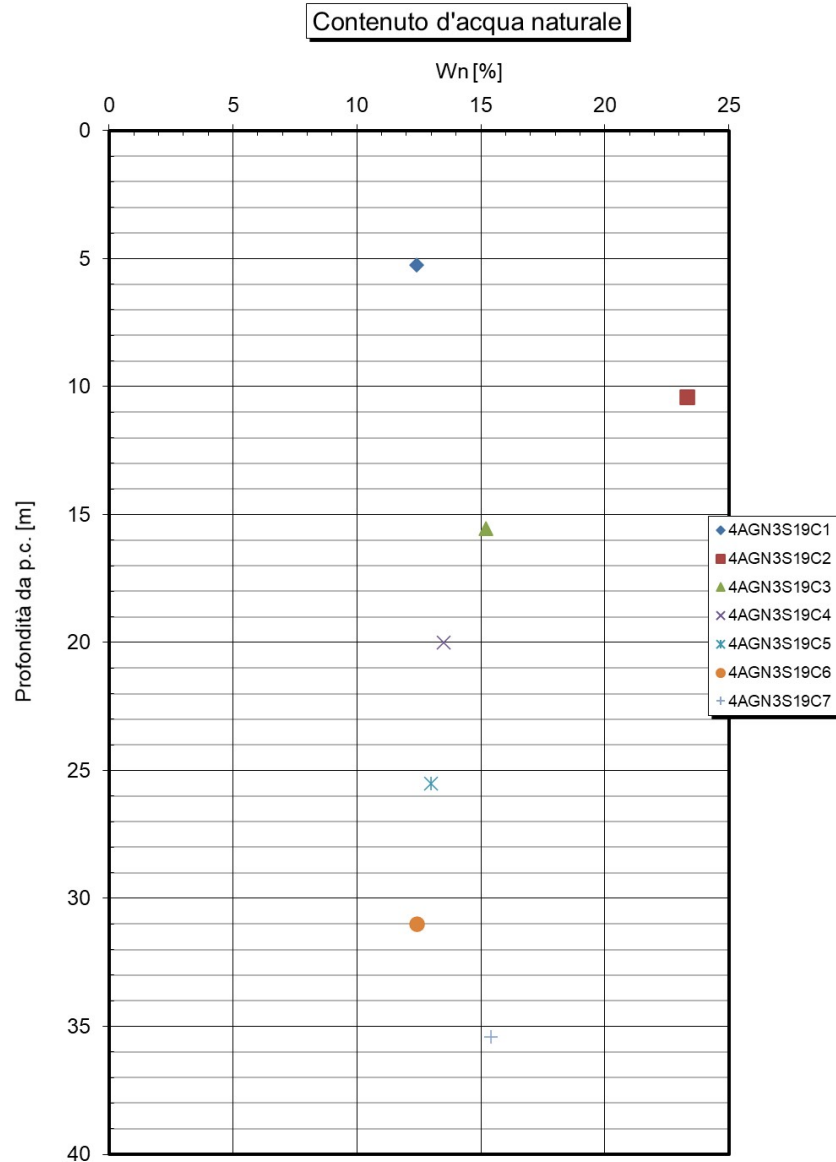


Figura 33: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRVa – contenuto di acqua naturale

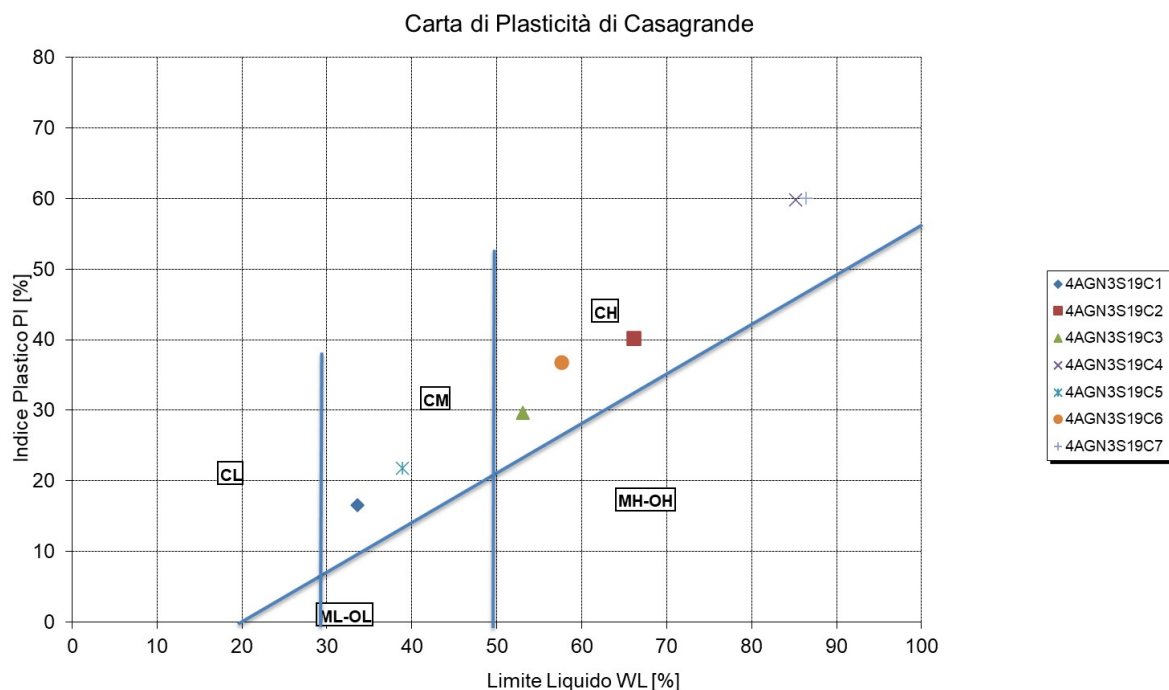


Figura 34: Galleria Trinacria - Parametri generali - TRVa – Carta di plasticità di Casagrande

8.3.1.10. Caratteristiche fisiche (trva sabbioso)

Per quanto concerne i parametri fisici, in base alle prove del laboratorio effettuate su provini disturbati e/o rimaneggiati si sono potute ottenere delle informazioni sui fusi granulometrici caratteristici (fuso medio e range di variabilità suffragato da considerazioni di tipo probabilistico) e sulle principali caratteristiche granulometriche medie (D_{10} , D_{60} , D_{50}), valori del peso di volume dei granuli ρ_s . Per i fusi granulometrici si sono fatte considerazioni statistiche vista l'esiguità dei dati disponibili evidenziando il fuso medio ed i fusi "estremi" statisticamente rappresentativi (distribuzione di t-Student) e le percentuali medie delle componenti granulometriche, nonché, laddove numericamente significativo, la distribuzione delle percentuali con la profondità.

Una volta noto il valore di D_r , il valore dell'indice dei vuoti in sito e del peso di volume del secco possono essere determinati anche dalla relazione:

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 55 di 201 |

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_o}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}}$$

una volta noti i valori di e_{\max} , e_{\min} , $g_{d\max}$ e $g_{d\min}$. Essi possono essere determinati in laboratorio.

In questa sede, in mancanza del valore e_{\min} , noto o stimato il valore e_{\max} (Youd (1973)) è stato possibile determinare e_o una volta noto il valore di D_r e quello della differenza $e_{\max} - e_{\min}$ attraverso le relazioni di Cubrinowski & Ishihara (1999):

$$(e_{\max} - e_{\min}) = 0.23 + 0.06 / D_{50}$$

con D_{50} in mm

Si riportano al proposito anche le relazioni di Youd (1973):

$$e_{\max} = 0.554 + 0.154 R^{-1}$$

$$e_{\min} = 0.359 + 0.082 R^{-1}$$

essendo R definito come “rotondità” delle particelle e stimabile mediamente pari a 0.5.

Per la determinazione di g_d , in mancanza di determinazioni di laboratorio per $g_{d\max}$ e $g_{d\min}$ si può fare riferimento a dati di letteratura per i siti in esame (Jamiolkowski and Lo Presti, 2003).

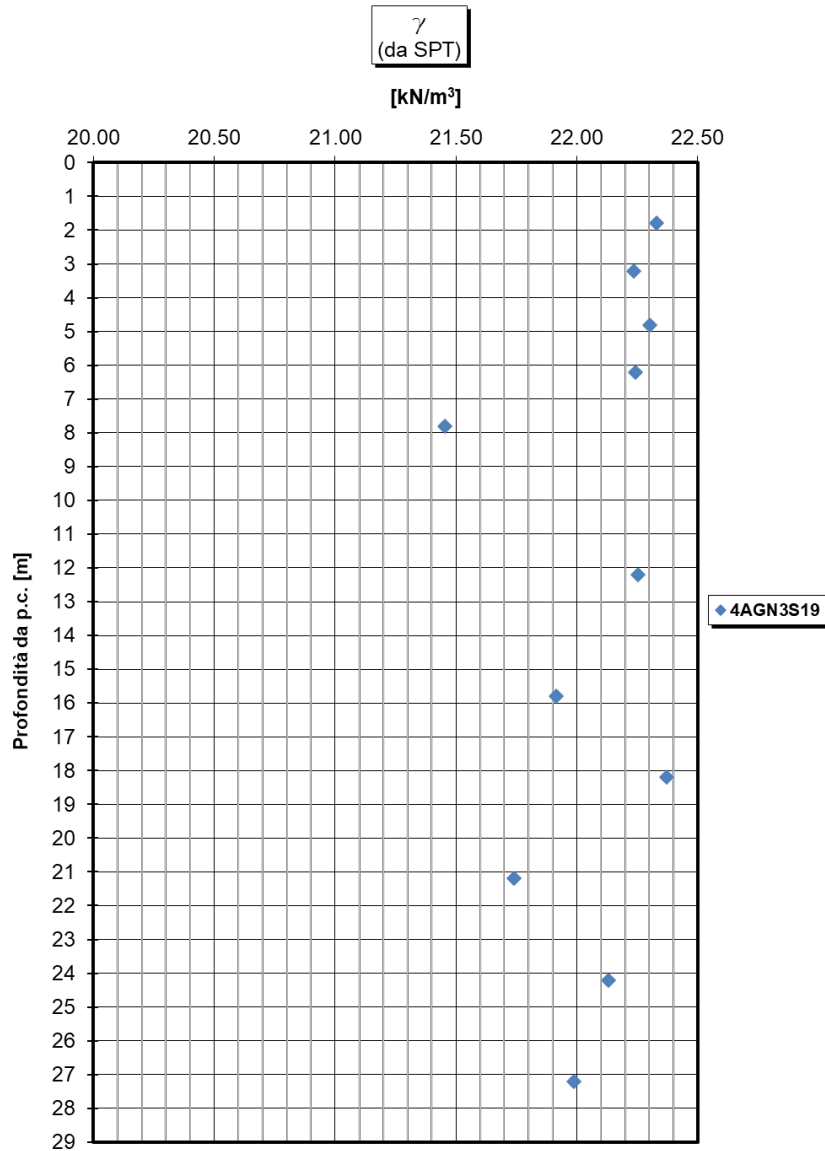


Figura 35: Galleria Trinacria – TRVa Sabbioso- peso dell'unità di volume da prove

SPT

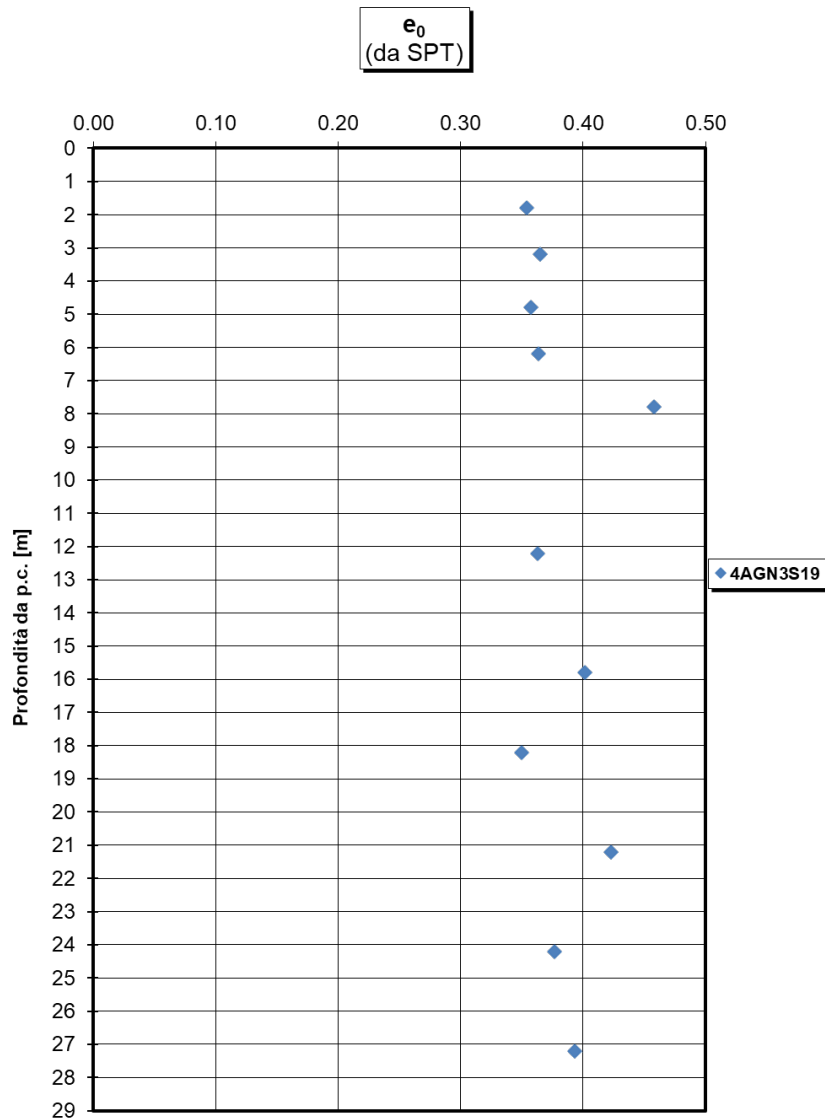


Figura 36: Galleria Trinacria – TRVa Sabbioso— indice di porosità da prove SPT

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 58 di 201</p> |

La densità relativa si definisce:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_o}{e_{\max} - e_{\min}}$$

essendo:

e_{\max} = indice dei vuoti massimo del materiale (-)

e_{\min} = indice dei vuoti minimo del materiale (-)

e_o = indice dei vuoti in sito del materiale (-)

Per quanto riguarda i terreni incoerenti prevalentemente sabbiosi la densità relativa D_r può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente legge di Skempton (1986):

$$D_r = \left(\frac{1}{A + B \cdot \sigma_{vo}'} \cdot N_{SPT} \right)^{0.5}$$

essendo:

A, B = costanti empiriche indicate in tabella

σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota
della prova SPT

N_{SPT} = numero di colpi per 30 cm corrispondente ad una energia di infissione pari ad una percentuale di quella teorica (60%)

(K_o) = coefficiente di spinta a riposo per terreni (-)

Costanti empiriche A e B (Skempton, 1986)

| Tipo di materiale | A | B |
|---------------------------------------|-----------|---|
| Sabbie fini normalmente consolidate | 27,5 | 27,5 |
| Sabbie grosse normalmente consolidate | 43,3 | 21,7 |
| Sabbie sovraconsolidate | 27,5÷43,3 | $(21,7÷27,5) \cdot \frac{1+2 \cdot (k_0)_{sc}}{1+2 \cdot (k_0)_{nc}}$ |

La densità relativa è stata determinata anche utilizzando la correlazione di Bazaara [1967]:

$$D_r = [N'_{SPT}/(20+0.8\sigma'_{vo})]^{0.5} \text{ per } \sigma'_{vo} < 73.2 \text{ kPa}$$

$$D_r = [N'_{SPT}/(65+0.2\sigma'_{vo})]^{0.5} \text{ per } \sigma'_{vo} > 73.2 \text{ kPa}$$

In cui:

N'_{SPT} = Numero di colpi risultanti dalla prova SPT, corretto in funzione del rendimento del sistema di infissione;

σ'_{vo} = pressione geostatica verticale efficace.

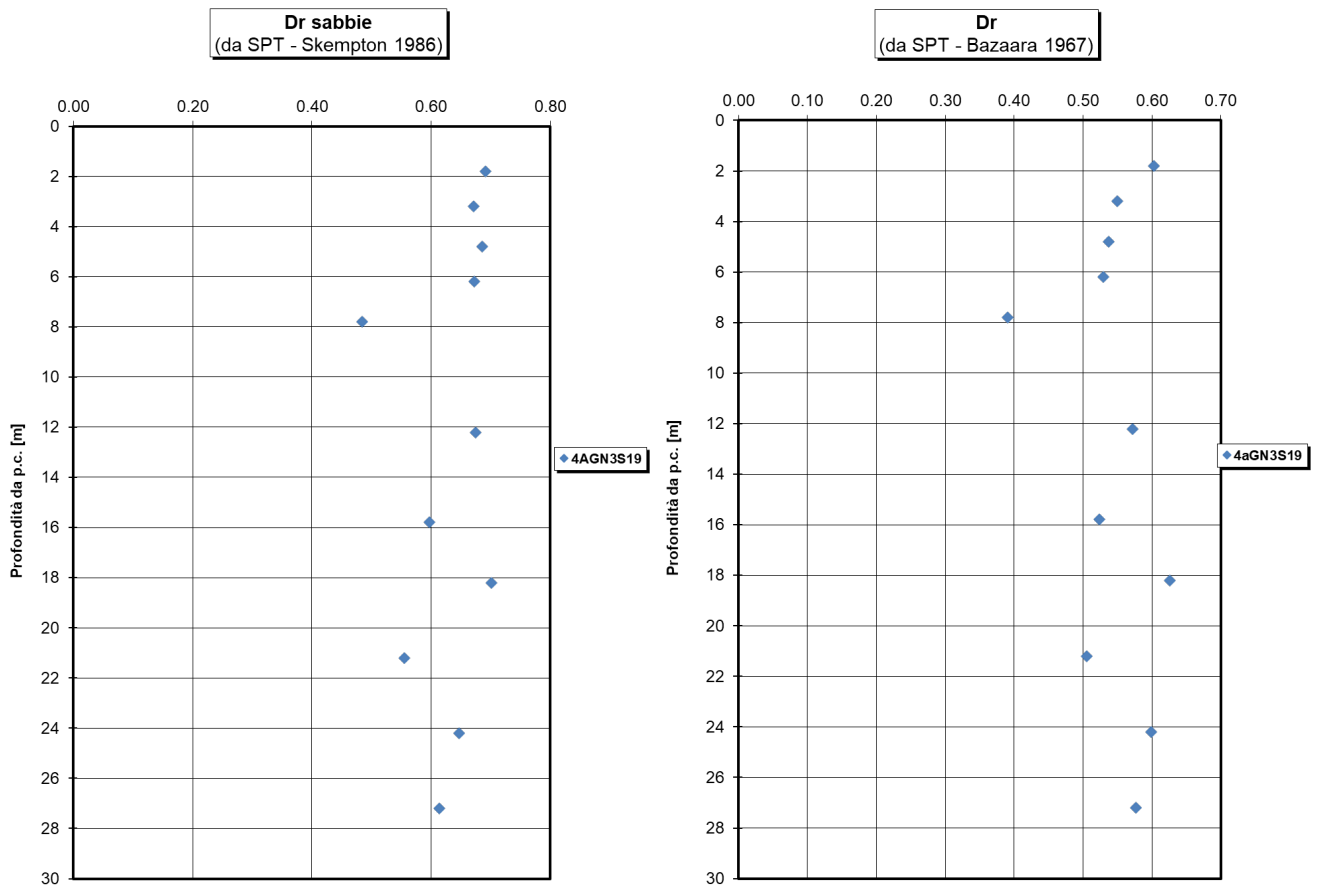



Figura 37: Galleria Trinacria – TRVa Sabbioso— densità relativa da prove SPT

8.3.1.11. *Caratteristiche meccaniche: resistenza non drenata (facies argilloso)*

Per quanto riguarda la resistenza non drenata, da prove NSPT si è potuto ricavare il valore di una prova a 9.2m il cui valore risulta pari a 175 Kpa. Dalla stessa prova l'OCR è risultato pari a 1.315.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.12. Caratteristiche meccaniche da prove di laboratorio: resistenza drenata

La due prove triassiali consolidate drenate condotta sui campioni CI4 e CI7 (20 e 35,4 m da p.c.) del sondaggio 4a-GN3-S19 restituisce un involucro con valori dispersi e parameri di coesione c' pari a 30 kPa e di resistenza al taglio ϕ' pari a 24° (Figura 38).

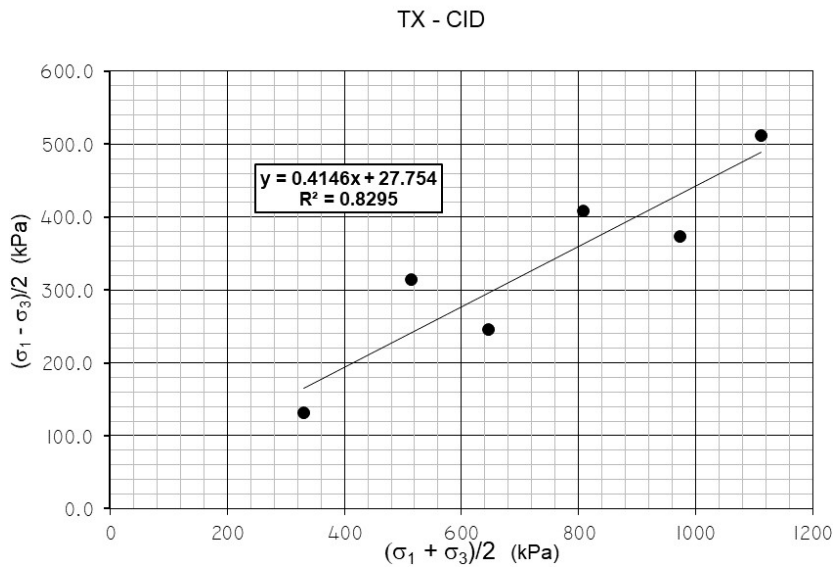


Figura 38: Galleria Trinacria – TRVa - Involucro di resistenza delle prove triassiali

Le 5 prove di taglio diretto di picco eseguite sui campioni indisturbati del sondaggio 4a-GN3-S19 evidenziano un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 39) con valori dei parametri di resistenza con coesione c' pari a 22 kPa e angolo di resistenza al taglio ϕ' pari a 23°. Le profondità di prelievo dei 5 campioni sono variabili tra 10 e 35,4 m da piano campagna.

TD - TRVa

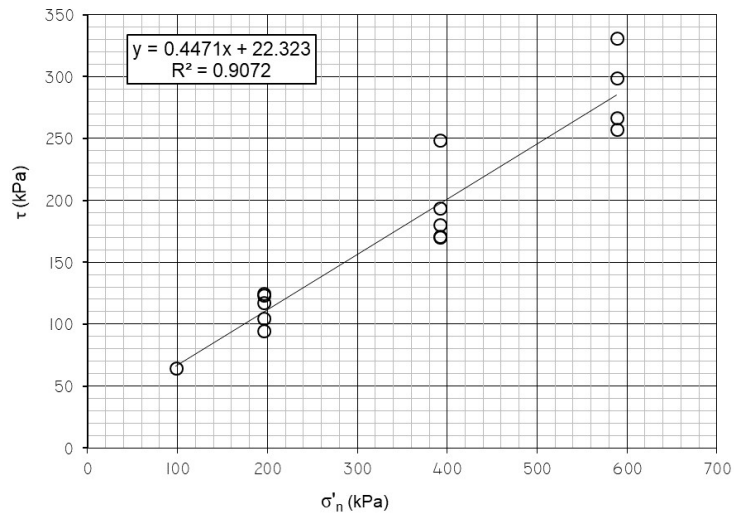


Figura 39: Galleria Trinacria – TRVa – Involuppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

8.3.1.13. *Caratteristiche meccaniche: deformabilità (facies argillosa)*

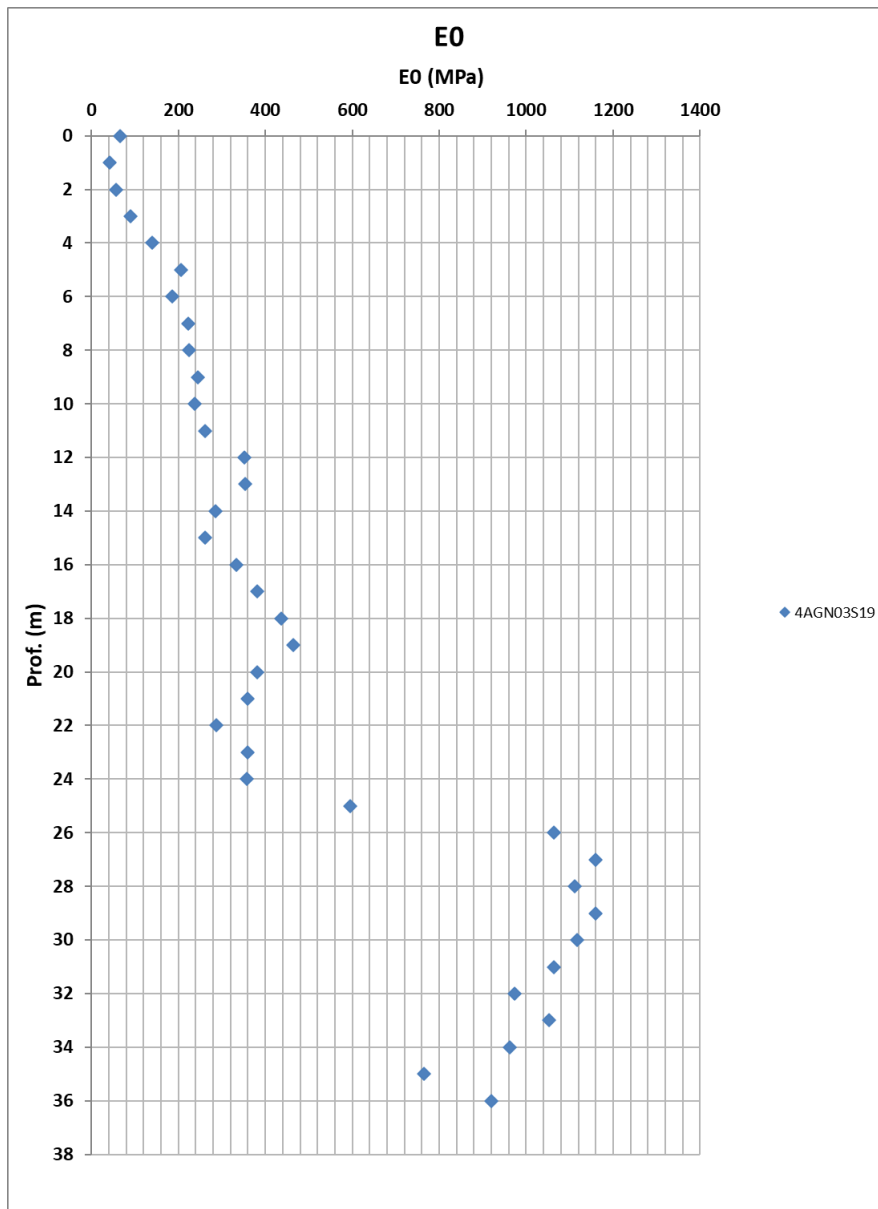


Figura 40: Galleria Trinacria - TRVa – modulo di Young da sismiche

8.3.1.14. *Caratteristiche meccaniche: deformabilità (facies sabbiosa)*

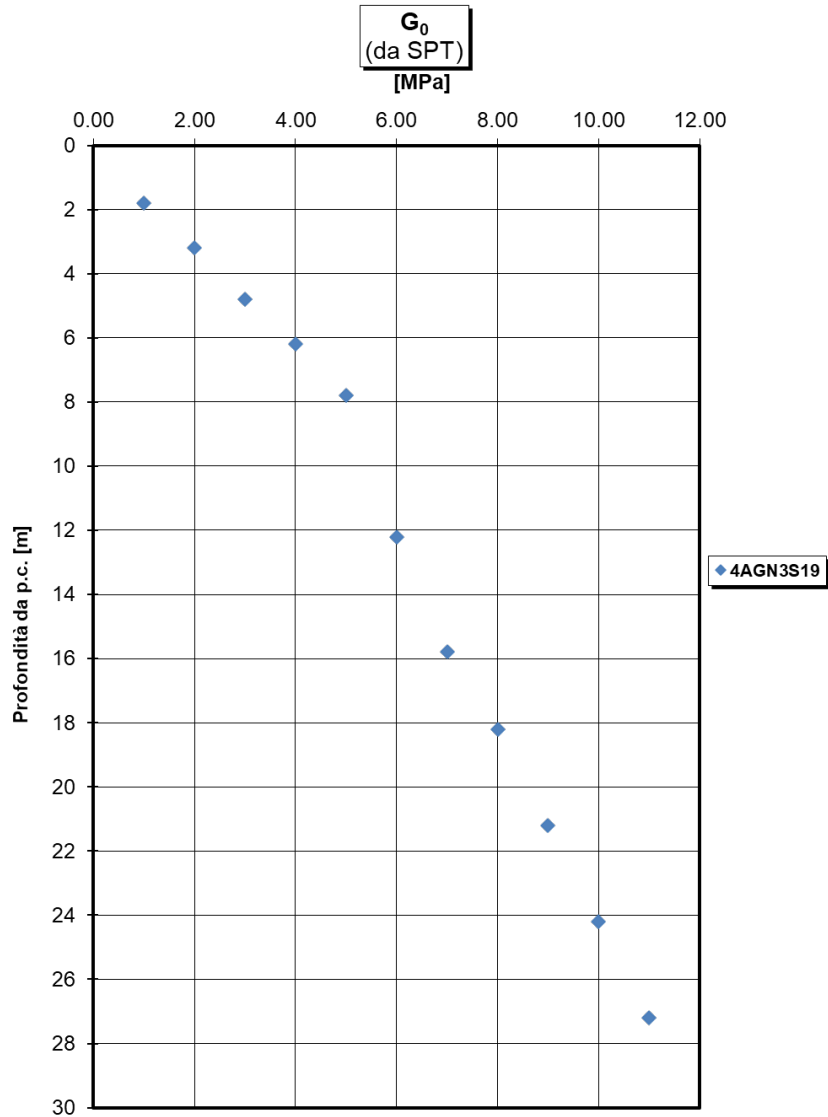


Figura 41: Galleria Trinacria - TRVa – G₀ da NSPT

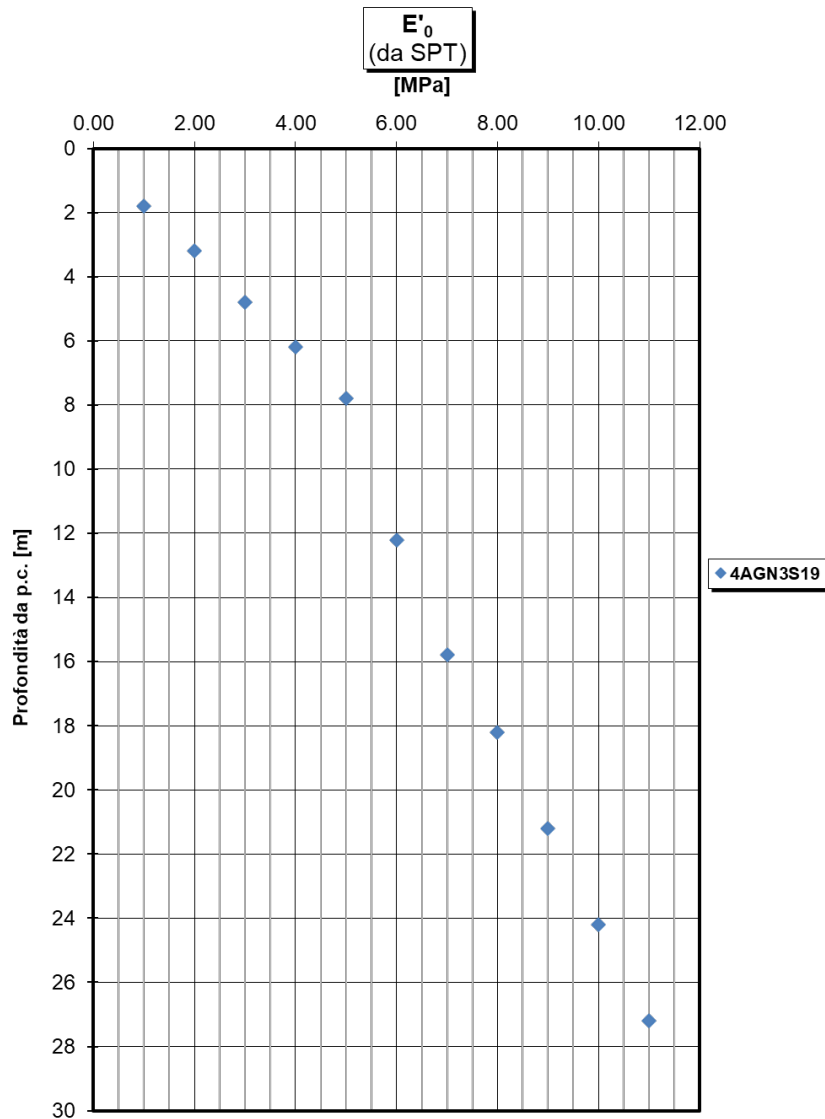


Figura 42: Galleria Trinacria – TRVa – modulo di Young da prove SPT

8.3.1.15. *Caratteristiche di permeabilità (facies argillosa)*

I valori di permeabilità riscontrati nel sondaggio 4AGNS19 a 8.75 m e 22.25m sono rispettivamente 5.74E-06 e 1.95E-06

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

8.3.1.16. Parametri geotecnici

Tabella 3 – Parametri derivati dalla caratterizzazione geotecnica – Galleria Trinacria – TRVa argilloso

| COPERTURA | FORMAZIONE | γ | GSI | mi | σ_m | ν | E | c' | C_u | ϕ' |
|-----------|------------|----------------------|-----|----|------------|-------|-------------|-------|-------|---------|
| -- | | [kN/m ³] | | | [MPa] | | [GPa] | [kPa] | [kPa] | [°] |
| 0-15 | TRVa | 21 | - | - | - | 0.3 | 0.030-0.080 | 22 | 225 | 24 |
| 15-25 | TRVa | 21 | - | - | - | 0.3 | 0.050-0.270 | 22 | 225 | 24 |
| 25-50 | TRVa | 21 | - | - | - | 0.3 | 0,105-0.55 | 22 | 500 | 24 |

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 GSI = geological strength index
 mi = costante del materiale
 σ_m = resistenza a compressione monoassiale
 c'_k = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso
 ϕ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso
 $c_{u k}$ = valore caratteristico della coesione non drenata

Tabella 4 – Parametri derivati dalla caratterizzazione geotecnica – Galleria Trinacria – TRVa sabbioso

| COPERTURA | FORMAZIONE | γ | GSI | mi | σ_m | ν | E | c'_k | $c_{u k}$ | ϕ'_k |
|-----------|---------------|----------------------|-----|----|------------|-------|-------|--------|-----------|-----------|
| [m] | | [kN/m ³] | | | [MPa] | | [GPa] | [kPa] | [kPa] | [°] |
| 0-50 | TRVa sabbioso | 21 | - | - | - | 0.3 | 0-0.2 | 21-38 | - | 30-38 |

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 GSI = geological strength index
 mi = costante del materiale
 σ_m = resistenza a compressione monoassiale
 c'_k = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso
 ϕ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso
 $c_{u k}$ = valore caratteristico della coesione non drenata

8.6 Valori caratteristici utilizzati nelle analisi

Tabella 5 – Intervallo dei parametri geotecnici

| Sezione di analisi | Unità | pk | Z ₀ | h _w | σ _o | p _{w0} | p _{wR} | R _w | γ | c' _k | φ' _k | c _{u k} | E _k | E _{u k} |
|--------------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | [km] | [m] | [m] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [m] | [kN/m ³] | [MPa] | [°] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| D1 | TRV | 25400 | 50 | - | 1,05 | - | - | - | 21 | - | - | 0,500 | - | 250 |
| D2 | TRV | 25150 | 100 | 40 | 2,2 | 0.4 | - | - | 22 | 150 | 18 | 0,594 | 300 | 297 |
| D3 | TRV | 23850 | 200 | 35 | 4,4 | 0.35 | - | - | 22 | 300 | 16 | 1,188 | 600 | 594 |
| D4 | TRV | 19600 | 300 | 33.6 | 6,6 | 0.34 | - | - | 22 | 421 | 14 | 1,782 | 900 | 891 |
| D5 | TRV | 20150 | 400 | 0 | 8,8 | 0 | - | - | 22 | 85 | 22 | 2,376 | 1200 | 1800* |
| D6 | TRV | 20300 | 500 | 0 | 11 | 0 | - | - | 22 | - | - | 2,970 | - | 1485 |
| D7 | TRV | 25150 | 600 | 0 | 13.2 | 0 | - | - | 22 | 85 | 22 | 3,564 | 2000 | 1800 |

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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


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

c_{u k} = valore caratteristico della coesione non drenata

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

E_{u k} = valore caratteristico del modulo elastico non drenato dell'ammasso

Le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente R_{eq} pari a 4,65m.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 68 di 201 |

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 (0), di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

9.1 Classi di comportamento del fronte di scavo

Secondo l'approccio ADECO-RS (0) 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

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 69 di 201 |

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.

Categoria C: nucleo-fronte instabile

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

9.2 Determinazione delle categorie di comportamento


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

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

La definizione delle sezioni analizzate è stata eseguita sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica (vedi § 8.3), in funzione delle condizioni idrauliche previste e della distribuzione delle diverse classi di copertura lungo il tracciato.

9.2.1 Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

Il comportamento delle strutture di rivestimento e dell'ammasso sono studiati separatamente: la curva caratteristica del cavo (o curva di convergenza) rappresenta l'evoluzione della convergenza radiale del cavo al diminuire della

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

tensione radiale agente sul contorno del profilo di scavo, espressa in funzione del tasso di deconfinamento λ con cui è 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 rendono lo stesso adatto allo studio di gallerie profonde a sezione circolare.

Per l'ammasso si utilizza un modello costitutivo elasto-plastico, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

Ove necessario, per la definizione del comportamento deformativo della galleria in funzione della distanza dal fronte, si è utilizzato il Nuovo Metodo Implicito (NMI) (0, 0).

Per il calcolo della convergenza al fronte si utilizzano le soluzioni analitiche per cavità sferiche.

Per le analisi relative alla fase di diagnosi, 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.

Sezioni analizzate

Nelle tabelle seguenti sono riepilogate le sezioni analizzate con i relativi dati di input utilizzati per il calcolo.

Tabella 6 - Sezioni analizzate con il metodo delle curve caratteristiche: dati di input

| Sezione di analisi | Unità | pk | Z ₀ | h _w | σ _o | p _{w0} | p _{wR} | R _w | γ | c' _k | φ' _k | c _{u k} | E _k | E _{u k} |
|--------------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | [km] | [m] | [m] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [m] | [kN/m ³] | [MPa] | [°] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| D1 | TRV | 25400 | 50 | - | 1,05 | - | - | - | 21 | - | - | 0,500 | - | 250 |
| D2 | TRV | 25150 | 100 | 40 | 2,2 | 0.4 | - | - | 22 | 150 | 18 | 0,594 | 300 | 297 |
| D3 | TRV | 23850 | 200 | 35 | 4,4 | 0.35 | - | - | 22 | 300 | 16 | 1,188 | 600 | 594 |
| D4 | TRV | 19600 | 300 | 33.6 | 6,6 | 0.34 | - | - | 22 | 421 | 14 | 1,782 | 900 | 891 |
| D5 | TRV | 20150 | 400 | 0 | 8,8 | 0 | - | - | 22 | 85* | 22* | 2,376 | 1200 | 1188 |
| D6 | TRV | 20300 | 500 | 0 | 11 | 0 | - | - | 22 | - | - | 2,970 | - | 1485 |
| D7 | TRV | 25150 | 600 | 0 | 13.2 | 0 | - | - | 22 | 85* | 22* | 3,564 | 1800 | 1782 |

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

c_{u k} = valore caratteristico della coesione non drenata

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

E_{uk} = valore caratteristico del modulo elastico non drenato dell'ammasso

Le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente R_{eq} pari a 4,65m.

*i valori rappresentano una retta nel piano di Mohr-Coulomb che è secante rispetto il dominio curvilineo. I punti rappresentativi che appartengono alla retta sono: lo stato tensionale ottenuto dall'analisi Flac in condizioni non drenate in calotta e lo stato tensionale indisturbato nello stesso punto.

La rappresentazione delle curve caratteristiche delle sezioni di analisi eseguite è riportata integralmente in allegato.

Risultati delle analisi

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

- confronto tra la resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso σ_c e la pressione critica al fronte $p_c = (3\sigma_o - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$, 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.

I risultati delle analisi, riassunti nella tabella seguente, mostrano:

Il comportamento allo scavo è instabile con tendenza all'instabilità a coperture maggiori

Tabella 7 - Risultati delle analisi

| Sezione di analisi | u_F | u_F / R_{eq} | R_{PF} | R_{PF} / R_{eq} | u_∞ | R_P | Criterio u_F / R_{eq} | Criterio $R_{pl F} / R_{eq}$ |
|--------------------|-------|----------------|----------|-------------------|------------|-------|-------------------------|------------------------------|
| | [m] | [%] | [m] | [-] | [m] | [m] | | |
| D1 | 1.02 | 0.22 | 4.65 | 1 | 0.047 | 7.8 | B | C |
| D2 | 4,33 | 0.93 | 8.3 | 1.8 | 20.77 | 17.7 | C | C |
| D3 | 3,72 | 0.80 | 8.4 | 1.8 | 17.9 | 17.7 | C | C |
| D4 | 4.29 | 0.92 | 8.4 | 1.8 | 20.61 | 17.7 | C | C |
| D5 | 4.33 | 0.93 | 8.4 | 1.8 | 20.77 | 17.7 | C | C |
| D6 | 4.33 | 0.93 | 8.4 | 1.8 | 20.77 | 17.7 | C | C |
| D7 | 4.33 | 0.93 | 8.4 | 1.8 | 20.77 | 17.7 | C | C |

u_F = convergenza al fronte (soluzione cavità sferica)
 R_{PF} = raggio plastico al fronte
 u_∞ = convergenza finale del cavo
 R_P = raggio plastico finale al contorno del cavo
 R_{eq} = raggio di scavo equivalente della galleria (vedi tabella precedente)

9.2.2 Analisi della stabilità del fronte

Per la valutazione del comportamento deformativo del fronte nelle tratte a bassa copertura sono stati utilizzati i metodi di seguito descritti.

Metodo di Tamez & Cornejo (1984)

Il metodo all'equilibrio limite proposto da Tamez (1984, 0) è basato sull'ipotesi di risposta del fronte di scavo in condizioni drenate e pertanto il calcolo è eseguito in tensioni efficaci. Si ipotizza che al fronte si formi un meccanismo di rottura approssimabile mediante solidi prismatici, come mostrato in Figura 43, e si valuta il coefficiente di sicurezza FSF rispetto a tale condizione di collasso, come rapporto tra i momenti delle forze resistenti e i momenti delle forze agenti

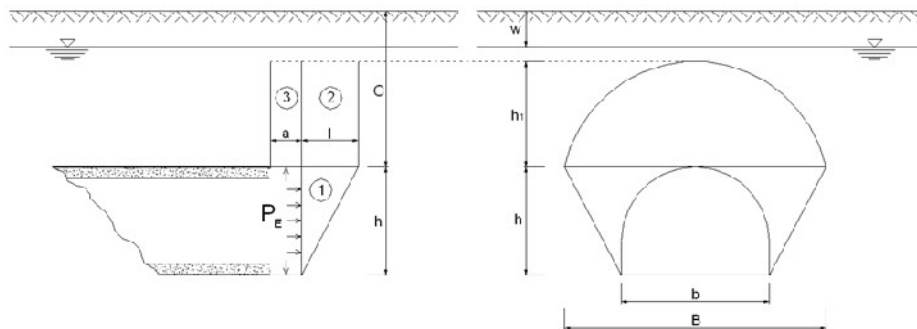


Figura 43 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984)

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 FS₃, per cui ai fini della stabilità del fronte si assume il coefficiente di sicurezza minimo tra i due,

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

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

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

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

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

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

Il fronte di scavo è considerato stabile per valori di FSF > 1,5, Per valori di FSF superiori a 2, il sostegno del fronte può considerarsi non necessario,

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Metodo di Broms e Bennermark (1967)

Broms e Bennermark (0) hanno affrontato per la prima volta sperimentalmente il problema della stabilità del fronte, deducendo una relazione in grado di descrivere la stabilità di fori non supportati praticati su sostegni verticali in un terreno puramente coesivo (criterio di Tresca) in condizioni non drenate, in assenza di falda (Figura 44).

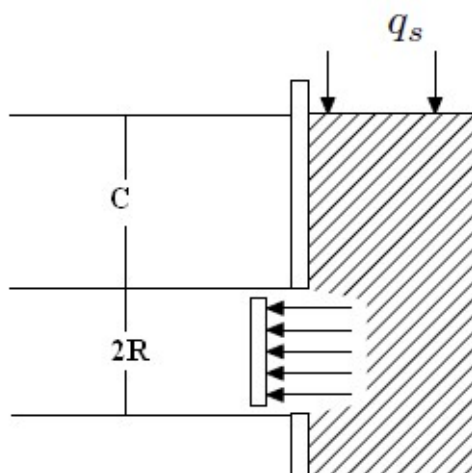


Figura 44 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Broms & Bennermark (Broms et al., 1967 (0))

Con questa relazione è stato definito il rapporto di stabilità N , dato da:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma z - \sigma_T}{c_u}$$

dove:

- γ = peso dell'unità di volume del terreno
- z = profondità dell'asse della galleria
- σ_s = sovraccarico eventualmente presente in superficie
- σ_T = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte
- c_u = resistenza al taglio, in condizioni non drenate, alla profondità della galleria.

Sulla base di prove di estrusione eseguite in laboratorio e d'osservazioni in sito, Broms e Bennermark (1967) hanno concluso che il valore del rapporto di stabilità critico N perché si manifesti il collasso è pari a circa 6. A conclusioni simili giunse Peck (1969).

La seguente tabella fornisce una indicazione della relazione fra il numero di stabilità e le deformazioni attese:

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 8 - Relazione fra il numero di stabilità e le deformazioni attese

| <i>N</i> | Deformazioni |
|----------|------------------|
| < 1 | Trascurabili |
| 1 – 2 | Elastiche |
| 2 – 4 | Elasto-plastiche |
| 4-6 | Plastiche |
| > 6 | Collasso |

Sezioni analizzate

Le sezioni analizzate risultano in prossimità degli imbocchi della galleria per coperture ridotte

In Tabella 9 e

Tabella 10 sono riepilogati tutti i dati di input utilizzati nelle analisi.

Tabella 9 - Sezione analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

| Sezione di calcolo | Formazione | pk. | z | b | h | W | h ₁ | γ ₁ | γ ₂ | c' ₁ | c' ₂ | φ' _m |
|--------------------|------------|------|-----|-----|-----|-----|----------------|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | [km] | [m] | [m] | [m] | [m] | [m] | [kN/m ³] | [kN/m ³] | [kPa] | [kPa] | [°] |
| 1 | TRV | - | 15 | 9.3 | 9.3 | - | 15 | 21 | 21 | 225 | 225 | 0 |
| 2 | TRV | - | 25 | 9.3 | 9.3 | - | 15 | 21 | 21 | 225 | 225 | 0 |

z = copertura rispetto alla calotta della galleria

b = larghezza dello scavo

h = altezza dello scavo

h₁ = altezza sopra la calotta della galleria del meccanismo di collasso (se $Z/h < 3$, $h_1 = Z$)

W = profondità superficie piezometrica da piano campagna

γ₁ = peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h₁)

γ₂ = peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)

c'₁ = valore caratteristico medio della coesione al fronte (su h)

c'₂ = valore caratteristico medio della coesione dalla calotta fino a h₁

φ'_m = valore caratteristico medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h₁

L'analisi è stata svolta considerando:

K₀ = coefficiente di spinta a riposo = $1 - \tan \phi'$

K_a = coefficiente di spinta attiva = $1 - \sin \phi' / (1 + \tan \phi')$

a = lunghezza non sostenuta = 0m

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 10 - Sezione analizzate col metodo di Broms e Bennermark per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

| Sezione di calcolo | Formazione | pk. | z | σ_s | γ | σ_r | $c_{u,k}$ |
|--------------------|------------|------|-----|------------|----------------------|------------|-----------|
| | | [km] | [m] | [kPa] | [kN/m ³] | [kPa] | [kPa] |
| 1 | TRV | - | 15 | 0 | 21 | 0 | 225 |
| 2 | TRV | - | 25 | 0 | 21 | 0 | 225 |

z = profondità dell'asse della galleria
 σ_s = sovraccarico eventualmente presente in superficie
 γ = peso dell'unità di volume del terreno
 σ_r = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte
 c_u = peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h1)

Risultati delle analisi

Per l'analisi eseguita con il metodo di Tamez i risultati sono stati esaminati in funzione dei valori dei coefficienti di sicurezza FS_F e FS₃ calcolati secondo quanto riportato nel paragrafo precedente, In particolare per la definizione della categoria di comportamento si è preso a riferimento il seguente criterio:

Tabella 11: Criterio per la definizione della categoria di comportamento

| FS = min (FS _F ; FS ₃) | <u>Classe di comportamento</u> |
|---|--------------------------------|
| ≥ 2 | <u>A</u> |
| < 2 e $\geq 1,5$ | <u>B</u> |
| $< 1,5$ | <u>C</u> |

Per quanto riguarda l'analisi a 15m con Tamez nella formazione si ottiene FS=5.34 per la formazione TRV (cat A).

Per quanto riguarda l'analisi a 25m con Tamez nella formazione TRV si ottiene FS=3.4 per la formazione TRV (cat A).

Per quanto riguarda la formazione del TRV a 15m con Broms e Bennermark si ottiene N=1.8 e quindi le deformazioni risultano in campo elastico.

Per quanto riguarda la formazione del TRV a 25m con Broms e Bennermark si ottiene N=2.8 e quindi le deformazioni risultano in campo elasto-plastico.

Si rimanda in Allegato per maggiori informazioni.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 76 di 201 |

9.3 Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo

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

- per la Galleria Trinacria si prevede:
 - nel tratto interessato dalla formazione TRV, è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (Instabile);

Le previsioni di comportamento lungo il tracciato della galleria sono illustrate in forma sintetica nel “Profilo geotecnico – Galleria Trinacria” (0).

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 77 di 201 |

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 in assenza di interventi (fase di diagnosi).

10.1 Scelta del metodo di scavo

La scelta di uno scavo meccanizzato garantisce la stabilità del fronte e del cavo in modalità a fronte chiuso ed in pressione anche in contesti geomeccanici difficili ed in presenza di falda apportando il minimo disturbo e garantendo anche produzioni di decine di metri al giorno, e quindi idonea per gallerie molto lunghe come quella in esame.

10.2 Scavo meccanizzato

Scelta della tipologia di TBM

La scelta di una TBM – EPB consente l'applicazione di uno scavo meccanizzato a fronte chiuso in contesti geomeccanici i più disparati adattandosi in modo affidabile anche in condizioni di estrema variabilità geomeccanica, come nel caso in esame.

Sezione di avanzamento

La sezione tipo di avanzamento in scavo meccanizzato fa riferimento ad una configurazione standard per comportamenti d'ammasso tipo C.

La sezione tipo ha le seguenti caratteristiche:

- raggio interno: 4,00 – 4.05 m
- raggio estradosso: 4.50 m
- diametro scavo: 4,7 m (in testa)
- macchina scudata dotata di conicità radiale centimetrica (differenza di raggio fra testa e coda)
- sovrascavo permanente tramite gauge cutters (4.70m in testa)
- sovrascavo eccezionale in testa (tramite copy cutter). Totale sovrascavo 5-10cm
- tipologia anello: universale
- numero conci: 6+1
- spessore conci: 45cm, 50cm
- lunghezza conci: 1,5m

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|-----------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>78 di 201</td> </tr> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 78 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 78 di 201 | | | | | | | | |

- guarnizioni in EPDM integrate su ciascun concio per garantire la tenuta idraulica tra i giunti (sia longitudinali che radiali)

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

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

Per i conci prefabbricati di altezza pari a 45 cm è prevista una classe di resistenza del calcestruzzo RCK55 e un'incidenza dell'armatura di circa 72-88 kg/m³ di rivestimento (2 classi di armatura, rispettivamente classe IV ed III) mentre per i conci di altezza pari a 50 cm è prevista una classe di resistenza del calcestruzzo RCK67 e RCK75 e un'incidenza dell'armatura di circa 113 kg/m³ di rivestimento (2 classi di armatura, rispettivamente classe II ed I)

Modalità di avanzamento

Si prevede una modalità chiusa di avanzamento per tutta la galleria con range di pressioni compresa fra 1bar e 5 bar con il valore massimo alle massime coperture e/o in presenza di battente idraulico.

Per il dettaglio delle modalità di avanzamento previste lungo il tracciato si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico" (0).

Di seguito si riporta, per ciascuna formazione, il range dei valori di pressione derivanti dalle verifiche di stabilità del fronte condotte.

Tabella 12 - Avanzamento in modalità chiusa - Valori della contropressione al fronte

| Formazione | P _{min} [bar] | P _{max} [bar] |
|------------|------------------------|------------------------|
| TRV | 0 | 5 |

Tali valori risultano compatibili con quelli garantiti dalla tipologia di TBM prevista in progetto.

Nelle successive fasi di progettazione dovranno essere definiti nel dettaglio i valori di pressione al fronte lungo l'intero tratta in scavo.

Drenaggio della falda

Per la galleria Trinacria a lungo termine al fine di ridurre i carichi idrostatici sui rivestimenti, per coperture di terreno che vanno dai 400m ai 600m, che realmente si dovessero realizzare soprattutto nelle tratte eventualmente più permeabili della formazione in esame, si prevedono dei drenaggi provvisori dal rivestimento definitivo dei conci ed un contorno drenante con backfilling.

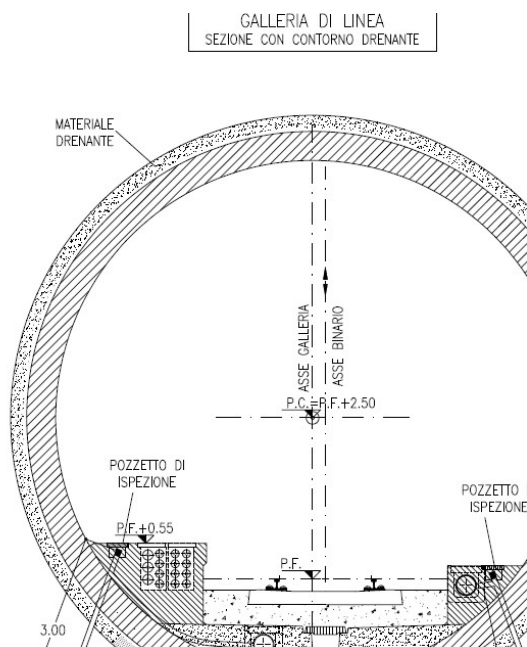


Figura 45 –Drenaggi dal rivestimento della galleria TBM

10.3 Caratteristiche dei materiali strutturali

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei materiali impiegati nelle opere in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni della Normativa vigente (Rif. [1]), del “Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili” (Rif. [7]) e del “Manuale di Progettazione delle opere civili” (Rif. [8])

Con riferimento ai rivestimenti in calcestruzzo, si sottolinea che la classe di resistenza riportata nelle tabelle che seguono è quella utilizzata ai fini della modellazione numerica e delle verifiche strutturali. Per la completa e puntuale definizione delle caratteristiche dei materiali previsti per la realizzazione dell'opera si rimanda all'elaborato di progetto Caratteristiche dei materiali - Note generali.

| Galleria | Copertura [m] | Classe CLS | Altezza [m] | As [m ²] | A's [m ²] | Incidenza totale |
|-----------|---------------|------------|-------------|----------------------|-----------------------|------------------|
| Trinacria | 100 m | 45/55 | 0.45 | 14 Φ 14 | 14 Φ 14 | 73.27 |
| Trinacria | 200 m | 45/55 | 0.45 | 14 Φ 16 | 14 Φ 16 | 89.36 |
| Trinacria | 300 m | 55/67 | 0.5 | 14 Φ 20 | 14 Φ 20 | 114.65 |
| Trinacria | 400 m | 55/67 | 0.5 | 14 Φ 20 | 14 Φ 20 | 114.65 |
| Trinacria | 600 m | 70/85 | 0.5 | 15 Φ 30 | 15 Φ 30 | 250.24 |

Rivestimenti definitivi

| Calcestruzzo per conci prefabbricati | |
|--|---|
| Classe di resistenza di calcolo | C 45/55 |
| Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni | $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1.5 = 25.5 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 28 giorni | $E_{cm} = 22000 (f_{cm} / 10)^{0.3} = 36283 \text{ MPa}$ |
| Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018) | $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 20.25 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente |

| Calcestruzzo per conci prefabbricati | |
|--|--|
| Classe di resistenza di calcolo | C 55/67 |
| Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni | $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1.5 = 31.2 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 28 giorni | $E_{cm} = 22000 (f_{cm} / 10)^{0.3} = 38214 \text{ MPa}$ |
| Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018) | $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 24.7 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente |

| Calcestruzzo per conci prefabbricati | |
|--|--|
| Classe di resistenza di calcolo | C 60/75 |
| Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni | $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1.5 = 34 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 28 giorni | $E_{cm} = 22000 (f_{cm} / 10)^{0.3} = 39100 \text{ MPa}$ |
| Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018) | $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 27 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 81 di 201 |

Acciaio per barre di armatura

| | |
|--|--|
| Tipo | <i>B450C</i> |
| Tensione caratteristica di rottura | $f_{tk} \geq 540$ MPa |
| Resistenza di progetto | $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391,3$ MPa |
| Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018) | $\sigma_{lim} = 0,80 f_{yk} = 360$ MPa |

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.4 Analisi e verifica degli interventi al fronte e dei rivestimenti definitivi

Le soluzioni progettuali descritte nel capitolo precedente sono state analizzate per verificarne adeguatezza ed efficacia, con riferimento al modello geotecnico illustrato nel capitolo 8 e nel rispetto delle indicazioni della normativa vigente (Rif. [1]).

Le sezioni di analisi sono state definite sulla base della fase conoscitiva, individuando le condizioni più rappresentative anche in termini di copertura e condizioni idrauliche. Nella tabella seguente sono riepilogate le analisi eseguite:

Tabella 13 - Sezioni di analisi fasi di terapia – pressioni al fronte

| Analisi n. | Sezione | progressiva | formazione | Condizione analisi |
|-------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|---|
| 1 | <i>Cc1</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 50m – pressione fronte 3 bar</i> |
| 2 | <i>Cc2</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 100m – pressione fronte 3 bar</i> |
| 3 | <i>Cc3</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 200m – pressione fronte 5 bar</i> |
| 4 | <i>Cc4</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 300m – pressione fronte 5 bar</i> |
| 5 | <i>Cc5</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 400m – pressione fronte 5 bar</i> |
| 6 | <i>Cc6</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 500m – pressione fronte 5 bar</i> |
| 7 | <i>Cc7</i> | - | <i>TRV</i> | <i>Curva caratteristica 600m – pressione fronte 5 bar</i> |
| 8 | <i>Tamez</i> | - | <i>TRV</i> | <i>15m – no pressione al fronte</i> |
| 9 | <i>Tamez</i> | - | <i>TRV</i> | <i>25m – no pressione al fronte</i> |
| 10 | <i>Broms e Bennermark</i> | - | <i>TRV</i> | <i>15m – no pressione al fronte</i> |
| 11 | <i>Broms e Bennermark</i> | - | <i>TRV</i> | <i>25m – no pressione al fronte</i> |

In ogni caso l'esito della Terapia (analisi 1-5) in termini di analisi svolte con le Curve Caratteristiche o i Metodi di Tamez e Broms e Bennermark è riportata in Allegato.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 14 - Sezioni di analisi fasi di terapia – rivestimenti definitivi e spinte sullo scudo

| Analisi n. | Sezione | progressiva | formazione | Condizione analisi |
|------------|--------------|-------------|------------|---|
| 10 | axiTRV100m | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 100m |
| 11 | axiTRV200m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 200m – sovrascavo 5cm |
| 12 | axiTRV300m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 300m – sovrascavo 5cm |
| 13 | axiTRV400m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 400m – sovrascavo 5cm |
| 14 | axiTRV600m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 600m – sovrascavo 10cm |
| 15 | TRV100m | 25150 | TRV | <i>Piana copertura 100m</i> |
| 16 | TRV200m_s | 23850 | TRV | <i>Piana copertura 200m – sovrascavo 5cm</i> |
| 17 | TRV300m_s | 19600 | TRV | <i>Piana copertura 300m – sovrascavo 5cm</i> |
| 18 | TRV400m_s | 20150 | TRV | <i>Piana copertura 400m – sovrascavo 5cm</i> |
| 19 | TRV600m_s | 20300 | TRV | <i>Piana copertura 600m – sovrascavo 10cm</i> |

Le sezioni di analisi sono state individuate perché ritenute più significative del comportamento deformativo in base all'esito delle curve caratteristiche.

Nei successivi capitoli si esplicitano le verifiche effettuate ed il relativo esito.

10.4.1 Criteri di verifica

Stabilità del fronte

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).

Le pressioni applicate al fronte, sono simulate mediante un incremento di coesione equivalente del fronte (Δc), attraverso il calcolo della resistenza di mezzo nucleo secondo le seguenti relazioni:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \sigma_{TBM} \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|---------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 84 di 201 |

$$R_{1/2\text{massicco_TBM}} = (c + \Delta c) \sqrt{K_p}$$

con:

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

Nella fase di terapia quindi, anche per le pressioni applicate al fronte tramite TBM, si utilizzano i parametri caratteristici abbattuti secondo i coefficienti M2 di normativa.

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

Per quanto riguarda lo scavo meccanizzato nelle analisi si tiene conto direttamente dell'eventuale pressione applicata dalla macchina..

Le analisi di stabilità del fronte di scavo sono condotte utilizzando:

- il metodo delle linee caratteristiche (per le sezioni ad alta copertura);
- i metodi di analisi della stabilità del fronte (per le sezioni a bassa copertura).

Anche in merito alla risposta allo scavo (in condizioni drenate o non drenate), sono riproposti gli stessi criteri adottati nella fase di diagnosi in funzione delle formazioni interessate.

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.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 85 di 201 |

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 D.M. 17/01/2018 (Rif. [1]).

Le analisi di interazione opera-terreno sono condotte con modelli numerici bidimensionali o pseudo tridimensionali (assialsimmetrici) mediante il codice di calcolo [Itasca FLAC v.8].

In tale tipologia di analisi lo scavo della galleria è 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 è ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

L’effetto delle pressioni al fronte di scavo è tenuto in conto in modo indiretto, nella definizione della percentuale di rilascio delle forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo.

Le strutture di rivestimento definitivo della galleria sono simulate con elementi “beam”.

Interazione opera-terreno con analisi sismica pseudostatica

Definizione dell’azione sismica di progetto

Per la definizione dell’azione sismica di progetto, l’effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi nelle quali l’azione sismica è definita in termini di storia temporale di accelerazione (cfr. § 7.11.3.1 del DM 17/01/2018).

In alternativa, l’effetto della risposta sismica locale può essere valutato con approccio semplificato (cfr. § 3.2.2 del DM 17/01/2018) basato sulla classificazione del sottosuolo in base ai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni risultino chiaramente riconducibili alle

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

categorie definite nella Tab. 3.3.II del DM 17/01/2018. In questo caso, il moto sismico in superficie è definito mediante l'accelerazione massima a_{\max} attesa.

In entrambi i casi, una volta definita l'azione sismica di progetto, è possibile stimare gli effetti indotti mediante un approccio di tipo pseudo-statico. Nello specifico, per le opere in sotterraneo, gli effetti indotti dal sisma sono riprodotti sotto forma di una deformazione di taglio massima, agente alla quota della galleria, ricavata a partire dall'azione sismica di progetto.

La possibilità di ricorrere ad approccio semplificato deve essere verificata per ogni caso specifico: in alternativa è necessario ricorrere a specifiche analisi di Risposta Sismica Locale. Di seguito vengono fornite indicazioni per la valutazione della risposta sismica locale sia nel caso di ricorso ad approccio semplificato sia mediante specifiche analisi con accelerogrammi.

Nel caso in cui l'effetto della risposta sismica sia valutato con approccio semplificato, l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito è valutata con la relazione (DM 17/01/2018):

$$a_{\max} = S_s \cdot S_T \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right)$$

Dove:

- a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido;
- S_s è il fattore di amplificazione stratigrafica del terreno, funzione della categoria del sottosuolo di fondazione e dei parametri sismici F_0 e a_g/g (Tabella 3.2.IV del D.M. 17/01/2018);
- S_T è il fattore di amplificazione che tiene conto delle condizioni topografiche, il cui valore dipende dalla categoria topografica e dall'ubicazione dell'opera (Tabella 3.2.V del D.M. 17/01/2018).

L'accelerazione orizzontale massima a_g è funzione delle coordinate geografiche del sito e del tempo di ritorno T_R valutato a partite dalla probabilità di superamento dell'azione sismica (P_{VR}) attribuita allo stato limite ultimo considerato e del periodo di riferimento dell'azione sismica dell'opera in progetto (V_R), secondo la seguente espressione:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

La valutazione del livello di deformazione indotta dal sisma e del corrispondente modulo di deformazione al taglio mobilitato è condotta adottando un modello costitutivo di tipo iperbolico in accordo alla formulazione di Hardin & Drnevich (Hardin, B.O., and Drnevich, V.P. (1972) - *Shear modulus and damping in soils: design equations and curves*) riportata nel seguito:

$$G/G_{\max} = 1 / (1 + \gamma_h) \quad (1)$$

dove $\gamma_h = \gamma / \gamma_{\text{ref}} \cdot [k_1 + a \cdot e^{(-b \cdot (\gamma / \gamma_{\text{ref}}))}]$

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

con:

| | |
|---------------------------------------|--|
| $\gamma_{ref} = \tau_{max} / G_{max}$ | deformazione di riferimento; |
| G_{max} | modulo di deformazione al taglio iniziale $G_{max} = \rho \cdot V_s^2$ |
| τ_{max} | tensione tangenziale massima; |
| γ | livello di deformazione corrente; |
| k_1, a, b | parametri di forma del modello adottato; |

Il modello iperbolico, caratterizzato nel piano $\tau - \gamma$ dai parametri pendenza iniziale (G_{max}) e asintoto (γ_{max}), consente con un approccio semplificato di tenere conto del comportamento non lineare del terreno. Il modello è calibrato con curve di decadimento attraverso il parametro γ_h . I parametri k_1, a, b , sono parametri di forma attraverso i quali adattare il modello non lineare alle curve di letteratura o, qualora disponibili, curve di decadimento derivanti da specifiche prove di laboratorio.

Il valore della resistenza massima del terreno è calcolato alla quota del piano dei centri secondo il criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau_{max} = c' + \sigma'_v \cdot \tan(\phi')$$

Il metodo proposto è basato sulla stima delle deformazioni $\gamma(z)$ indotte dal sisma nel sottosuolo, valutando in maniera statica la distribuzione delle accelerazioni, delle tensioni tangenziali e quindi della deformazione ad una generica profondità z , tenendo in conto il decadimento del modulo di taglio.

Il valore della tensione tangenziale corrispondente al livello di deformazione corrente è pari a:

$$\tau = G_{max} \cdot (1 / (1 + \gamma_h)) \cdot \gamma < \tau_{max} \quad (2)$$

Il valore della tensione tangenziale massima indotta dal sisma alla profondità z viene valutata attraverso la seguente relazione, basata sull'equilibrio di una colonna di terreno sottoposta ad un'accelerazione sismica $a_{max,s}$ (in cui le forze di inerzia sono bilanciate dalla risultante delle tensioni tangenziali alla base):

$$\tau_{max, sis}(z) = r_d(z) \cdot a_{max} / g \cdot \sigma_v(z)$$

dove:

- $r_d(z)$ fattore di attenuazione con la profondità assunto pari a $r_d(z) = 1 - 0.015 \cdot z$ (Iwasaki et al., 1978), che tiene in conto del sincronismo del moto sismico;
- a_{max} accelerazione massima a piano campagna;
- $\sigma_v(z)$ tensione geostatica verticale totale.

Il livello di deformazione indotto dal sisma è quello associato al valore di $\gamma_{max, sis}$ letto nel legame costitutivo (2).

In riferimento alle sezioni analizzate (§ 10.4) si riportano i valori delle grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica:

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 15 Parametri per la definizione dell'azione sismica per le sezioni considerate

| | Sezioni | | |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | Sezione TBM con Protesi | Sezione TBM minime coperture | Sottoattraversamento SS90 |
| Formazione | ASP | FAE | FAE |
| Progressiva | 31+330 | 37+780 | 40+910 |
| Coperture (m) | 5.65 | 30 | 6.5 |
| P_{VR} (%) | 10 | 10 | 10 |
| V_N (anni) | 75 | 75 | 100 |
| c_U (-) | 1.5 | 1.5 | 2 |
| V_R (anni) | 112.5 | 112.5 | 200 |
| T_R (anni) | 1068 | 1068 | 1898 |
| a_g (-) | 0.235 | 0.261 | 0.348 |
| F_0 (-) | 2.499 | 2.454 | 2.404 |
| Categoria di sottosuolo | C | B | B |
| S_S (-) | 1.347 | 1.144 | 1.066 |
| Categoria topografica | T2 | T1 | T2 |
| S_T (-) | 1.2 | 1.0 | 1.2 |
| a_{max} (g) | 0.380 | 0.299 | 0.445 |

Nel caso in cui l'effetto della risposta sismica locale sia valutato mediante specifiche analisi, con la definizione di storie temporali di accelerazione, è possibile ottenere informazioni delle grandezze di interesse (deformazione, modulo di taglio, tensione tangenziale) in maniera puntuale con la profondità.

L'analisi monodimensionale può essere svolta con un codice di calcolo che valuta la risposta sismica di un deposito nell'ipotesi di comportamento del terreno lineare equivalente ed in condizioni di free-field (trascurando l'interazione cinematica tra terreno e struttura).

I dati necessari per tale analisi sono l'input sismico ed un modello geotecnico di sottosuolo caratterizzato appositamente per l'analisi da svolgere fino ad uno strato individuabile come "bedrock" (coincidente con la profondità alla quale le velocità delle onde di taglio raggiungono il valore di 800 m/s). L'input sismico si basa sulla definizione dello spettro elastico di risposta di riferimento (che rispecchia sinteticamente l'azione sismica di base in funzione dello stato limite e del tempo di ritorno considerati) e la selezione di accelerogrammi spettro-compatibili. Per la selezione di accelerogrammi sono presi a riferimento accelerogrammi reali, effettivamente registrati durante eventi sismici, coerentemente con gli intervalli di magnitudo e distanza della sorgente ricavati dalle mappe di disaggregazione della pericolosità per la PGA (5% di probabilità di superamento in 50 anni) assegnando una tolleranza di compatibilità inferiore e superiore.

Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale

Gli incrementi di sollecitazione mediante soluzioni analitiche in forma chiusa nelle ipotesi di galleria circolare in semispazio lineare ed isotropo sono stimati a partire dalla deformazione di taglio massima stimata (Wang J.N. (1993) - *Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach*) oppure, nel caso di geometrie complesse, implementando l'approccio pseudo-statico in un modello numerico.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

Di seguito si riporta formulazione di Wang (Wang J.N. (1993) - *Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach*) per la forza circonferenziale massima ed il momento massimo che agiscono nella sezione trasversale della galleria nell'ipotesi di perfetta aderenza al contatto terreno-rivestimento:

$$M = \pm \frac{1}{2} K \frac{E_m}{r^2} \quad N_{\max} = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu)}$$

Dove:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_m) - (1-2\nu_m)C] - \frac{1}{2}(1-\nu_m)}{F[(3-2\nu_m) + (1-2\nu_m)C] + C \left[\frac{5}{\gamma} - 8\nu_m + 6\nu_m^2 \right]}$$

C e F sono rispettivamente le rigidzze relative a compressione e a flessione:

$$C = \frac{E_m(1-\nu_i^2)r}{E_i t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_i^2)r^3}{E_i t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}$$

Le analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale sono state svolte sia in riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), valutando la compatibilità delle sollecitazioni con i domini di resistenza delle sezioni, sia rispetto allo stato limite di danno (SLD), garantendo per quest'ultimo un limite all'ampiezza delle fessure tale da non compromettere la durabilità dell'opera e imponendo limiti tensionali sia per l'acciaio che per il calcestruzzo.

Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione longitudinale

La stima della deformazione in direzione longitudinale indotta da un evento sismico si basa sull'ipotesi di *free-field*, per la quale sono stimate le deformazioni nel terreno in assenza della struttura o dell'esecuzione dello scavo (deformazione che viene in seguito applicata interamente sul rivestimento della galleria stessa). Le deformazioni così stimate trascurano l'interazione terreno-struttura ma forniscono comunque una stima delle deformazioni indotte nell'opera (*ITA-AITES – Seismic design and analysis of underground structures*).

Nello studio degli effetti longitudinali si ipotizza un'onda sismica (armonica) piana che si propaga secondo un angolo di incidenza ϕ rispetto all'asse della galleria, in un mezzo elastico, isotropo ed omogeneo. Si fa riferimento all'angolo di incidenza critico (al quale corrisponde il valore massimo della deformazione) come misura di sicurezza nella stima dell'effetto dell'evento sismico in relazione alle sole onde di taglio essendo queste ultime

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 90 di 201 |

causa delle maggiori deformazioni ed essendo il tipo di onda governante (*U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration – Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels*).

Le formulazioni in forma chiusa di letteratura (Newmark, 1968 e Kuesel, 1969, St. John e Zahrah, 1987) stimano la deformazione assiale ε^a e la deformazione flessionale in direzione longitudinale ε^b assimilando la galleria ad una trave elastica:

$$\varepsilon^a = \frac{V_s}{C_s} \sin\phi \cos\theta$$

$$\varepsilon^b = r \frac{a_s}{C_s} \cos^3 \theta$$

La deformazione totale può essere stimata come la somma delle due. Cautelativamente, Power et al. (1996) propongono di calcolare la deformazione totale in direzione longitudinale come somma della massima deformazione assiale e della massima deformazione flessionale:

$$\varepsilon^{ab} = \varepsilon_{\max}^a + \varepsilon_{\max}^b = \frac{V_s}{2C_s} +$$

L'ipotesi di *free-field* presuppone che la galleria si adatti completamente alle deformazioni del terreno e, sebbene conservativa, può fornire una stima ragionevole in quanto, nella maggior parte dei casi, la rigidità longitudinale della galleria è considerato relativamente flessibile confrontata con quella dell'ammasso circostante (*U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration – Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels*).

Verifiche nei confronti di azioni eccezionali

Tra le azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale delle opere si considera quella di incendio. Per le verifiche di competenza si rimanda al documento specialistico di progetto.

10.5 Analisi e Verifica delle sezioni tipo

Il rivestimento della galleria di linea è realizzato con anelli in conci prefabbricati in calcestruzzo: ogni anello è composto da 7 conci dello spessore di 45 cm e 50 cm con raggio interno di 4.05 m per i conci da 45 cm e 4.0 m per quelli da 50 cm, e raggio esterno nominale di 4.7

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|------------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 91 di 201</p> |

La galleria ha un diametro nominale di scavo pari a circa 9.40

Il sovrascavo va da 0 a 10 cm.

La monoliticità dell'insieme è garantita dal fatto che i giunti di ciascun anello vengono sfalsati rispetto ai giunti dell'anello successivo, e dalla messa in opera di connettori di adeguata rigidità fra i singoli anelli.

La tenuta idraulica è realizzata mediante l'adozione di guarnizioni continue annegate nei conci ed attraverso la scelta di un'idonea granulometria del calcestruzzo estruso di intasamento a tergo del rivestimento.

10.5.1 Requisiti conci rivestimento

I conci verranno realizzati in calcestruzzo C45/55 per coperture fino a 200m, mentre da 200 a 400m si utilizza la classe C55/67 per coperture mentre per coperture oltre i 400m si utilizza la classe di resistenza C60/75.

Lo studio di qualifica della miscela di calcestruzzo dei conci TBM verrà effettuato dal prefabbricatore incaricato di provvedere a definire il mix design ed ad effettuare le relative prove compatibilmente con la Normativa vigente.

Le prescrizioni di progetto si riferiscono alle seguenti caratteristiche:

- classe di resistenza: C45/55
- classe di esposizione ambientale: XA2
- massimo rapporto a/c (acqua/cemento): 0.4
- tipo e classe di cemento: III A - 32.5 N / IV B – 32.5 R
- classe di lavorabilità: S4

- classe di resistenza: C55/67
- classe di esposizione ambientale: XA2
- massimo rapporto a/c (acqua/cemento): 0.4
- tipo e classe di cemento: III A - 32.5 N / IV B – 32.5 R
- classe di lavorabilità: S4

- classe di resistenza: C60/75
- classe di esposizione ambientale: XA2
- massimo rapporto a/c (acqua/cemento): 0.4
- tipo e classe di cemento: III A - 32.5 N / IV B – 32.5 R
- classe di lavorabilità: S4

Le caratteristiche del mix-design e le modalità di getto del calcestruzzo all'interno dei casseri dovranno essere tali da garantire una distribuzione omogenea impedendo la segregazione e/o la creazione di vuoti, garantendo quindi la sagomatura ed integrità dei conci e la perfetta aderenza con tutte le barre d'armatura.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|------------|----------|-----------|------|--------|------|---------|----|------------|---|-----------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>92 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 92 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 92 di 201 | | | | | | | | |

10.5.2 Requisiti miscela bicomponente

La miscela di tipo bi-componente viene utilizzata per il riempimento dello spazio anulare che si genera a tergo dei conci di rivestimento durante l'avanzamento dello scudo della TBM. Tale vuoto si crea per la differenza di diametro che si ha tra lo scudo e gli anelli di conci che compongono il rivestimento definitivo della galleria.

La miscela è costituita da:

- Una boiaccia a base cementizia, di consistenza estremamente fluida, stabile volumetricamente ed a lungo mantenimento della lavorabilità.
- Un additivo accelerante, aggiunto alla boiaccia immediatamente prima della sua iniezione, in grado di provocare una sua veloce gelificazione.

La miscela bi-componente presenta una serie di vantaggi rispetto ai sistemi di riempimento più tradizionali ed infatti il suo utilizzo si sta diffondendo sempre di più in progetti di scavo meccanizzato, sia in terreno sia in roccia.

Lo studio del mix-design di tale miscela devono garantire la fluidità nel breve termine e il sostegno necessario sia nel breve che nel lungo termine:

Stato fresco

- Fluidità iniziale della miscela: 30-45"
- Durabilità minima miscela base con inibitore: 72 h
- Bleeding: < 3% a 3 h dal confezionamento
- Bleeding: < 7% a 24 h dal confezionamento

Le prove richieste riguardano quindi la pompabilità della miscela, il mantenimento della lavorabilità per lunghi periodi, entrambe caratteristiche fondamentali per minimizzare il rischio di bloccaggio delle tubazioni.

Stato indurito

- Tempo di gelificazione compreso tra 5" e 15"
- Resistenza a compressione mono-assiale:

24 h: > 0,5 MPa

28 gg: > 3,0 MPa

Si richiede quindi un rapido sviluppo delle resistenze meccaniche, da misurare fino a 28 gg. E' importante avere una miscela con elevata stabilità volumetrica, per minimizzare il rischio di bloccaggio delle tubazioni e delle linee di pompaggio, e con una veloce e completa gelificazione in seguito all'aggiunta dell'additivo accelerante.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 93 di 201 |

10.5.3 Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 45 cm

In questo paragrafo verranno esaminate le condizioni più gravose a cui sono sottoposti i conci nelle fasi transitorie che precedono la posa in opera ed in particolare:

- Scasseratura
- Movimentazione
- Stoccaggio e trasporto
- Montaggio (sollevamento con erettore)

Oltre a queste, come condizione critica va considerata anche la fase di avanzamento dello scudo, in cui viene esercitata dai martinetti la necessaria spinta sui conci dell'ultimo anello di rivestimento posto in opera.

Si assume che per le prime due operazioni vengano effettuate quando il calcestruzzo ha raggiunto una resistenza caratteristica $R_{ck} \geq 15 \text{ N/mm}^2$.

Dopo un adeguato periodo di stoccaggio, allorché il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza caratteristica di progetto ($R_{ck} \geq 55 \text{ N/mm}^2$), si procede al trasporto in cantiere.

La posa in opera in galleria avviene tramite apposito meccanismo erettore, disposto immediatamente a tergo del dispositivo di scavo.

Le verifiche vengono eseguite considerando le condizioni statiche più gravose e la classe di armatura minore (Classe II).

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

Scasseratura

Durante la fase di scasseratura, oltre al peso proprio del concio ed alla maggiorazione per carichi dinamici, si suppone la presenza delle forze di adesione alla superficie del cassero valutata, sulla base di esperienze analoghe, in circa 2.0 kN/m².

Il calcolo delle sollecitazioni viene eseguito supponendo, cautelativamente, che il concio venga sollevato ai due lati.

La rimozione dai casseri verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 15 N/mm².

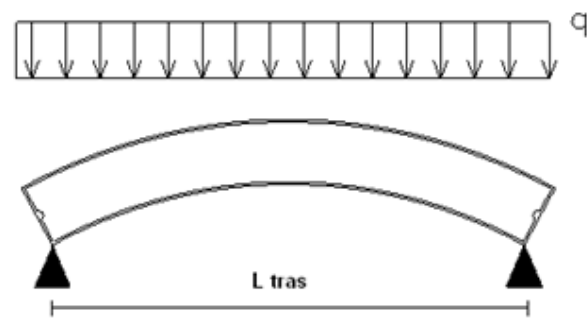
Si è ipotizzato che il concio venga agganciato e sollevato dai lati.

Le verifiche dei conci tengono conto delle loro effettive dimensioni; Lo sviluppo del singolo concio risulta pari a:

$$L_{dev} = 4.19 \text{ m}$$

La lunghezza trasversale del concio associata ad una trave equivalente posta su due appoggi all'estremità di intradosso, risulta pari a:

$$L_{tras} = 3.84 \text{ m}$$



I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.45 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 16.8 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$I P_p = 0.4 P_p = 6.75 \text{ kN/m (incremento dovuto all'effetto dinamico/vibrazioni)}$$

$$P_q = 2 \cdot 1.5 \text{ m} = 3 \text{ kN/m (incremento dovuto all'aderenza tra concio e cassero di 2 kN/m}^2)$$

$$P_{tot} = 26.55 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni massime risultano:

$$M_1 = 26.55 \cdot 3.84^2 / 8 = 48.9 \text{ kNm}$$

$$V_1 = 26.55 \cdot 3.84 / 2 = 51 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 95 di 201</p> |

$$M_{sd1} = \gamma_q M_1 = 1.5 \cdot 48.9 = 73.35 \text{ kNm}$$

$$V_{sd1} = \gamma_q V_1 = 1.5 \cdot 51 = 76.5 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda la verifica a flessione si ottiene:

$$M_{sd1} = 73.35 \text{ kNm} < M_{rd} (R_{ck}=15 \text{ MPa}) = 288.7 \text{ KNm}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento agente è inferiore al valore del momento di prima fessurazione calcolato secondo il metodo semplificato facendo riferimento alla sola sezione di calcestruzzo. Secondo tale ipotesi si ha:

$$M_{cr} = f_{ctm,fl}(b \cdot h^2/6)$$

in cui:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 1.6 \text{ MPa}$$

$$M_{sd1} = 73.35 \text{ kNm} < M_{cr} (R_{ck}=15 \text{ MPa}) = 97.9 \text{ KNm}$$

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

Si ottiene:

$$V_{sd1} \text{ max} = 76.5 < 200 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Movimentazione

Per la fase di movimentazione viene fatta l'ipotesi che il concio venga sollevato per le estremità e soggetto al peso proprio incrementato del 60% per tenere conto degli effetti dinamici.

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.45 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 16.875 \text{ kN/m (Peso proprio)}$$

$$P_p + 60\% = 1.6 \cdot P_p = 27 \text{ kN/m (dovuto ad effetti dinamici)}$$

$$P_{tot} = 27 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni massime risultano:

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 96 di 201 |

$$M_1 = 27 \cdot 3.84^2 / 8 = 49.7 \text{ kNm}$$

$$V_1 = 27 \cdot 3.84 / 2 = 51.84 \text{ kN}$$

$$M_{sd1} = \gamma_q M_1 = 1.5 \cdot 49.7 = 74.55 \text{ kNm}$$

$$V_{sd1} = \gamma_q V_1 = 1.5 \cdot 51.84 = 77.74 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono analoghe ai valori stimati con la combinazione di carico precedente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_1 = 49.7 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 1.66MPa e σ_s pari a -67.32MPa, compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

Stoccaggio dei conci dalla scasseratura alla completa maturazione

I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 4 elementi. Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12x10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10x8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

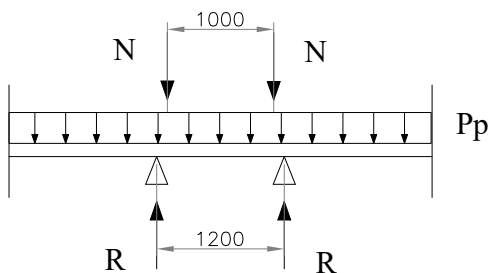
La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso dell'ultimo concio, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci in questa fase verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 15 N/mm².

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.45 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 16.87 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(16.87 \cdot 4.19 \cdot 2) + (16.87 \cdot 4.19 \cdot 1.5)] / 2 = (141.37 + 106.02) / 2 = 123.7 \text{ kN}$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 16.87 \cdot 4.19 / 2 + 123.7 = 159 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

Sezione di appoggio

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|-----------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 97 di 201 |

$$M_{3a} = 16.87 \cdot (4.19 / 2 - 0.6)^2 / 2 = 18.8 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 16.87 \cdot (4.19 / 2 - 0.6) = 25.2 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 18.8 = 28.2 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 25.2 = 37.8 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 16.87 \cdot (4.19 / 2 - 0.5)^2 / 2 - 159 \cdot 0.1 = 5.55 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 16.87 \cdot (4.19 / 2 - 0.5) - 159 = -132.1 \text{ kN}$$

$$M_{ud3b} = 1.5 \cdot 5.57 = 8.355 \text{ kNm}$$

$$V_{ud3b} = 1.5 \cdot 131.1 = 196.65 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 16.87 \cdot (4.19 / 2)^2 / 2 - 159 \cdot 0.6 + 123.7 \cdot 0.5 = 3.47 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 16.87 \cdot (4.19 / 2) - 159 + 123.7 = 0.04265 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 1.5 \cdot 3.47 = 5.2 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3c} = 0.0639 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime ricavate precedentemente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_{3a} = 18.8 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 0.63 MPa e σ_s pari a -25.47 MPa , compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Stoccaggio dei conci in cantiere

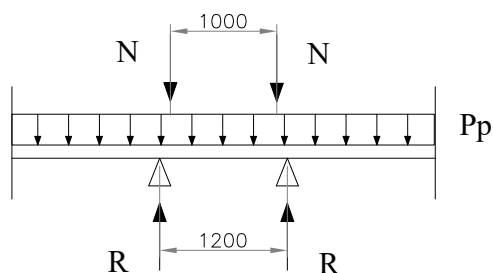
I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 7 elementi (un'anello completo). Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10×8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso degli ultimi due conci, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci alla completa maturazione verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 55 N/mm².

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.45 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 16.87 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(16.87 \cdot 4.19 \cdot 4) + (16.87 \cdot 4.19 + 16.87 \cdot 2.38) \cdot 1.5] \cdot 0.5 = 224.5 \text{ kN}$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 16.87 \cdot 4.19 \cdot 0.5 + 224.5 = 260 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni nel concio risultano:

Sezione di appoggio

$$M_{3a} = 16.87 (4.19 / 2 - 0.6)^2 / 2 = 18.85 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 16.87 (4.19 / 2 - 0.6) = 25.22 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 18.85 = 28.27 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 25.22 = 37.83 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 16.87 (4.19 / 2 - 0.5)^2 / 2 - 260 \cdot 0.1 = -4.5 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 16.87 (4.19 / 2 - 0.5) - 260 = -233.1 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 99 di 201</p> |

$$M_{sd3b} = 1.5 \cdot -4.5 = -6.75 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3b} = 1.5 \cdot 233.1 = 349.65 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 16.87 (4.19 / 2)^2 / 2 - 260 \cdot 0.6 + 224.5 \cdot 0.5 = -6.73 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 16.87 (4.19 / 2) - 260 + 224.5 = -0.15 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 1.5 \cdot -6.73 = -8.85 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3c} = -0.23 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda la verifica a flessione si ottiene:

$$M_{sd3a} = 28.27 \text{ kNm} < M_{rd} (R_{ck}=55 \text{ MPa}) = 336.2 \text{ KNm}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

Si ottiene:

$$V_{sd3b} = 349.65 > V_{rd} 309.4 \text{ kN}$$

Considerando l'armatura a taglio predisposta nel concio, $V_{rsd}=685.1\text{kN}$ e $V_{rcd}=2741.4\text{kN}$ risultano superiori a V_{sd3b} .

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_{3a} = 18.85 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 0.63MPa e σ_s pari a -25.53MPa , compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

Montaggio dei conci

Il concio viene sollevato dall'erettore tramite due inserti di presa collocati in corrispondenza del centro e quindi si comporta staticamente come una trave su un unico appoggio.

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_{tot} = 27 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

$$M_4 = \frac{1}{2} \cdot 27 \cdot 2.1^2 = 59.535 \text{ kNm}$$

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 100 di 201 |

$$V_4 = 27 \cdot 2.1 / 2 = 28.35 \text{ kN}$$

$$M_{sd4} = 1.5 \cdot 59.535 = 89.3 \text{ kNm}$$

$$V_{sd4} = 1.5 \cdot 28.35 = 42.5 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime ricavate precedentemente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_4 = 59.535 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 1.98MPa e σ_s pari a -80.64MPa, compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

$$M_4 = 59.535 \text{ kNm} < M_{cr} (R_{ck}=55 \text{ MPa}) = 177.2 \text{ kNm}$$

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Sforzi dovuti alla spinta dei martinetti

La massima forza prevista per la spinta dello scudo nelle fasi ordinarie di montaggio dei conci risulta pari a $N_{max} = 100.000$ kN; in situazioni del tutto particolari, con l'adozione di opportuni accorgimenti sul sistema oleodinamico di spinta, è possibile raggiungere, per intervalli di tempo molto brevi, il valore eccezionale di $N = 130.000$ kN (valore massimo che può essere ottenuto dal circuito idraulico).

Si ipotizza che la spinta è fornita da 19 coppie di martinetti provvisti di piastra di ripartizione dalle dimensioni di 350×1400 mm.

Si ipotizza che il carico concentrato di ogni singolo martinetto sia trasferito dalla piastra di ripartizione e applicato al concio attraverso l'area di contatto costituita da un ringrosso sulla faccia di dimensioni $0.35 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$.

Verifica alla pressione di contatto – C45/55

Tale verifica è stata condotta in base al punto 6.7 dell'Eurocodice 2 (2004):

$$A_{c0} = d_1 \cdot b_1 \text{ (dimensioni dell'area di carico)}$$

$$A_{c1} = d_2 \cdot b_2 \text{ (dimensioni dell'area di diffusione)}$$

Si considera a favore di sicurezza un'eccentricità tra l'asse dei martinetti di spinta e l'asse del concio pari a:

$$e = 2 \text{ cm}$$

$$b_1 = (45/2 - 2) \cdot 2 = 41 \text{ cm}$$

$$d_1 = 140 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = 0.41 \times 1.40 = 0.574 \text{ m}^2$$

$$b_2 = b_1 + 2s$$

$$s = 2 \text{ cm (disassamento laterale)}$$

$$b_2 = 45 \text{ cm}$$

$$d_2 = 144 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = 0.45 \times 1.44 = 0.648 \text{ m}^2$$

$$N_u \leq F_{rdu} \leq F_{max}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta ordinaria*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.574 \times 25.5 \times 10^3 \times (0.648/0.574)^{0.5} = 15551 \text{ kN}$$

$$F_{max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 25.5 \times 10^3 \times 0.574 = 43911 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 102 di 201</p> |

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq Fr_{du} = 15551 \text{ kN} \leq F_{\max} = 43911 \text{ KN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$N_u = 6842 \leq Fr_{du} \leq F_{\max}$$

Verifica alla pressione di contatto – C55/67

Tale verifica è stata condotta in base al punto 6.7 dell'Eurocodice 2 (2004):

$$A_{c0} = d_1 \cdot b_1 \text{ (dimensioni dell'area di carico)}$$

$$A_{c1} = d_2 \cdot b_2 \text{ (dimensioni dell'area di diffusione)}$$

Si considera a favore di sicurezza un'eccentricità tra l'asse dei martinetti di spinta e l'asse del concio pari a:

$$e = 2 \text{ cm}$$

$$b_1 = (45/2 - 2) \cdot 2 = 41 \text{ cm}$$

$$d_1 = 140 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = 0.41 \times 1.40 = 0.574 \text{ m}^2$$

$$b_2 = b_1 + 2s$$

$$s = 2 \text{ cm (disassamento laterale)}$$

$$b_2 = 45 \text{ cm}$$

$$d_2 = 144 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = 0.45 \times 1.44 = 0.648 \text{ m}^2$$

$$N_u \leq Fr_{du} \leq F_{\max}$$


- *Verifiche in condizioni di spinta ordinaria*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$Fr_{du} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.574 \times 31.5 \times 10^3 \times (0.648/0.574)^{0.5} = 19211 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 31.5 \times 10^3 \times 0.574 = 54243 \text{ KN}$$

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>103 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 103 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 103 di 201 | | | | | | | | |

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq Fr_{du} = 19211 \text{ kN} \leq F_{\max} = 54243 \text{ KN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$N_u = 6842 \leq Fr_{du} \leq F_{\max}$$

Verifica di resistenza alle trazioni indotte

La spinta del martinetto determina forze di divaricamento sul concio in direzione radiale; tali forze possono essere stimate secondo la formula proposta da Leonhardt:

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d)$$

dove:

Z = forza di trazione risultante

a = larghezza della superficie di applicazione del carico = 0.35 m

d = altezza della sezione = 0.45 m

Nu = forza concentrata agente, dovuta alla spinta di un martinetto

- *Verifiche in condizione di spinta ordinaria*

o Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 7894.7 (1 - 0.35 / 0.45) = 526 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.4 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = 526 / 1.4 \text{ m} = 375 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento è:

$$A_s = 375 \times 10^3 / 391 = 961 \text{ mm}^2 / \text{m} = 9.61 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

o Il valore della sollecitazione agli SLE ($\gamma_q = 1$) è pari a:

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

$$N_u = 1 \times 100000 / 19 = 5263 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 5263 (1 - 0.35 / 0.45) = 351 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.2 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = 351 / 1.4 \text{ m} = 251 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento considerando un tasso di lavoro ridotto per l'acciaio pari a 210 MPa è:

$$A_s = 251 \times 10^3 / 210 = 1195 \text{ mm}^2 / \text{m} = 11.95 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2,$$

Il frettaggio previsto lavora ad una tensione media di 166MPa, permettendo di contenere il quadro fessurativo anche in questa condizione di carico di breve durata.

- *Verifiche in condizione di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 6842 (1 - 0.35 / 0.45) = 451.6 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.2 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = 451.6 / 1.4 \text{ m} = 322.6 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento è:

$$A_s = 322.6 \times 10^3 / 391 = 825 \text{ mm}^2 / \text{m} = 8.25 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

Come si evince in tutti gli scenari analizzati, l'armatura di frettaggio di progetto risulta sempre superiore ai quantitativi minimi di armatura richiesti dal calcolo.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Sollecitazioni dovute al peso dell'anello completo

Si propone una verifica relativa alle sollecitazioni agenti sui connettori nello scenario sfavorevole di anello completo in condizioni “sospese” all’anello precedente.

Il peso dell’intero anello costituito da 6+1 conci prefabbricati risulta pari a:

$$P_{\text{tot}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1.5\text{m} \times \pi(R_e^2 - R_i^2) = 447 \text{ kN}$$

questo agisce con uno sforzo di taglio (ripartito su 19 connettori complessivi) pari a:

$$T = P/19 = 23.6 \text{ kN}$$

Elementi accessori del rivestimento

Il sistema di collegamento longitudinale tra gli anelli di rivestimento non prevede più bulloni metallici sui giunti (previsti nel PE in prima fase): il collegamento sui giunti circolari è ora garantito per mezzo di connettori o equivalenti (in numero di quattro per i conci ordinari e in numero di due per il concio di chiave) mentre su quelli longitudinali attraverso le barre guida in polipropilene FAMA o equivalenti. I connettori, montati durante il posizionamento dei conci, devono garantire in fase di esercizio un'adeguata continuità tra gli anelli contrastando in particolare la reazione dovuta allo schiacciamento della coppia di guarnizioni.

Guarnizioni di tenuta idraulica

Le guarnizioni utilizzate risultano annegate nel getto, e questo rappresenta un indubbio vantaggio eliminando qualsiasi rischio di scollamento o cattiva disposizione sulle facce; esse entrano in contatto tra di loro e schiacciandosi permettono di sigillare i giunti: vengono progettate in base alle specifiche esigenze di tenuta idraulica. Si prevede che nell’assetto finale ciascun concio debba essere posizionato, dopo il montaggio dell’intero anello, esattamente nella posizione prevista in progetto, con tutti i giunti circolari e radiali allineati tra loro e perfettamente a contatto, in modo da garantire lo schiacciamento necessario affinché si realizzi la richiesta tenuta idraulica. Sono ammessi degli scostamenti minimi dalla posizione teorica di ciascun concio ed anello con determinate tolleranze di seguito indicate.

Per l'alloggiamento delle guarnizioni, previste annegate nel getto, si predispone sulle facce dei conci un'opportuna cava. Lo “schiacciamento” tra le due guarnizioni deve essere tale da garantire l'impermeabilità sotto il massimo carico idraulico previsto, pari in questo caso a circa 9 bar, e si tiene conto di eventuali disallineamenti relativi (offset) delle due guarnizioni o del non perfetto contatto (gap) dei ringrossi delle facce dei conci. Il ringrosso previsto è nel caso in esame pari a 3mm per parte.

Si è considerata una situazione in cui il gap è dell'ordine di 2mm in concomitanza con un disallineamento (offset) delle guarnizioni di 10mm (vedi figura).

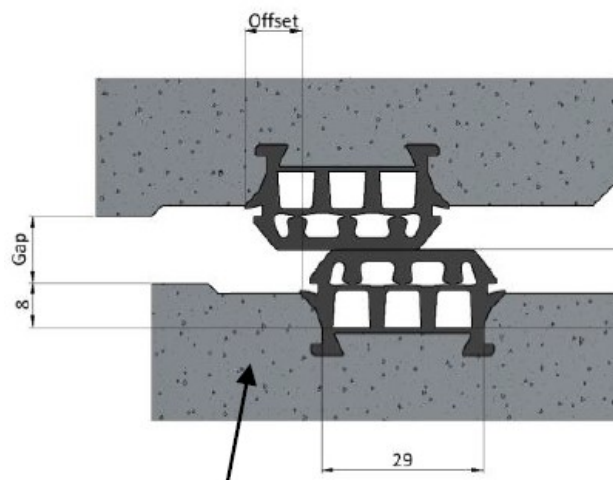
Siccome la prova effettuata dal fornitore è stata realizzata tra due facce aventi ringrosso di 2mm per parte, per definire la pressione idrostatica sostenibile dalla guarnizione attraverso il grafico seguente si definisce un gap totale

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 106 di 201 |

pari alla somma del gap di montaggio (2mm) e dell'ulteriore gap che è dovuto alla configurazione geometrica delle facce nel caso specifico (2mm) per un totale di 4mm.

In queste condizioni, come evidente dalla figura seguente, la pressione idrostatica sostenibile è molto superiore (20bar), anche con un adeguato coefficiente di sicurezza, al massimo battente idraulico ipotizzato ($P_w=9$ bar).



Schema guarnizione con offset nella prova del fornitore

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 107 di 201 |

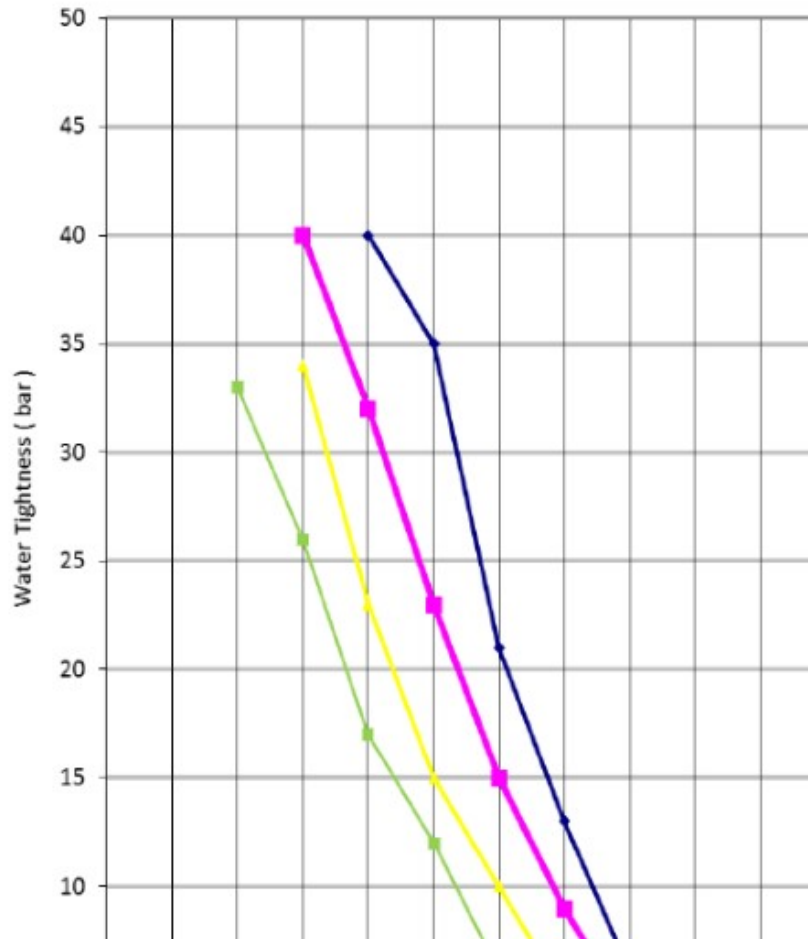


Diagramma di tenuta dell'acqua e geometrie della guarnizione di riferimento

LOAD DEFLECTION DIAGRAM FOR PROFILE UG018A

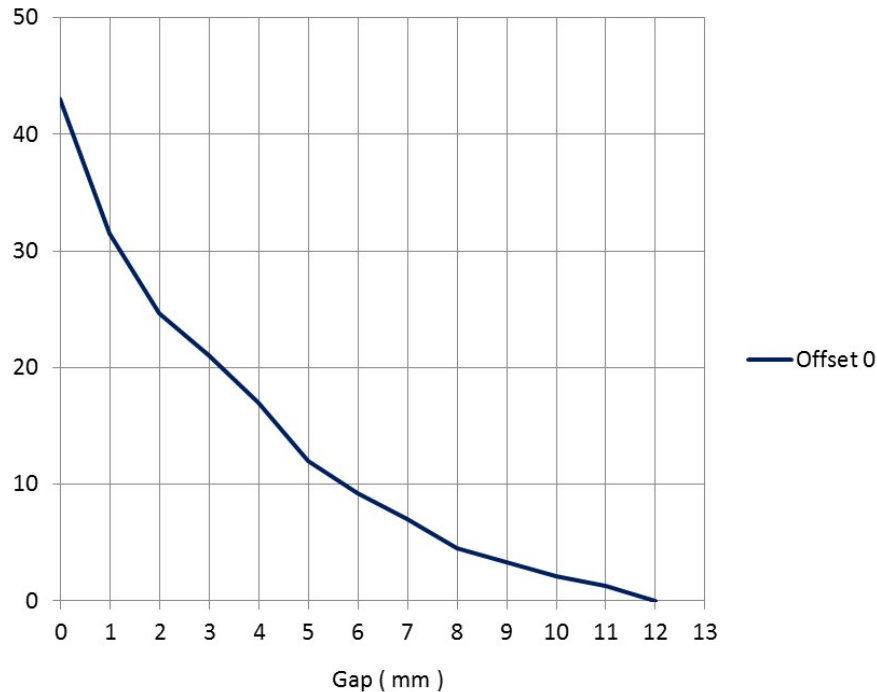


Diagramma di carico/deformazione profilo

Come si è detto precedentemente si prevede che ciascun concio ed anello debbano essere posizionati geometricamente esattamente come previsto in progetto, con tolleranze geometriche minime.

Ad ulteriore garanzia di un corretto montaggio del concio nella fase transitoria di predisposizione dell'anello si definisce comunque la forza minima di spinta dei martinetti sui concii che in fase di montaggio favorisce il contatto delle facce dei giunti.

La guarnizione, quando completamente compressa, offre una reazione di 25 kN/m. Di conseguenza la forza complessiva di reazione sulla faccia circonferenziale del concio è:

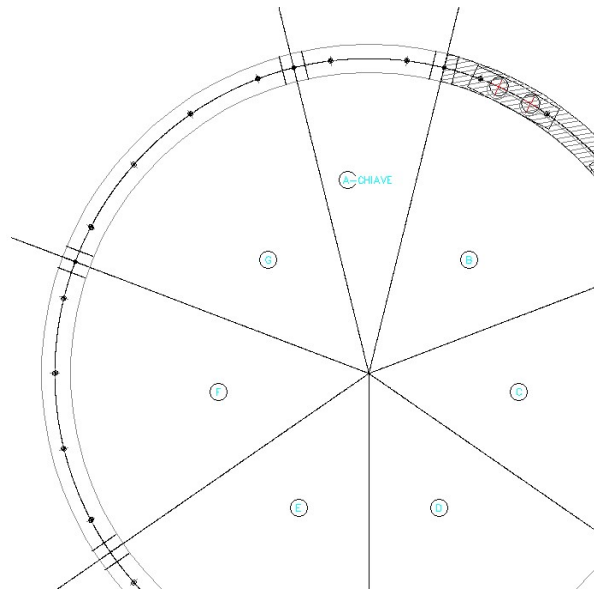
$$F_{g,an} = 25 \text{ kN/m} \cdot 4.19 \text{ m} = 104.75 \text{ kN}$$

Essendo previste 3 coppie di cilindri idraulici per concio, la spinta minima che deve essere corrisposta dalla singola coppia di martinetti al concio è pari a:

$$F_{1,min} = F_{g,an} / 3 = 34.92 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda il giunto longitudinale tra conci dello stesso anello si considera il caso più sfavorevole in cui, in fase di montaggio dell'anello, un concio si trovi ad avere la pressione della guarnizione nella parte superiore, ed inferiormente nessun concio su cui appoggiarsi (figura sotto). In questa condizione sul concio insistono le seguenti azioni verticali:

- Peso proprio: $P = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot V_{\text{concio}} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 4.19\text{m} \cdot 1.50\text{m} \cdot 0.45 = 71 \text{ kN}$
- Spinta guarnizione: $S = 25 \text{ kN/m} \cdot L_{\text{concio}} = 25 \text{ kN/m} \cdot 1.50\text{m} = 37.5 \text{ kN}$




Caso sfavorevole di verifica della guarnizione nei giunti longitudinali

Pertanto affinché il concio sia in equilibrio, ai suoi estremi longitudinali devono essere presenti delle reazioni vincolari pari a:

$$R_v = (P+S)/2 = 54.1 \text{ kN}$$

Nel giunto circonferenziale posteriore il taglio è fornito dai connettori, nella faccia frontale invece il meccanismo resistente è l'attrito che si sviluppa tra la scarpa dei martinetti e l'area di trasmissione del carico del concio, esprimibile come:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>110 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 110 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 110 di 201 | | | | | | | | |

$$V_{Rd,fric} = \mu \cdot N_{Ed} \quad \rightarrow \quad N_{Ed,min} = R_v / 0.5 = 108.2 \text{ kN}$$

dove:

N_{Ed} [kN/m]: spinta totale agente sul concio

μ [-]: coefficiente di attrito tra le interfacce (acciaio-calcestruzzo: $\mu = 0.5$)

La spinta minima che deve essere corrisposta dalla singola coppia di martinetti al concio è quindi pari a:

$$F_{2,min} = N_{Ed,min} / 2 = 108.2 \text{ kN}$$

Connettori meccanici

I connettori scelti presentano le seguenti caratteristiche (scheda tecnica in Allegato):

Resistenza a trazione:

per rottura del connettore $S_m = 100 \text{ kN}$

resistenza di progetto $S_r = S_m / \gamma_a = 100 / 1.15 = 87 \text{ kN}$

Resistenza al taglio:

per rottura del connettore $T_m = 160 \text{ kN}$

resistenza di progetto $T_r = T_m / \gamma_a = 160 / 1.15 = 139 \text{ kN}$

La massima forza di compressione nella guarnizione con un disallineamento di 0 mm e un gap di soli 2mm (facce a contatto) risulta pari a $R=25\text{kN/m}$.

La reazione che si sviluppa lungo tutta la faccia circonferenziale del concio è:

$$F = R \times 4.19\text{m} = 104.75 \text{ kN}$$

A favore di sicurezza si prevede che in fase di esercizio solo tre connettori possano funzionare per una possibile rottura del quarto in fase di montaggio.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Conseguentemente la forza di trazione competente a ciascun connettore è:

$$S = F/3 = 35 \text{ kN}$$

$$F_d = F \times \gamma_{gtu} = 52.5 \text{ kN}$$

$$F_d < S_r = 87 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda il giunto longitudinale (tra conci di uno stesso anello) la reazione dovuta allo schiacciamento della relativa coppia di guarnizioni agisce come taglio sul sistema costituito dai due connettori più prossimi al giunto:

$$F = R \times 1.50 \text{ m} = 37.5 \text{ kN}$$

$$T = F / 2 = 18.75 \text{ kN}$$

$$T_d = T \times \gamma_{gtu} = 28.1 \text{ kN}$$

$$T_d < T_r = 139 \text{ kN}$$

Il fattore di riduzione γ_a adottato è pari a 1.15, uguale a quello adottato per l'acciaio nelle verifiche agli Stati limite, compatibilmente con quanto dettato dalla Normativa. Tale situazione di verifica è, tuttavia, legata all'errata manovra e quindi non utile per la statica della galleria.

Viene di seguito presa in considerazione la sollecitazione agente sui connettori a seguito di una temporanea sospensione del singolo concio ai soli connettori (errata manovra dei martinetti).

Tale condizione di carico non è in alcun modo prevista nella normale procedura di montaggio. Risulta tuttavia opportuno verificare che, nel caso in cui un evento accidentale provochi la sospensione del concio, la resistenza dei connettori garantisca la sicurezza impedendo la caduta del concio stesso. Si considera nelle verifiche il contributo di soli due connettori.

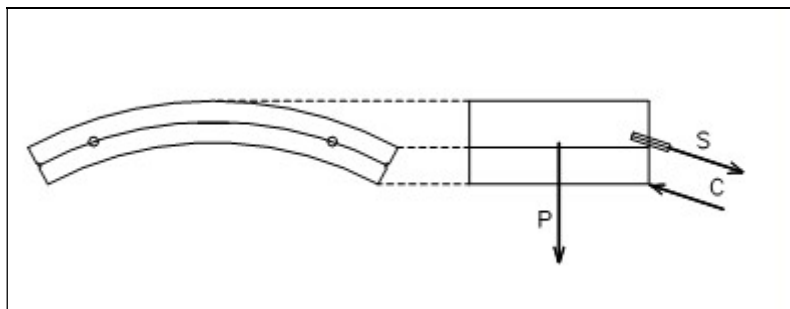
Il peso del concio è:

$$P = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0.45\text{m} \times 1.5\text{m} \times 4.19\text{m} = 71 \text{ kN}$$

questo agisce con uno sforzo di taglio (ripartito su 2 connettori) pari a

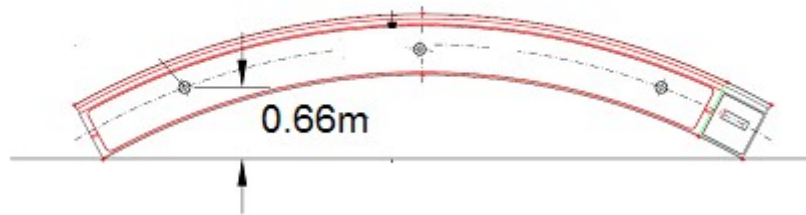
$$T = P/2 = 35.3 \text{ kN} < T_r$$

Al momento flettente si oppone la coppia di forze data dalla trazione sui connettori e dalla compressione sui punti più bassi dove il concio si appoggia all'anello adiacente. Considerando collaboranti due soli connettori, la condizione più sfavorevole si presenta per l'assenza dei connettori centrali; in questo caso il braccio della coppia è il minimo possibile (vedi figura sotto):



Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 112 di 201 |



$$M = P \times (1.5/2) = 47.3 \text{ kN m}$$

$$M = 3 \times S \times b_{\min}$$

con $b_{\min} = 0.66 \text{ m}$

Si ricava quindi la forza di trazione sul singolo connettore:

$$S = M / (2 \times b_{\min}) = 36 \text{ kN}$$

$$S_d = S \times \gamma_{gtu} = 53.75 \text{ kN}$$

$$S_d < S_r = 87 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 113 di 201 |

10.5.4 Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 50 cm

In questo paragrafo verranno esaminate le condizioni più gravose a cui sono sottoposti i conci nelle fasi transitorie che precedono la posa in opera ed in particolare:

- Scasseratura
- Movimentazione
- Stoccaggio e trasporto
- Montaggio (sollevamento con erettore)

Oltre a queste, come condizione critica va considerata anche la fase di avanzamento dello scudo, in cui viene esercitata dai martinetti la necessaria spinta sui conci dell'ultimo anello di rivestimento posto in opera.

Si assume che per le prime due operazioni vengano effettuate quando il calcestruzzo ha raggiunto una resistenza caratteristica $R_{ck} \geq 15 \text{ N/mm}^2$.

Dopo un adeguato periodo di stoccaggio, allorché il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza caratteristica di progetto ($R_{ck} \geq 55 \text{ N/mm}^2$), si procede al trasporto in cantiere.

La posa in opera in galleria avviene tramite apposito meccanismo erettore, disposto immediatamente a tergo del dispositivo di scavo.

Le verifiche vengono eseguite considerando le condizioni statiche più gravose e la classe di armatura minore (Classe IV).

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

Scasseratura

Durante la fase di scasseratura, oltre al peso proprio del concio ed alla maggiorazione per carichi dinamici, si suppone la presenza delle forze di adesione alla superficie del cassero valutata, sulla base di esperienze analoghe, in circa 2.0 kN/m².

Il calcolo delle sollecitazioni viene eseguito supponendo, cautelativamente, che il concio venga sollevato ai due lati.

La rimozione dai casseri verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 15 N/mm².

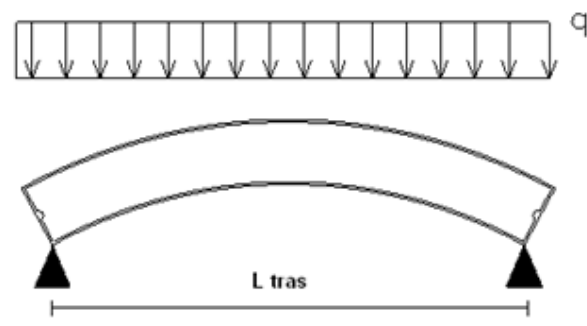
Si è ipotizzato che il concio venga agganciato e sollevato dai lati.

Le verifiche dei conci tengono conto delle loro effettive dimensioni; Lo sviluppo del singolo concio risulta pari a:

$$L_{dev} = 4.2 \text{ m}$$

La lunghezza trasversale del concio associata ad una trave equivalente posta su due appoggi all'estremità di intradosso, risulta pari a:

$$L_{tras} = 3.84 \text{ m}$$



I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$I P_p = 0.4 P_p = 7.5 \text{ kN/m (incremento dovuto all'effetto dinamico/vibrazioni)}$$


$$P_q = 2 \cdot 1.5 \text{ m} = 3 \text{ kN/m (incremento dovuto all'aderenza tra concio e cassero di 2 kN/m}^2)$$

$$P_{tot} = 29.25 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni massime risultano:

$$M_1 = 29.25 \cdot 3.84^2 / 8 = 53.9 \text{ kNm}$$

$$V_1 = 29.25 \cdot 3.84 / 2 = 56.2 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 115 di 201</p> |

$$M_{sd1} = \gamma_q M_1 = 1.5 \cdot 53.9 = 80.9 \text{ kNm}$$

$$V_{sd1} = \gamma_q V_1 = 1.5 \cdot 56.2 = 84.2 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda la verifica a flessione si ottiene:

$$M_{sd1} = 80.9 \text{ kNm} < M_{rd} (R_{ck}=15 \text{ MPa}) = 425.4 \text{ KNm}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_1 = 53.9 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 1.45MPa e σ_s pari a -63.92MPa, compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento agente è inferiore al valore del momento di prima fessurazione calcolato secondo il metodo semplificato facendo riferimento alla sola sezione di calcestruzzo. Secondo tale ipotesi si ha:

$$M_{cr} = f_{ctm,fl}(b \cdot h^2/6)$$

in cui:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 1.6 \text{ MPa}$$

$$M_{sd1} = 80.9 \text{ kNm} < M_{cr} (R_{ck}=15 \text{ MPa}) = 120.9 \text{ KNm}$$

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

Si ottiene:

$$V_{sd1} \text{ max} = 84.2 < 229 \text{ kN} (V_{Rd} \text{ sezione non armata a taglio})$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Movimentazione

Per la fase di movimentazione viene fatta l'ipotesi che il concio venga sollevato per le estremità e soggetto al peso proprio incrementato del 60% per tenere conto degli effetti dinamici.

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m} \text{ (Peso proprio)}$$

$$P_p + 60\% = 1.6 \cdot P_p = 30 \text{ kN/m} \text{ (dovuto ad effetti dinamici)}$$

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 116 di 201 |

$$P_{tot} = 30 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni massime risultano:

$$M_1 = 30 \cdot 3.84^2 / 8 = 55.3 \text{ kNm}$$

$$V_1 = 30 \cdot 3.84 / 2 = 57.6 \text{ kN}$$

$$M_{sd1} = \gamma_q M_1 = 1.5 \cdot 55. = 83 \text{ kNm}$$

$$V_{sd1} = \gamma_q V_1 = 1.5 \cdot 57.6 = 86.4 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_1 = 55.3 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 1.49MPa e σ_s pari a -65.58MPa, compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

Le sollecitazioni sui conci sono analoghe ai valori stimati con la combinazione di carico precedente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Stoccaggio dei conci dalla scasseratura alla completa maturazione

I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 4 elementi. Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12x10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10x8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

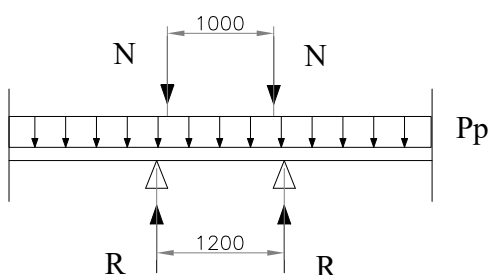
La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso dell'ultimo concio, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci in questa fase verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 15 N/mm².

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(18.75 \cdot 4.19 \cdot 2) + (18.75 \cdot 4.19 \cdot 1.5)] / 2 = 137.48 \text{ kN}$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 18.75 \cdot 4.19 / 2 + 137.48 = 176.8 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 117 di 201</p> |

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

Sezione di appoggio

$$M_{3a} = 18.75 \cdot (4.19 / 2 - 0.6)^2 / 2 = 20.95 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 18.75 \cdot (4.19 / 2 - 0.6) = 28.03 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 20.95 = 31.4 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 28.03 = 42 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 18.75 \cdot (4.19 / 2 - 0.5)^2 / 2 - 176.8 \cdot 0.1 = 6.17 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 18.75 \cdot (4.19 / 2 - 0.5) - 176.8 = -129.1 \text{ kN}$$

$$M_{ud3b} = 1.5 \cdot 6.17 = 9.26 \text{ kNm}$$

$$V_{ud3b} = 1.5 \cdot 129.1 = 194 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 18.75 \cdot (4.19 / 2)^2 / 2 - 176.8 \cdot 0.6 + 137.5 \cdot 0.5 = 3.83 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 18.75 \cdot (4.19 / 2) - 176.8 + 137.5 = 0 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 1.5 \cdot 3.83 = 5.7 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3c} = 0.0 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime ricavate precedentemente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_{3a} = 20.95 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 0.56 MPa e σ_s pari a -24.85 MPa , compatibili con i limiti di Normativa.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Stoccaggio dei conci in cantiere

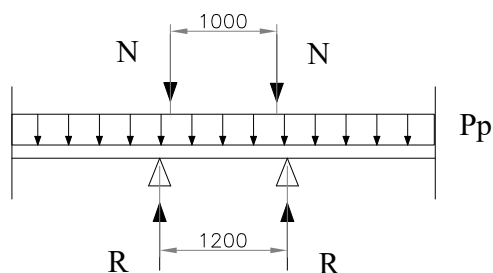
I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 7 elementi (un'anello completo). Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10×8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso degli ultimi due conci, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci alla completa maturazione verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 55 N/mm².

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(18.75 \cdot 4.19 \cdot 4) + (18.75 \cdot 4.19 + 18.75 \cdot 2.38) \cdot 1.5] \cdot 0.5 = 230$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 18.75 \cdot 4.19 \cdot 0.5 + 230 = 269.3 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni nel concio risultano:

Sezione di appoggio

$$M_{3a} = 18.75 (4.19 / 2 - 0.6)^2 / 2 = 20.9 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 18.75 (4.19 / 2 - 0.6) = 28 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 20.9 = 31.35 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 28 = 42 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 18.75 (4.19 / 2 - 0.5)^2 / 2 - 269.3 \cdot 0.1 = -3.1 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 18.75 (4.19 / 2 - 0.5) - 269.3 = -239.4 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 119 di 201</p> |

$$M_{sd3b} = 1.5 \cdot -3.1 = -4.65 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3b} = 1.5 \cdot 239.4 = 359.1 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 18.75 (4.19 / 2)^2 / 2 - 269.3 \cdot 0.6 + 230 \cdot 0.5 = -5.4 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 18.75 (4.19 / 2) - 269.3 + 230 = -0.019 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 1.5 \cdot -5.4 = -8.1 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3c} = 0 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_{3a} = 20.90 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 0.56 MPa e σ_s pari a -24.79 MPa , compatibili con i limiti di Normativa.

Montaggio dei conci

Il concio viene sollevato dall'erettore tramite due inserti di presa collocati in corrispondenza del centro e quindi si comporta staticamente come una trave su un unico appoggio.

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_{tot} = 27 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

$$M_4 = \frac{1}{2} \cdot 27 \cdot 2.1^2 = 59.535 \text{ kNm}$$

$$V_4 = 27 \cdot 2.1 / 2 = 28.35 \text{ kN}$$

$$M_{sd4} = 1.5 \cdot 59.535 = 89.3 \text{ kNm}$$

$$V_{sd4} = 1.5 \cdot 28.35 = 42.5 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime ricavate precedentemente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

Per quanto riguarda il controllo delle tensioni nei materiali strutturali, dalla verifica a pressoflessione allo SLE con $M_4 = 59.535 \text{ kNm}$ risulta σ_c pari a 1.60 MPa e σ_s pari a -70.60 MPa , compatibili con i limiti di Normativa.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

La verifica a fessurazione è soddisfatta in quanto il momento è inferiore al valore di prima fessurazione.

$$M_{sd1} = 89.3 \text{ kNm} < M_{cr} (R_{ck}=50 \text{ MPa}) = 269.7 \text{ kNm}$$

Sforzi dovuti alla spinta dei martinetti

La massima forza prevista per la spinta dello scudo nelle fasi ordinarie di montaggio dei conci risulta pari a $N_{max} = 100.000 \text{ kN}$; in situazioni del tutto particolari, con l'adozione di opportuni accorgimenti sul sistema oleodinamico di spinta, è possibile raggiungere, per intervalli di tempo molto brevi, il valore eccezionale di $N = 130.000 \text{ kN}$ (valore massimo che può essere ottenuto dal circuito idraulico).

Si ipotizza che la spinta è fornita da 19 coppie di martinetti provvisti di piastra di ripartizione dalle dimensioni di $350 \times 1400 \text{ mm}$.

Si ipotizza che il carico concentrato di ogni singolo martinetto sia trasferito dalla piastra di ripartizione e applicato al concio attraverso l'area di contatto costituita da un ringrosso sulla faccia di dimensioni $0.35 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$.

Verifica alla pressione di contatto – C55/67

Tale verifica è stata condotta in base al punto 6.7 dell'Eurocodice 2 (2004):

$$A_{c0} = d_1 b_1 \text{ (dimensioni dell'area di carico)}$$

$$A_{c1} = d_2 b_2 \text{ (dimensioni dell'area di diffusione)}$$

Si considera a favore di sicurezza un'eccentricità tra l'asse dei martinetti di spinta e l'asse del concio pari a:

$$e = 2 \text{ cm}$$

$$b_1 = (50/2 - 2) 2 = 46 \text{ cm}$$

$$d_1 = 140 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = 0.46 \times 1.40 = 0.644 \text{ m}^2$$

$$b_2 = b_1 + 2s$$

$$s = 2 \text{ cm (disassamento laterale)}$$

$$b_2 = 50 \text{ cm}$$


$$d_2 = 144 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = 0.50 \times 1.44 = 0.72 \text{ m}^2$$

$$N_u \leq F r_{du} \leq F_{max}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta ordinaria*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>121 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 121 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 121 di 201 | | | | | | | | |

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.644 \times 31.2 \times 10^3 \times (0.72/0.644)^{0.5} = 21245 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 31.2 \times 10^3 \times 0.644 = 60278 \text{ kN}$$

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq F_{rdu} = 21245 \text{ kN} \leq F_{\max} = 60278 \text{ kN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$N_u = 6842 \leq F_{rdu} \leq F_{\max}$$

Verifica alla pressione di contatto – C60/75

Tale verifica è stata condotta in base al punto 6.7 dell'Eurocodice 2 (2004):

$$A_{c0} = d_1 \cdot b_1 \text{ (dimensioni dell'area di carico)}$$

$$A_{c1} = d_2 \cdot b_2 \text{ (dimensioni dell'area di diffusione)}$$

Si considera a favore di sicurezza un'eccentricità tra l'asse dei martinetti di spinta e l'asse del concio pari a:

$$e = 2 \text{ cm}$$

$$b_1 = (50/2 - 2) \cdot 2 = 46 \text{ cm}$$

$$d_1 = 140 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = 0.46 \times 1.40 = 0.644 \text{ m}^2$$

$$b_2 = b_1 + 2s$$

$$s = 2 \text{ cm (disassamento laterale)}$$

$$b_2 = 50 \text{ cm}$$

$$d_2 = 144 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = 0.50 \times 1.44 = 0.72 \text{ m}^2$$

$$N_u \leq F_{rdu} \leq F_{\max}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta ordinaria*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>122 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 122 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 122 di 201 | | | | | | | | |

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.644 \times 34 \times 10^3 \times (0.72/0.644)^{0.5} = 23151 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 34 \times 10^3 \times 0.644 = 65280 \text{ kN}$$

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq F_{rdu} = 23151 \text{ kN} \leq F_{\max} = 65280 \text{ kN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$N_u = 6842 \leq F_{rdu} \leq F_{\max}$$

Verifica di resistenza alle trazioni indotte

La spinta del martinetto determina forze di divaricamento sul concio in direzione radiale; tali forze possono essere stimate secondo la formula proposta da Leonhardt:

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d)$$

dove:

Z = forza di trazione risultante

a = larghezza della superficie di applicazione del carico = 0.4 m

d = altezza della sezione = 0.5 m

N_u = forza concentrata agente, dovuta alla spinta di un martinetto

- *Verifiche in condizione di spinta ordinaria*

o Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q = 1.5$) è pari a:

$$N_u = 1.5 \times 100.000 / 19 = 7894.7 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 7894.7 [1 - (0.4 / 0.5)] = 473.7 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.4 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = Z/1.4 \text{ m} = 338.3 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento è:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>123 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 123 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 123 di 201 | | | | | | | | |

$$A_s = z \times 10^3 / 391 = 865.3 \text{ mm}^2 / \text{m} = 8.7 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

○ Il valore della sollecitazione agli SLE ($\gamma_q=1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 100000 / 19 = 5263 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 5263 (1 - 0.4 / 0.5) = 316 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.2 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = 316 / 1.4 \text{ m} = 225.5 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento considerando un tasso di lavoro ridotto per l'acciaio pari a 210 MPa è:

$$A_s = 225.5 \times 10^3 / 210 = 1074.1 \text{ mm}^2 / \text{m} = 10.7 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

Il frettaggio previsto lavora ad una tensione media di 149MPa, permettendo di contenere il quadro fessurativo anche in questa condizione di carico di breve durata.

- *Verifiche in condizione di spinta eccezionale*

Il valore della sollecitazione agli SLU ($\gamma_q=1$) è pari a:

$$N_u = 1 \times 130.000 / 19 = 6842 \text{ kN}$$

$$Z = 0.3 N_u (1 - a/d) = 0.3 \times 6842 (1 - 0.4 / 0.45) = 410.5 \text{ kN}$$

Considerando le armature presenti sotto l'area della piastra di spinta di lato 1.2 m si ottiene una forza di divaricamento espressa al metro pari a:

$$z = 410.5 / 1.4 \text{ m} = 293.2 \text{ kN/m}$$

L'armatura minima necessaria ad assorbire le trazioni di divaricamento è:

$$A_s = 293.2 \times 10^3 / 391 = 750 \text{ mm}^2 / \text{m} = 7.5 \text{ cm}^2$$

L'armatura prevista per il frettaggio è pari a 1 + 1 Ø12 spilli passo 15 cm.

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_{s\text{Ø}12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|----------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 124 di 201 |

Come si evince in tutti gli scenari analizzati, l'armatura di frettaggio di progetto risulta sempre superiore ai quantitativi minimi di armatura richiesti dal calcolo.

Sollecitazioni dovute al peso dell'anello completo

Si propone una verifica relativa alle sollecitazioni agenti sui connettori nello scenario sfavorevole di anello completo in condizioni "sospese" all'anello precedente.

Il peso dell'intero anello costituito da 6+1 conci prefabbricati risulta pari a:

$$P_{\text{tot}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1.5\text{m} \times \pi(R_e^2 - R_i^2) = 501 \text{ kN}$$

questo agisce con uno sforzo di taglio (ripartito su 19 connettori complessivi) pari a:

$$T = P/19 = 26.3 \text{ kN}$$

Elementi accessori del rivestimento

Il sistema di collegamento longitudinale tra gli anelli di rivestimento non prevede più bulloni metallici sui giunti (previsti nel PE in prima fase): il collegamento sui giunti circonferenziali è ora garantito per mezzo di connettori, mentre su quelli longitudinali attraverso le barre guida in polipropilene FAMA o equivalenti. I connettori, montati durante il posizionamento dei conci, devono garantire in fase di esercizio un'adeguata continuità tra gli anelli contrastando in particolare la reazione dovuta allo schiacciamento della coppia di guarnizioni.

Guarnizioni di tenuta idraulica

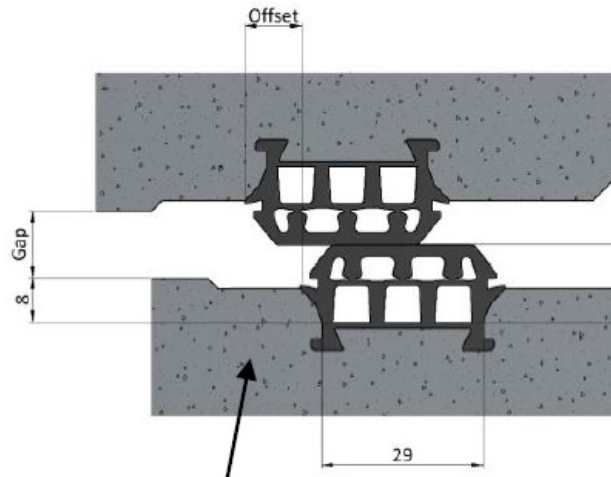
Le guarnizioni utilizzate risultano annegate nel getto, e questo rappresenta un indubbio vantaggio eliminando qualsiasi rischio di scollamento o cattiva disposizione sulle facce; esse entrano in contatto tra di loro e schiacciandosi permettono di sigillare i giunti: vengono progettate in base alle specifiche esigenze di tenuta idraulica. Si prevede che nell'assetto finale ciascun concio debba essere posizionato, dopo il montaggio dell'intero anello, esattamente nella posizione prevista in progetto, con tutti i giunti circonferenziali e radiali allineati tra loro e perfettamente a contatto, in modo da garantire lo schiacciamento necessario affinché si realizzi la richiesta tenuta idraulica. Sono ammessi degli scostamenti minimi dalla posizione teorica di ciascun concio ed anello con determinate tolleranze di seguito indicate.

Per l'alloggiamento delle guarnizioni, previste annegate nel getto, si predispongono sulle facce dei conci un'opportuna cava. Lo "schiacciamento" tra le due guarnizioni deve essere tale da garantire l'impermeabilità sotto il massimo carico idraulico previsto, pari in questo caso a circa 9 bar, e si tiene conto di eventuali disallineamenti relativi (offset) delle due guarnizioni o del non perfetto contatto (gap) dei ringrossi delle facce dei conci. Il ringrosso previsto è nel caso in esame pari a 3mm per parte.

Si è considerata una situazione in cui il gap è dell'ordine di 2mm in concomitanza con un disallineamento (offset) delle guarnizioni di 10mm (vedi figura).

Siccome la prova effettuata dal fornitore è stata realizzata tra due facce aventi ringrosso di 2mm per parte, per definire la pressione idrostatica sostenibile dalla guarnizione attraverso il grafico seguente si definisce un gap totale pari alla somma del gap di montaggio (2mm) e dell'ulteriore gap che è dovuto alla configurazione geometrica delle facce nel caso specifico (2mm) per un totale di 4mm.

In queste condizioni, come evidente dalla figura seguente, la pressione idrostatica sostenibile è molto superiore (20bar), anche con un adeguato coefficiente di sicurezza, al massimo battente idraulico ipotizzato ($P_w=9$ bar).



Schema guarnizione con offset nella prova del fornitore

WATER TIGHTNESS TEST UG018A 70 SH CAVA

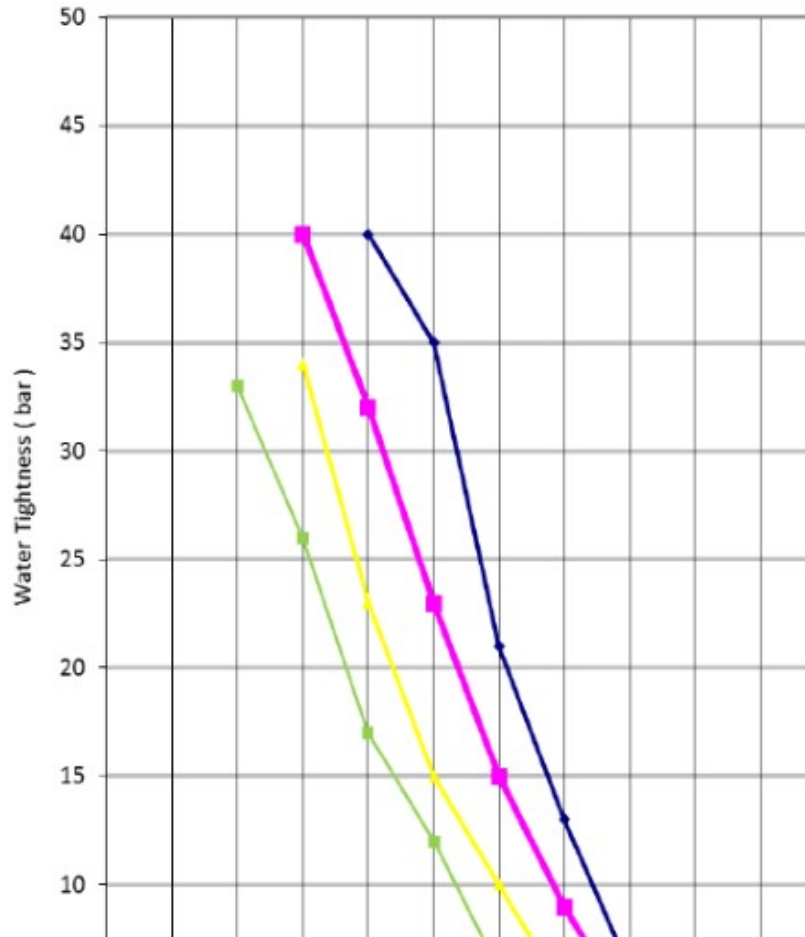


Diagramma di tenuta dell'acqua e geometrie della guarnizione di riferimento

LOAD DEFLECTION DIAGRAM FOR PROFILE UG018A

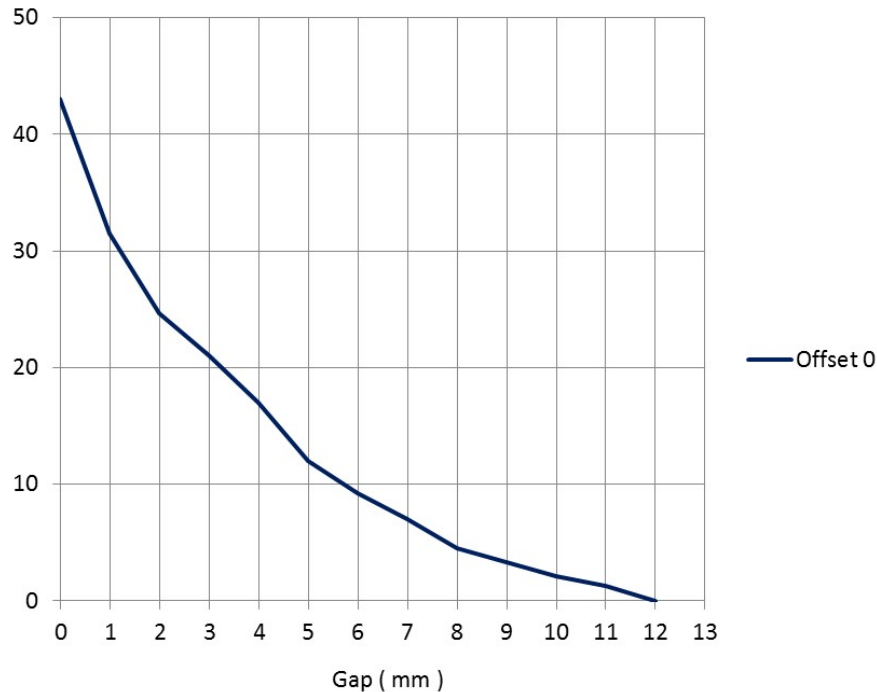


Diagramma di carico/deformazione profilo

Come si è detto precedentemente si prevede che ciascun concio ed anello debbano essere posizionati geometricamente esattamente come previsto in progetto, con tolleranze geometriche minime.

Ad ulteriore garanzia di un corretto montaggio del concio nella fase transitoria di predisposizione dell'anello si definisce comunque la forza minima di spinta dei martinetti sui concii che in fase di montaggio favorisce il contatto delle facce dei giunti.

La guarnizione, quando completamente compressa, offre una reazione di 25 kN/m. Di conseguenza la forza complessiva di reazione sulla faccia circonferenziale del concio è:

$$F_{g,an} = 25 \text{ kN/m} \cdot 4.19 \text{ m} = 104.75 \text{ kN}$$

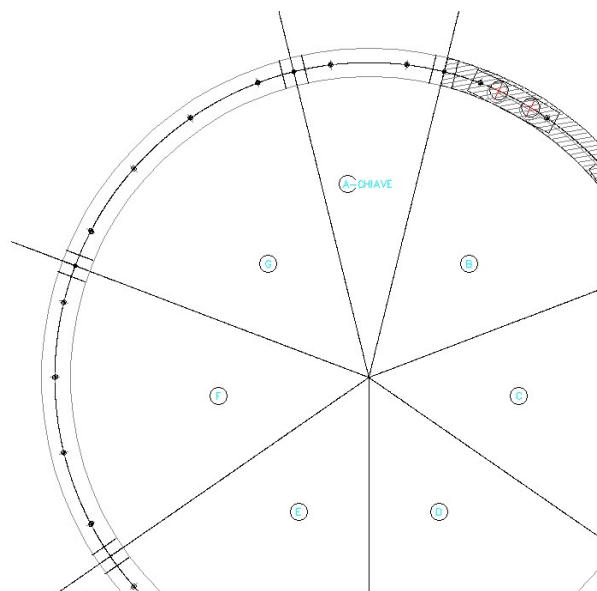
Essendo previste 3 coppie di cilindri idraulici per concio, la spinta minima che deve essere corrisposta dalla singola coppia di martinetti al concio è pari a:

$$F_{1,min} = F_{g,an} / 3 = 34.92 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 128 di 101 |

Per quanto riguarda il giunto longitudinale tra conci dello stesso anello si considera il caso più sfavorevole in cui, in fase di montaggio dell'anello, un concio si trovi ad avere la pressione della guarnizione nella parte superiore, ed inferiormente nessun concio su cui appoggiarsi (figura sotto). In questa condizione sul concio insistono le seguenti azioni verticali:

- Peso proprio: $P = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot V_{\text{concio}} = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 4.19\text{m} \cdot 1.50\text{m} \cdot 0.5 = 78.6 \text{ kN}$
- Spinta guarnizione: $S = 25 \text{ kN/m} \cdot L_{\text{concio}} = 25 \text{ kN/m} \cdot 1.50\text{m} = 37.5 \text{ kN}$



Caso sfavorevole di verifica della guarnizione nei giunti longitudinali

Pertanto affinché il concio sia in equilibrio, ai suoi estremi longitudinali devono essere presenti delle reazioni vincolari pari a:

$$R_v = (P+S)/2 = 58 \text{ kN}$$

Nel giunto circonferenziale posteriore il taglio è fornito dai connettori, nella faccia frontale invece il meccanismo resistente è l'attrito che si sviluppa tra la scarpa dei martinetti e l'area di trasmissione del carico del concio, esprimibile come:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>129 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 129 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 129 di 201 | | | | | | | | |

$$V_{Rd,fric} = \mu \cdot N_{Ed} \quad \rightarrow \quad N_{Ed,min} = R_v / 0.5 = 116 \text{ kN}$$

dove:

N_{Ed} [kN/m]: spinta totale agente sul concio

μ [-]: coefficiente di attrito tra le interfacce (acciaio-calcestruzzo: $\mu = 0.5$)

La spinta minima che deve essere corrisposta dalla singola coppia di martinetti al concio è quindi pari a:

$$F_{2,min} = N_{Ed,min} / 2 = 116 \text{ kN}$$

Connettori meccanici

I connettori scelti presentano le seguenti caratteristiche (scheda tecnica in Allegato):

Resistenza a trazione:

per rottura del connettore $S_m = 100 \text{ kN}$

resistenza di progetto $S_r = S_m / \gamma_a = 100 / 1.15 = 87 \text{ kN}$

Resistenza al taglio:

per rottura del connettore $T_m = 160 \text{ kN}$

resistenza di progetto $T_r = T_m / \gamma_a = 160 / 1.15 = 139 \text{ kN}$

La massima forza di compressione nella guarnizione con un disallineamento di 0 mm e un gap di soli 2mm (facce a contatto) risulta pari a $R=25\text{kN/m}$.

La reazione che si sviluppa lungo tutta la faccia circonferenziale del concio è:

$$F = R \times 4.19\text{m} = 104.75 \text{ kN}$$

A favore di sicurezza si prevede che in fase di esercizio solo tre connettori possano funzionare per una possibile rottura del quarto in fase di montaggio.

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 130 di 201 |

Conseguentemente la forza di trazione competente a ciascun connettore è:

$$S = F/3 = 35 \text{ kN}$$

$$F_d = F \times \gamma_{gtu} = 52.5 \text{ kN}$$

$$F_d < S_r = 87 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda il giunto longitudinale (tra conci di uno stesso anello) la reazione dovuta allo schiacciamento della relativa coppia di guarnizioni agisce come taglio sul sistema costituito dai due connettori più prossimi al giunto:

$$F = R \times 1.50 \text{ m} = 37.5 \text{ kN}$$

$$T = F / 2 = 18.75 \text{ kN}$$

$$T_d = T \times \gamma_{gtu} = 28.1 \text{ kN}$$

$$T_d < T_r = 139 \text{ kN}$$

Il fattore di riduzione γ_a adottato è pari a 1.15, uguale a quello adottato per l'acciaio nelle verifiche agli Stati limite, compatibilmente con quanto dettato dalla Normativa. Tale situazione di verifica è, tuttavia, legata all'errata manovra e quindi non utile per la statica della galleria.

Viene di seguito presa in considerazione la sollecitazione agente sui connettori a seguito di una temporanea sospensione del singolo concio ai soli connettori (errata manovra dei martinetti).

Tale condizione di carico non è in alcun modo prevista nella normale procedura di montaggio. Risulta tuttavia opportuno verificare che, nel caso in cui un evento accidentale provochi la sospensione del concio, la resistenza dei connettori garantisca la sicurezza impedendo la caduta del concio stesso. Si considera nelle verifiche il contributo di soli due connettori.

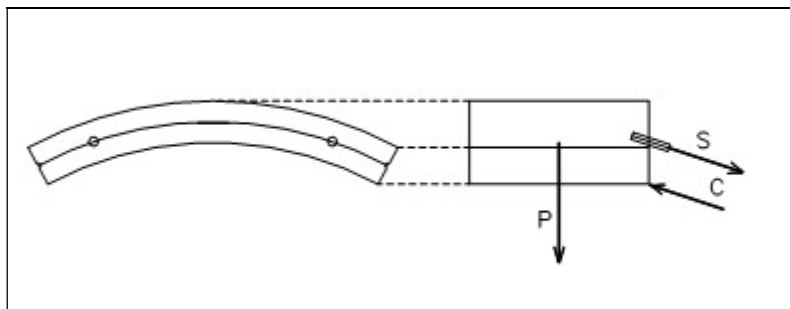
Il peso del concio è:

$$P = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 4.19 \text{ m} = 78.6 \text{ kN}$$

questo agisce con uno sforzo di taglio (ripartito su 2 connettori) pari a

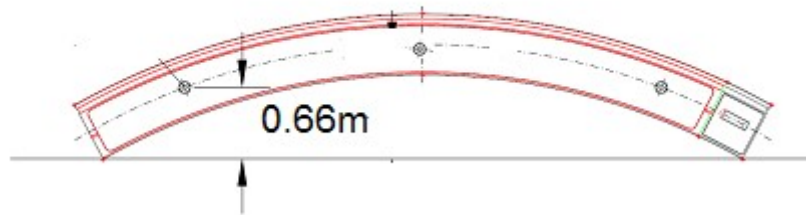
$$T = P/2 = 39.3 \text{ kN} < T_r$$

Al momento flettente si oppone la coppia di forze data dalla trazione sui connettori e dalla compressione sui punti più bassi dove il concio si appoggia all'anello adiacente. Considerando collaboranti due soli connettori, la condizione più sfavorevole si presenta per l'assenza dei connettori centrali; in questo caso il braccio della coppia è il minimo possibile (vedi figura sotto):



Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 131 di 201 |



$$M = P \times (1.5/2) = 59 \text{ kN m}$$

$$M = 3 \times S \times b_{\min}$$

con $b_{\min} = 0.66 \text{ m}$

Si ricava quindi la forza di trazione sul singolo connettore:

$$S = M / (2 \times b_{\min}) = 45 \text{ kN}$$

$$S_d = S \times \gamma_{gtu} = 67.5 \text{ kN}$$

$$S_d < S_r = 87 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.5.5 Verifiche statiche in fase definitiva : modelli di calcolo e criteri di verifica

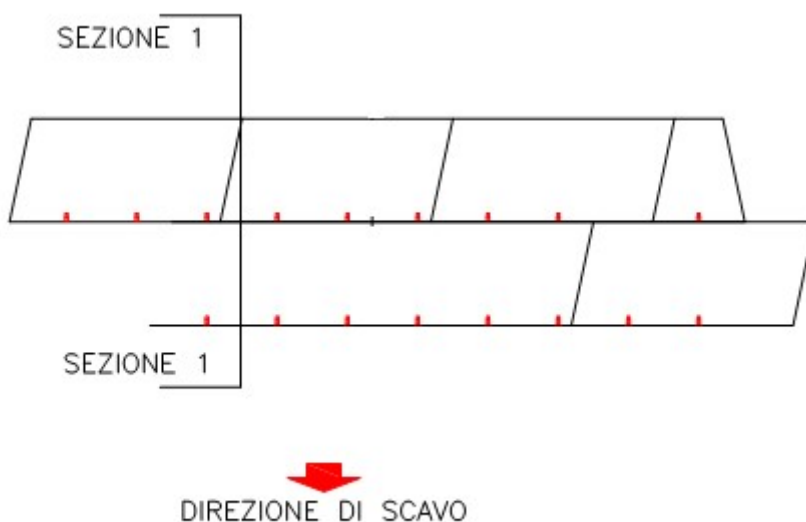
Nelle analisi numeriche effettuate in sede di progetto l’anello del rivestimento definitivo è stato simulato come elementi continui (beam), ossia in grado di trasferire momenti flettenti lungo tutto il perimetro di scavo.

Infatti i giunti tra concio e concio di due anelli contigui sono sfalsati in modo che ciascun anello può essere considerato come un involucro continuo cilindrico.

Il complesso dei conci sfalsati ha quindi un comportamento globale a “guscio”.

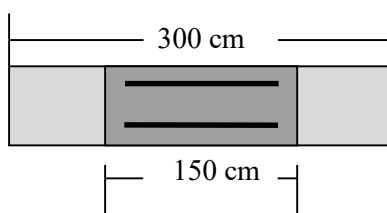
Nelle analisi, essendo rappresentato il rivestimento definitivo come costituito da conci discontinui e sfalsati, le caratteristiche meccaniche di ogni asta si riferiscono ad una sezione di anello di lunghezza unitaria.

A seguito delle analisi così condotte, l’anello del rivestimento definitivo in cls è stato verificato facendo riferimento alla sezione n°1 di Figura (sezione in prossimità del giunto), ossia considerando l’area di cls di due conci e l’armatura di uno soltanto.



Le sollecitazioni applicate sono quelle relative a due conci.

Per quanto riguarda le analisi e le verifiche condotte si considera quindi la sezione 1.



| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Al fine di integrare le verifiche di cui sopra, è stata analizzato il comportamento in corrispondenza del giunto per il quale sono state effettuate le opportune verifiche.

Definizione degli stati limite

Le verifiche sono eseguite mediante il metodo agli stati limite; preliminarmente vengono quindi trovate le sollecitazioni ultime alle quali l'anello di conci armato può resistere in termini di dominio Nu-Mu e di massima sollecitazione di taglio Tu; successivamente vengono calcolate le sollecitazioni di progetto Nd, Md, Td agenti nelle diverse fasi e verificata la loro appartenenza ai domini di resistenza.

Caratteristiche dei materiali

CALCESTRUZZO:

classe (resistenza caratteristica cubica): **C45/55 MPa**

resistenza caratteristica cilindrica: $f_{ck}=0.83 \times R_{ck}=45.65 \text{ MPa}$

resistenza caratteristica a trazione: $f_{ctk}=2.7 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 36416 \text{ MPa}$

massima deformazione di accorciamento: $\epsilon_c=3.5 \text{ ‰}$

classe (resistenza caratteristica cubica): **C55/67 MPa**

resistenza caratteristica cilindrica: $f_{ck}=0.83 \times R_{ck}=55 \text{ MPa}$

resistenza caratteristica a trazione: $f_{ctk}=2.95 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 38214 \text{ MPa}$

massima deformazione di accorciamento: $\epsilon_c=3.5 \text{ ‰}$

classe (resistenza caratteristica cubica): **C60/75 MPa**

resistenza caratteristica cilindrica: $f_{ck}=0.83 \times R_{ck}=62.2 \text{ MPa}$

resistenza caratteristica a trazione: $f_{ctk}=3.04 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 39100 \text{ MPa}$

massima deformazione di accorciamento: $\epsilon_c=3.5 \text{ ‰}$

ACCIAIO PER ARMATURA:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>134 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 134 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 134 di 201 | | | | | | | | |

tipo: B450

tensione caratteristica di snervamento: $f_{yk}=450$ MPa

modulo elastico: $E_s=210000$ MPa

massima deformazione di allungamento $\epsilon_a=10$ ‰

Coefficienti di sicurezza sulla resistenza dei materiali

Per il calcolo delle azioni resistenti allo SLU della sezione sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di sicurezza (a dividere i valori di resistenza dei materiali).

- per la resistenza a compressione del cls.: $\gamma_c=1.5$
- per la resistenza a compressione del cls. in condizioni eccezionali: $\gamma_c=1.3$
- per la resistenza dell'acciaio: $\gamma_a=1.15$

per tenere conto della diminuzione della resistenza del calcestruzzo sottoposto a carichi di lunga durata, nelle verifiche in fase definitiva la resistenza caratteristica cilindrica (f_{ck}) viene opportunamente ridotta di un ulteriore coefficiente pari a 0.85.

I valori di calcolo delle resistenze del calcestruzzo e dell'acciaio risultano quindi:

CALCESTRUZZO

C45/55

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata):

$$f_{cd1}=0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 25.5 \text{ MPa}$$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata):

$$f_{cd2}=f_{ck} / \gamma_c = 30 \text{ MPa}$$

C55/67

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata):

$$f_{cd1}=0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 31.2 \text{ MPa}$$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata):

$$f_{cd2}=f_{ck} / \gamma_c = 36.7 \text{ MPa}$$

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

C60/75

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata):

$$f_{cd1} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 34 \text{ MPa}$$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata):

$$f_{cd2} = f_{ck} / \gamma_c = 40 \text{ MPa}$$

ACCIAIO

resistenza di calcolo a snervamento dell'acciaio:

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_a = 391 \text{ MPa}$$

COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI:

Le sollecitazioni agenti sulla sezione nelle diverse condizioni di carico, sia in fase definitiva che in fase transitoria vengono amplificate secondo un coefficiente di sicurezza pari a $\gamma_{gtu} = 1.3$ per le verifiche agli stati limite ultimi, mentre $\gamma_{gte} = 1.0$ per le verifiche agli stati limite di esercizio.

Le sollecitazioni di calcolo sono quindi:

$$N_d = N_t \cdot \gamma_{gt}$$

$$M_d = M_x \cdot \gamma_{gt}$$

$$T_d = T_x \cdot \gamma_{gt}$$

10.5.6 Requisiti Stati limite

S.L.U. per tensioni normali in fase definitiva

Per la verifica a pressoflessione in fase definitiva si riporta il dominio di resistenza della sezione di due anelli consecutivi del rivestimento. Data la discontinuità del rivestimento posto in opera, dovuta alla presenza dei giunti tra gli anelli, le verifiche vengono effettuate considerando che il momento flettente possa essere assorbito, a livello di trazioni, soltanto dove è presente la continuità strutturale.

Le verifiche sono quindi condotte considerando due anelli consecutivi mentre l'armatura è quella relativa ad un solo anello.

Viste le 3 differenti classi di armatura, riportati nella tabella seguente, verranno definiti i 3 domini di rottura. Si riporteranno inoltre nello stesso grafico il dominio della sezione con le armature necessarie.

| Classi di armatura | Estradosso | Intradosso |
|--------------------|--------------|--------------|
| I | 14 ϕ 24 | 14 ϕ 24 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 136 di 201 |

| | | |
|-----|--------------|--------------|
| II | 14 ϕ 20 | 14 ϕ 20 |
| III | 14 ϕ 16 | 14 ϕ 16 |
| IV | 14 ϕ 14 | 14 ϕ 14 |

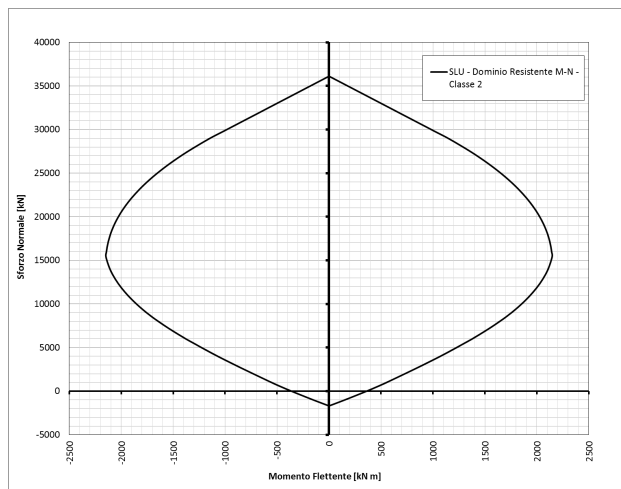
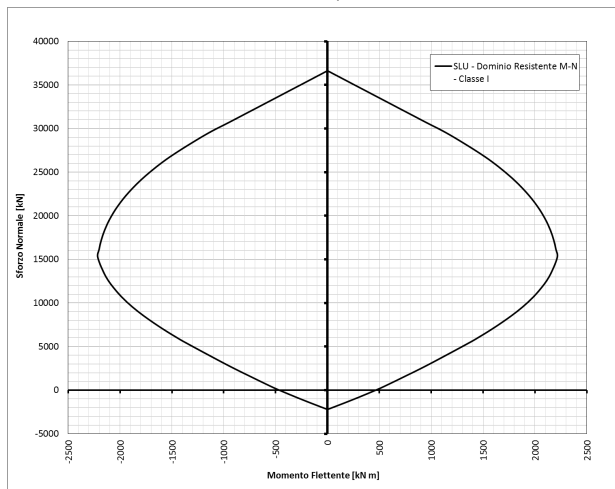


Figura 46 - Dominio resistente SLU (B=3, H = 0.45 m) – Classe 3 e 4 – C45/55

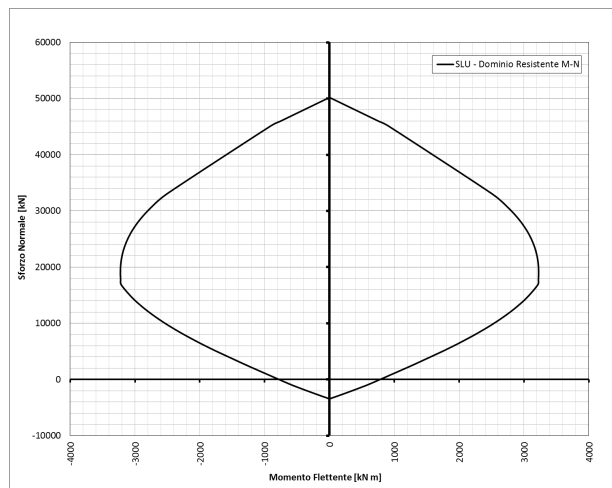


Figura 47 - Dominio resistente SLU (B=3, H = 0.5 m) – Classe 2 – C55/67

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 137 di 201 |

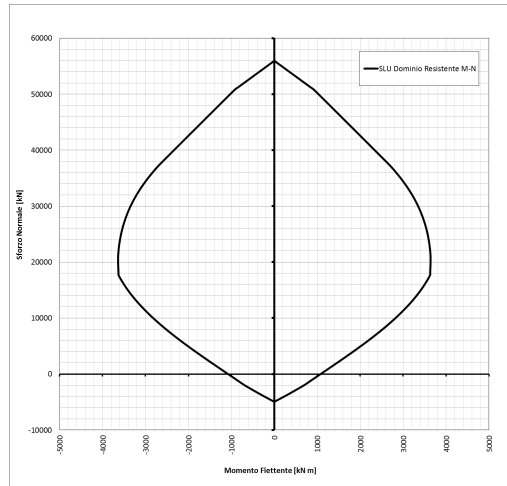


Figura 48 - Dominio resistente SLU (B=3, H = 0.5 m) – Classe 1 – C60/75

Per la valutazione delle resistenze ultime nei confronti di sollecitazioni taglianti (valido per elementi monodimensionali), è stato considerato quanto riportato di seguito.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 138 di 201</p> |

S.L.U. per taglio in fase definitiva

La resistenza a taglio V_{Rd} degli elementi strutturali sprovvisti di specifica armatura a taglio è stata valutata, utilizzando formule di comprovata affidabilità, sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo.

La verifica di resistenza (SLU) si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove V_{Ed} è il valore di calcolo dello sforzo di taglio.

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza al taglio si valuta con:

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (4.1.14)$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale ($\leq 0,02$);

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$);

b_w è la larghezza minima della sezione (in mm).

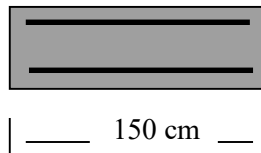
Nelle tabelle di sintesi delle verifiche è riportato il coefficiente di utilizzo della sezione ($V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1$), il quale deve risultare inferiore all'unità affinché la verifica risulti soddisfatta.

S.L.U. per tensioni normali in fase provvisoria

Per le verifiche a pressoflessione nelle fasi provvisorie che si verificano prima della messa in opera dell'anello di rivestimento a tergo della macchina TBM si riporta il dominio di resistenza della sezione un singolo concio.

Le verifiche riportate in seguito sono state svolte nelle condizioni più gravose, ovvero con la classe di armatura II.

Il momento resistente della sezione per un $N = 0$ è pari a 288.7 kN m



$b=150$ cm

$h=45$ cm

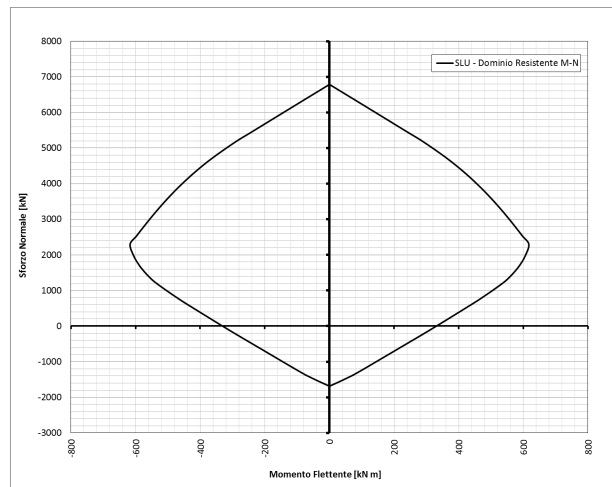
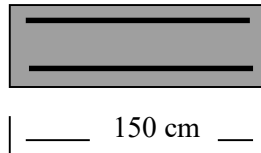


Figura 49 - Dominio resistente SLU ($B=1,50$, $H = 0,45$ m) - Classe 3 – C 12/15

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 140 di 201 |

Il momento resistente della sezione per un $N = 0$ è pari a 330 kN m



$b=150$ cm

$h= 50$ cm

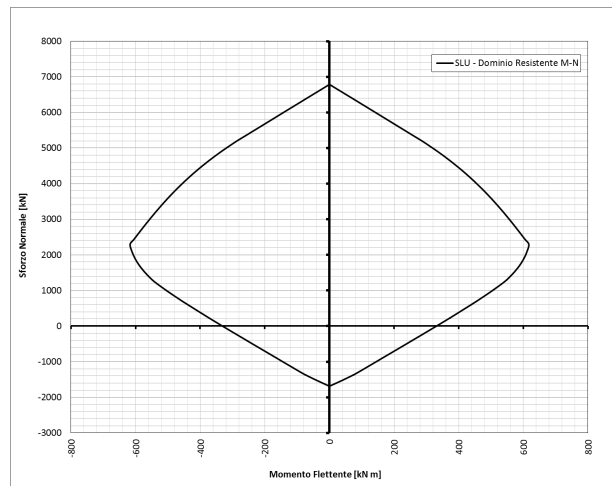


Figura 50 - Dominio resistente SLU ($B=1,50$, $H = 0.5$ m) - Classe 3 – C 12/15

| | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 141 di 201</p> |

Stati limite di esercizio

S.L. per le tensioni di esercizio

Le condizioni ambientali più gravose per i conci si stabiliscono in fase definitiva con il rivestimento completato. Le massime tensioni tollerate nei materiali sono le seguenti:

CLS(C45/55)

| | |
|--|---|
| σ_{\max} per combinaz. di carico rara | $0.60 \cdot f_{ck} = 27 \text{ MPa}$ |
| σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente | $0.45 \cdot f_{ck} = 20.25 \text{ MPa}$ |

CLS(C55/65)

| | |
|--|--|
| σ_{\max} per combinaz. di carico rara | $0.60 \cdot f_{ck} = 33 \text{ MPa}$ |
| σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente | $0.45 \cdot f_{ck} = 24.8 \text{ MPa}$ |

CLS(C60/75)

| | |
|--|--|
| σ_{\max} per combinaz. di carico rara | $0.60 \cdot f_{ck} = 37.4 \text{ MPa}$ |
| σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente | $0.45 \cdot f_{ck} = 28 \text{ MPa}$ |

ACCIAIO

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| σ_{\max} | $0.8 \cdot f_{yk} = 360 \text{ MPa}$ |
|-----------------|--------------------------------------|

Stato limite di fessurazione

Per assicurare la funzionalità e la durata delle strutture si deve:

- garantire un sufficiente ricoprimento delle armature con calcestruzzo di buona qualità e compattezza, bassa porosità e bassa permeabilità;
- non superare uno stato limite di fessurazione adeguato alle condizioni ambientali, alle sollecitazioni ed alla sensibilità delle armature alla corrosione;
- tener conto delle esigenze estetiche.

In ordine di severità decrescente si distinguono i seguenti stati limite di fessurazione:

- stato limite di decompressione nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0;
- stato limite di formazione delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

dove f_{ctm} rappresenta la resistenza a trazione media del cls.

- stato limite di apertura delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$w_1 = 0.2\text{mm}$ per combinazione quasi permanente

$w_2 = 0.3\text{mm}$ per combinazione frequente (considerata per le condizioni di carico provvisorie)

Lo stato limite di fessurazione è stato fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione. Le verifiche condotte per i diversi stati limite di fessurazione sono di seguito riportate.

Il valore di calcolo di apertura delle fessure (w_d) non deve superare i valori nominali w di progetto. Il valore di calcolo è dato da:

$$w_d = 1.7 w_m$$

dove w_m , rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

L'ampiezza media delle fessure w_m è calcolata come prodotto della deformazione media delle barre d'armatura ϵ_{sm} per la distanza media tra le fessure Δ_{sm} :

$$w_m = \epsilon_{sm} \times \Delta_{sm}$$

Per il calcolo di ϵ_{sm} , e Δ_{sm} vanno utilizzati criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica nel rispetto delle indicazioni fornite nel paragrafo C4.1.2.2.4.6 della Circolare 02/02/2009.

In assenza di dati più precisi, i parametri Δ_{sm} e ϵ_{sm} che definiscono w_m , possono valutarsi come segue, nell'ipotesi che le armature siano distribuite uniformemente sull'area efficace della sezione trasversale.

- la distanza media fra le fessure Δ_{sm} per la condizione di fessurazione stabilizzata in corrispondenza del livello baricentrico dell'armatura all'interno dell'area efficace e data da:

$$\Delta_{sm} = 2 (c+s/10)+k_2 k_3 \phi/\rho_r$$

c = copriferro netto armatura tesa (mm);

s = interasse tra i ferri, se $s > 14\Phi$ si adotterà $s = 14\Phi$ (mm);

Φ = diametro delle barre (mm);

$k_2 = 0.4$, per barre ad aderenza migliorata;

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|-------------------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> | <p>FOGLIO 143 di 201</p> |

$k_3 = 0.125$, per diagramma delle σ triangolare, dovuto a flessione o pressoflessione;

$$\rho_r = A_s / A_{c,eff};$$

A_s = area della sezione di acciaio posta nell'area $A_{c,eff}$.

- la deformazione unitaria media dell'armatura ϵ_{sm} può valutarsi secondo la seguente espressione che tiene conto della collaborazione del calcestruzzo teso che la circonda:

$$\epsilon_{sm} = \sigma_s / E_s (1 - \beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2) \geq (0.4 \sigma_s / E_s)$$

σ_s = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la combinazione di azioni considerata;

σ_s = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la sollecitazione corrispondente al raggiungimento della resistenza a trazione f_{ctm} nella fibra di calcestruzzo più sollecitata nella sezione interamente reagente;

$\beta_1 = 1.0$ per barre ad aderenza migliorata;

$\beta_2 = 0.5$ nel caso di azioni di lunga durata o ripetute.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6 VERIFICHE STATICHE: PRESENTAZIONE E RISULTATI

Si riporta di seguito una tabella repilogativa delle analisi numeriche effettuate per l'analisi e la verifica degli scavi e dei rivestimenti.

Tabella 16 - Sezioni di analisi fasi di terapia

| Analisi n. | Sezione | progressiva | formazione | Condizione analisi |
|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|---|
| 10 | axiTRV100m | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 100m |
| 11 | axiTRV200m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 200m – sovrascavo 5cm |
| 12 | axiTRV300m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 300m – sovrascavo 5cm |
| 13 | axiTRV400m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 400m – sovrascavo 5cm |
| 14 | axiTRV600m_s | - | TRV | Assialsimmetrico copertura 600m – sovrascavo 10cm |
| 15 | TRV100m | 25150 | TRV | <i>Piana copertura 100m</i> |
| 16 | TRV200m_s | 23850 | TRV | <i>Piana copertura 200m – sovrascavo 5cm</i> |
| 17 | TRV300m_s | 19600 | TRV | <i>Piana copertura 300m – sovrascavo 5cm</i> |
| 18 | TRV400m_s | 20150 | TRV | <i>Piana copertura 400m – sovrascavo 5cm</i> |
| 19 | TRV600m_s | 20300 | TRV | <i>Piana copertura 600m – sovrascavo 10cm</i> |

Ai fini di una corretta e completa valutazione della adeguatezza del dimensionamento effettuato, si ritengono sufficienti le verifiche statiche eseguite.

Modello geotecnico

Tabella 17 – Intervallo dei parametri geotecnici

| Sezione di analisi | Unità | pk | Z ₀ | h _w | σ _o | p _{w0} | p _{wR} | R _w | γ | c' _k | φ' _k | c _{u k} | E _k | E _{u k} |
|--------------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | [km] | [m] | [m] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [m] | [kN/m ³] | [MPa] | [°] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| D1 | TRV | 25425 | 50 | - | 1,05 | - | - | - | 21 | - | - | 0,500 | - | 250 |
| D2 | TRV | 25150 | 100 | 95 | 2,2 | 0.95 | - | - | 22 | 78 | 20 | 0,594 | 300 | 297 |
| D3 | TRV | 23850 | 200 | 115 | 4,4 | 1.15 | - | - | 22 | 177 | 17 | 1,188 | 600 | 594 |
| D4 | TRV | 19600 | 300 | 33.6 | 6,6 | 0.34 | - | - | 22 | 421 | 14 | 1,782 | 900 | 891 |
| D5 | TRV | 20150 | 400 | 0 | 8,8 | 0 | - | - | 22 | 85* | 22* | 2,268 | 2000* | 1800* |
| D6 | TRV | 20300 | 600 | 0 | 13.2 | 0 | - | - | 22 | 85* | 22* | 3,564 | 2000* | 1800* |

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

c_{u k} = valore caratteristico della coesione non drenata

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

E_{u k} = valore caratteristico del modulo elastico non drenato dell'ammasso

Le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente R_{eq} pari a 4,65m.

|  <p>ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|------------|----------|------------|------|--------|------|---------|----|------------|---|------------|
| <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40 D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 03 0001</td> <td>C</td> <td>146 di 201</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 146 di 201 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 146 di 201 | | | | | | | | |

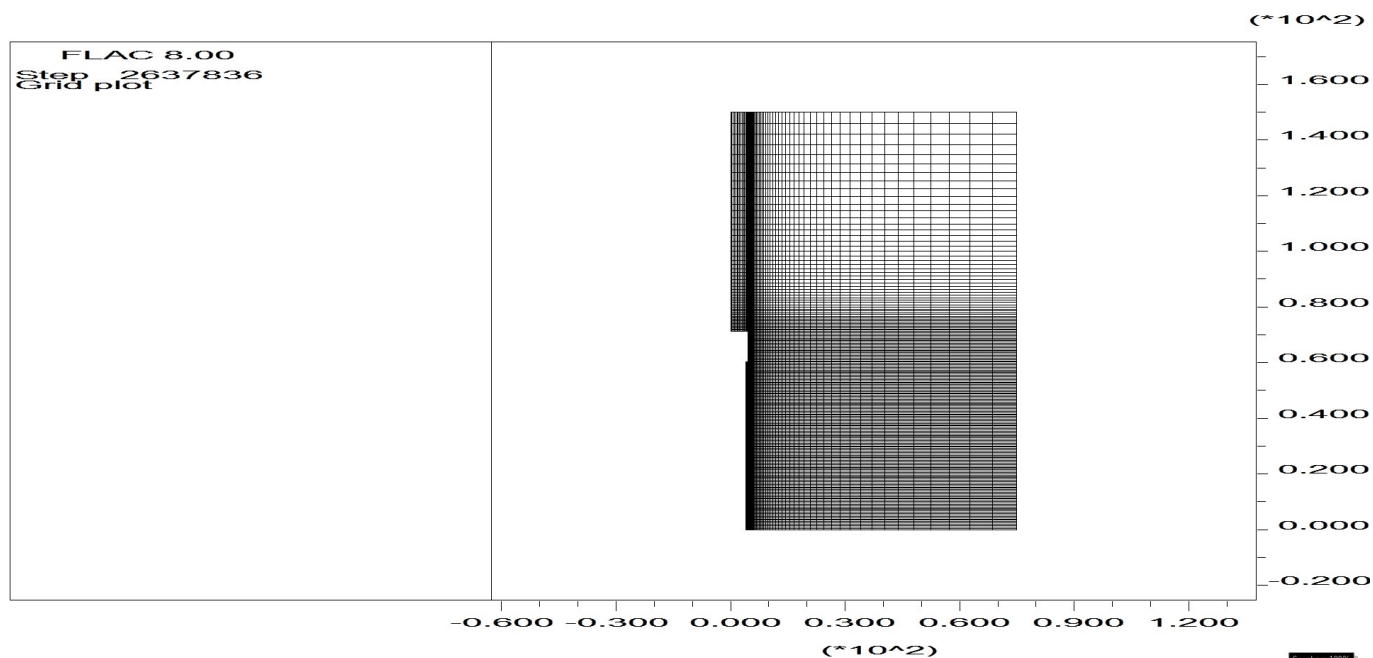
10.6.1 Modelli assialsimmetrici – Criteri di verifica


Si sono effettuate 6 analisi numeriche assialsimmetriche al fine di simulare il comportamento del terreno allo scavo e l'interazione del medesimo con gli interventi previsti (pressioni al fronte) nonché con lo scudo della TBM ed il rivestimento a tergo. In particolare l'analisi si prefigge lo scopo di stimare le pressioni del terreno sullo scudo, al fine di determinare la spinta totale necessaria negli scenari di seguito indicati, nonché il detensionamento del terreno al contorno dei conci, a debita distanza dal fronte (condizioni piane indisturbate), al fine di determinare il rilascio delle forze da imporre nelle analisi numeriche piane utilizzate per il dimensionamento e la verifica dei conci.

Modello geometrico

La mesh di calcolo è costituita da 71x200 di elementi rettangolari, opportunamente intensificati nelle zone di maggiore interesse in corrispondenza della galleria, in modo da seguire il più fedelmente possibile le geometrie locali delle strutture. Inferiormente il modello è vincolato con carrelli.

La griglia presenta un'estensione laterale di 75 m e un'altezza complessiva di 150 m. I bordi del modello numerico sono stati collocati sufficientemente lontani dalla galleria (a distanza $>8D$ con D =diametro della galleria), in modo tale che le condizioni di vincolo ivi definite non influenzino la modellazione.



| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

L'analisi si prefigge passo passo di simulare l'avanzamento sia dello scudo metallico che del rivestimento e relativo riempimento di miscela a tergo, simulando l'applicazione di una pressione al fronte e di un eventuale sovrascavo. Esso si può realizzare sia grazie alla configurazione geometrica della macchina TBM (e cioè la differenza di raggio fra la testa e la coda rappresentata dalla conicità del mantello) sia tramite i gauge cutters che possono portare ad una ulteriore alesatura in testa attraverso il copy-cutter. Questo sovrascavo in terreni scadenti in relazione agli stati tensionali in gioco, spesso non viene compensato totalmente dal riempimento della miscela bicomponente a tergo, per cui si realizza un ulteriore deconfinamento oltre a quello del fronte.

I rivestimenti e lo scudo sono simulati con elementi mesh. Lo sfondo virtuale di scavo è di 0.5m. il sovrascavo, nel caso in cui si decida di simularlo, è realizzato attraverso un gap dotato di interfacce e l'analisi è svolta in modalità a grandi deformazioni. Lo scudo ipotizzato di lunghezza 11m e spessore 5cm è simulato con un modello costitutivo elastico lineare; tutti gli altri elementi compreso il terreno è simulato con un legame elastoplastico con criterio di resistenza di Mohr Coulomb.

La seguente tabella riassume la successione delle fasi di calcolo delle analisi condotte:

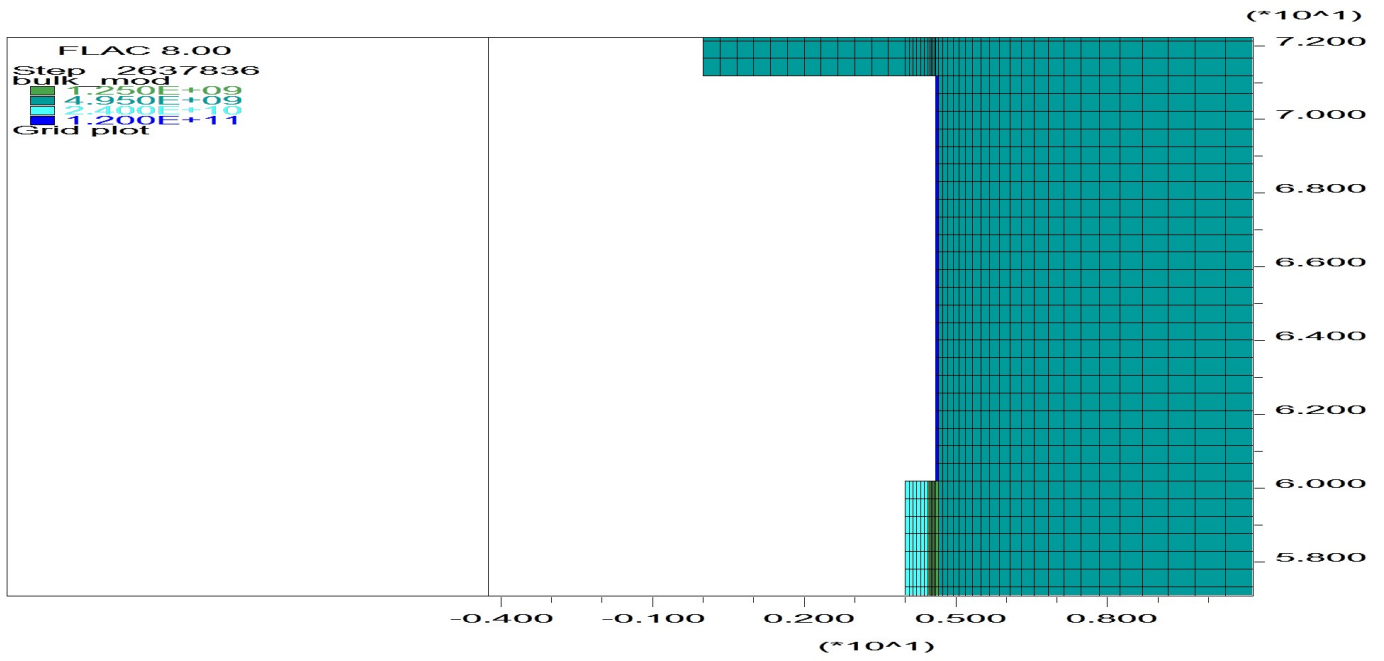
Tabella 2 - Fasi di analisi

| Fase | Descrizione |
|------|--|
| 0 | Creazione della geometria del modello |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) |
| 3 | Scavo iniziale corrispondente allo scudo TBM ed applicazione pressioni al fronte |
| 4 | Simulazione dello scavo in CND (TRV - Cu) a regime per sfondi limitati (con eventuale sovrascavo) avanzamento scudo metallico, applicazione della pressione al fronte e installazione del rivestimento definitivo e della miscela bicomponente |
| 5 | Scavo per una lunghezza totale finale di 75m, fino al centro della mesh; si valutano le pressioni sullo scudo e sul rivestimento definitivo a tergo |

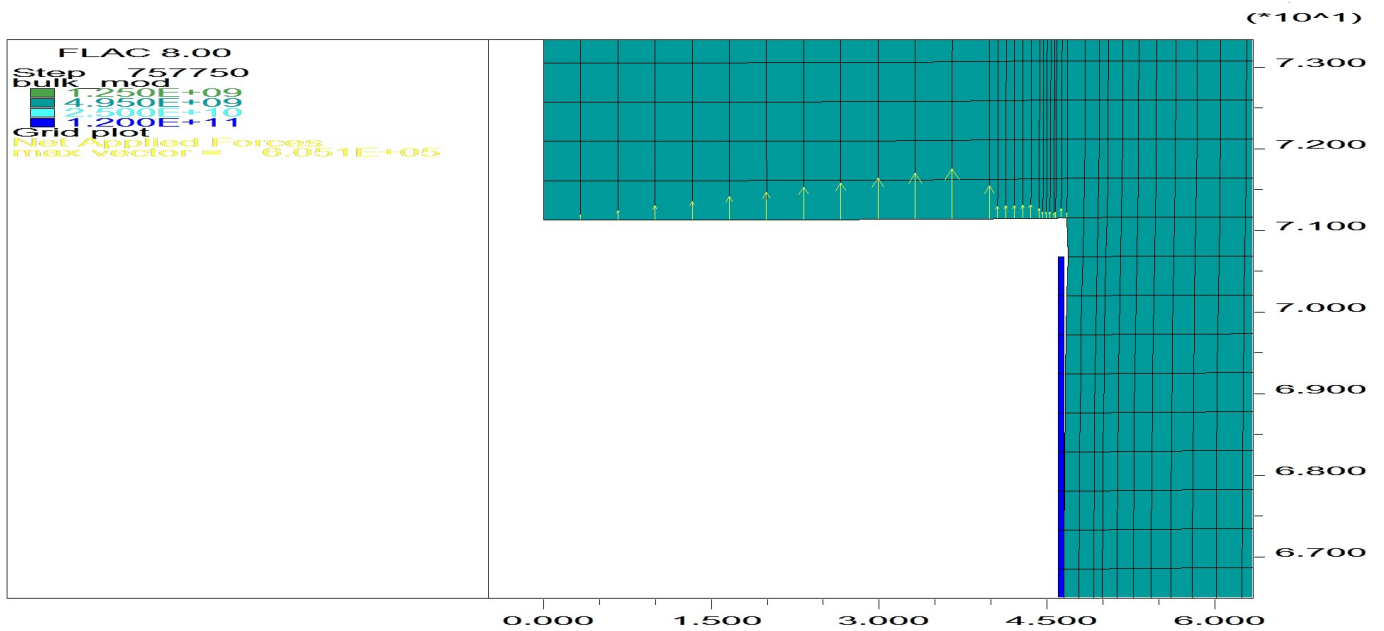
Si ipotizza un sovrascavo di circa 5cm da realizzarsi attraverso un opportuna conicità dello scudo e/o attraverso l'ausilio del copycutter. Si sono svolte comunque anche analisi senza simulare il sovrascavo ipotizzando comunque un raggio di scavo pari a 4.65m.

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale


| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 148 di 201 |



Rappresentazione della mesh e degli elementi di sostegno (scudo in giallo, rivestimento in conci in rosso, miscela bicomponente in viola)



Particolare della mesh e degli elementi di sostegno (scudo in giallo e relativo gap con deformazione del terreno fino a toccare lo scudo, pressione al fronte)

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.2 Modelli assialsimmetrici - Valutazione delle spinte massime di esercizio della TBM e dei fattori di rilascio dello stato tensionale

Di seguito si rappresenta l'esito delle analisi assialsimmetriche in forma sintetica

| <i>N</i> | Id | Facies geotecnica | Tipologia analisi | Tipo di analisi | Pressione fronte (bar) | Relax preinstallazione conci (%) | Spinta su scudo (KN) |
|----------|--------------|--------------------------|---|------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | axiTRV100m | TRV | Assialsimmetrico copertura 100m | Non drenata | 3 | 32 | 1650* |
| 2 | axiTRV200m_s | TRV | Assialsimmetrico copertura 200m–sovrascavo 5cm | Non drenata | 5 | 42 | 22000 |
| 3 | axiTRV300m_s | TRV | Assialsimmetrico copertura 300m–sovrascavo 5cm | Non drenata | 5 | 76 | 21722 |
| 4 | axiTRV400m_s | TRV | Assialsimmetrico copertura 400m–sovrascavo 5cm | Non drenata | 5 | 80 | 41633 |
| 5 | axiTRV600m_s | TRV | Assialsimmetrico copertura 600m–sovrascavo 10cm | Non drenata | 5 | 95 | 11840 |

*spinta sullo scudo valutata nel caso di sovrascavo di 5cm comunque dovuto ai cutter-edges

Dal punto di vista delle spinte le analisi più significative sono quelle che ipotizzano un sovrascavo permanente di 5cm dal momento che la macchina TBM è sempre progettata con una conicità radiale centimetrica e tramite gauge cutters. Nel dettaglio la spinta complessiva deve tenere conto di quattro singoli termini:

$$\Sigma W = W_{sh} + W_{sk} + W_{exc} + W_{sup}$$

W sh : Forza dovuta alla presenza delle spazzole e del cutting edge =584KN

W sk : Forza dovuta all'attrito ($\mu=0.2$) macchina-terreno (spinta massima prevista dal calcolo sullo scudo più peso totale macchina incluso backup stimato in 1200t) =53633 KN

W sup : Forza di pressione max da applicare al fronte=33900 KN

W exc : Forza necessaria allo scavo=9000KN

Le analisi svolte hanno condotto ai seguenti valori di progetto:

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 150 di 201 |

Spinta di progetto max (avanzamento in condizioni ordinarie, in relazione al contesto geomeccanico e morfologico): 100.000 – 115.000 kN

Extra Spinta di progetto (ripartenza fresa in condizioni eccezionali): 130.000 kN

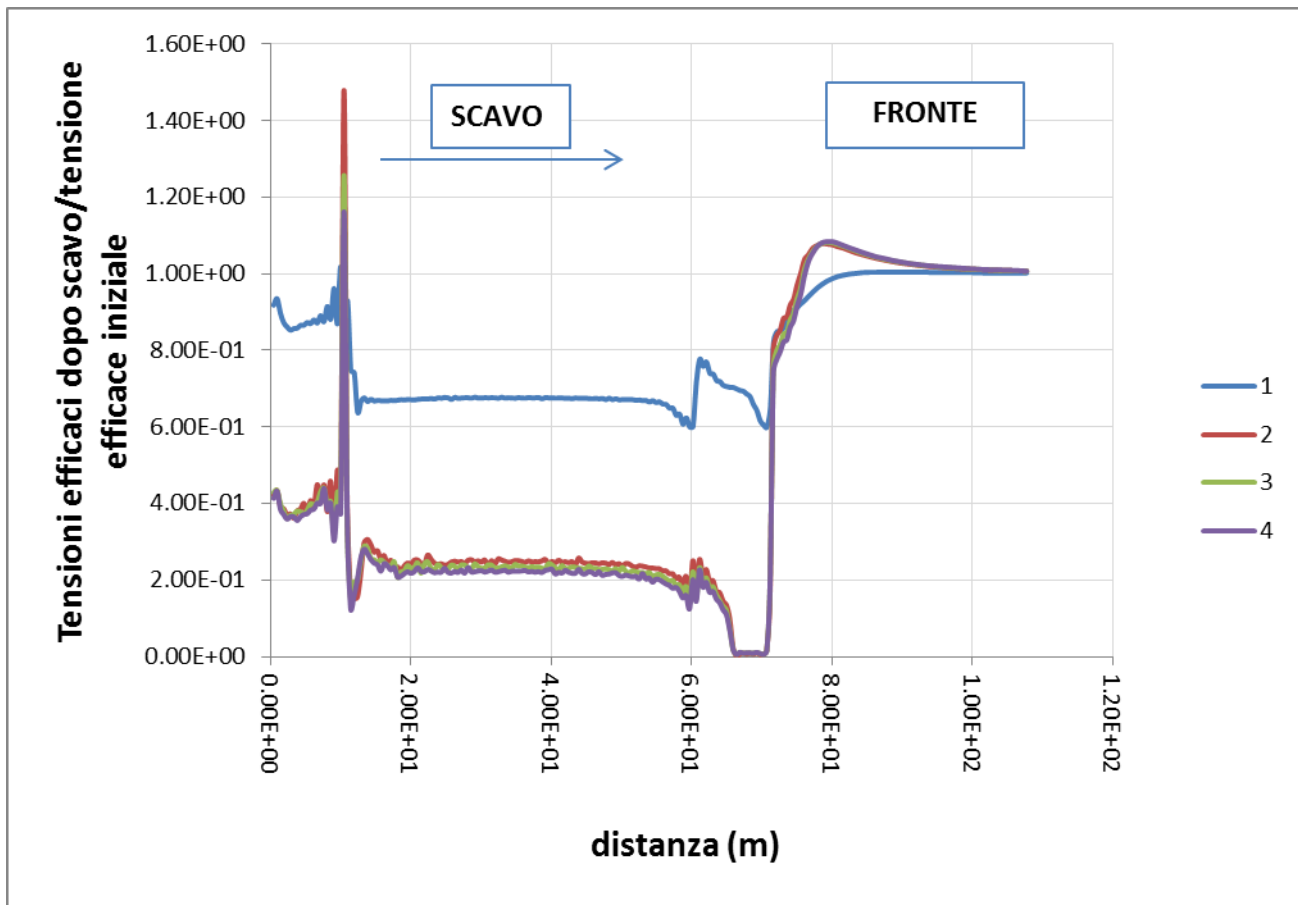


Figura 51 – andamento delle tensioni efficaci post scavo normalizzate in funzione della distanza dal fronte

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 151 di 201 |

10.6.3 Modelli piani

Si sono effettuate 6 analisi numeriche piane al fine di simulare l'interazione del medesimo il rivestimento definitivo a tergo.

Modello geometrico

La mesh di calcolo è costituita da 71x200 di elementi rettangolari, opportunamente intensificati nelle zone di maggiore interesse in corrispondenza della galleria, in modo da seguire il più fedelmente possibile le geometrie locali delle strutture. Inferiormente il modello è vincolato con carrelli.

La griglia presenta un'altezza di 75 m e una larghezza complessiva di 150 m. I bordi del modello numerico sono stati collocati sufficientemente lontani dalla galleria (a distanza >8D con D=diametro della galleria), in modo tale che le condizioni di vincolo ivi definite non influenzino la modellazione.

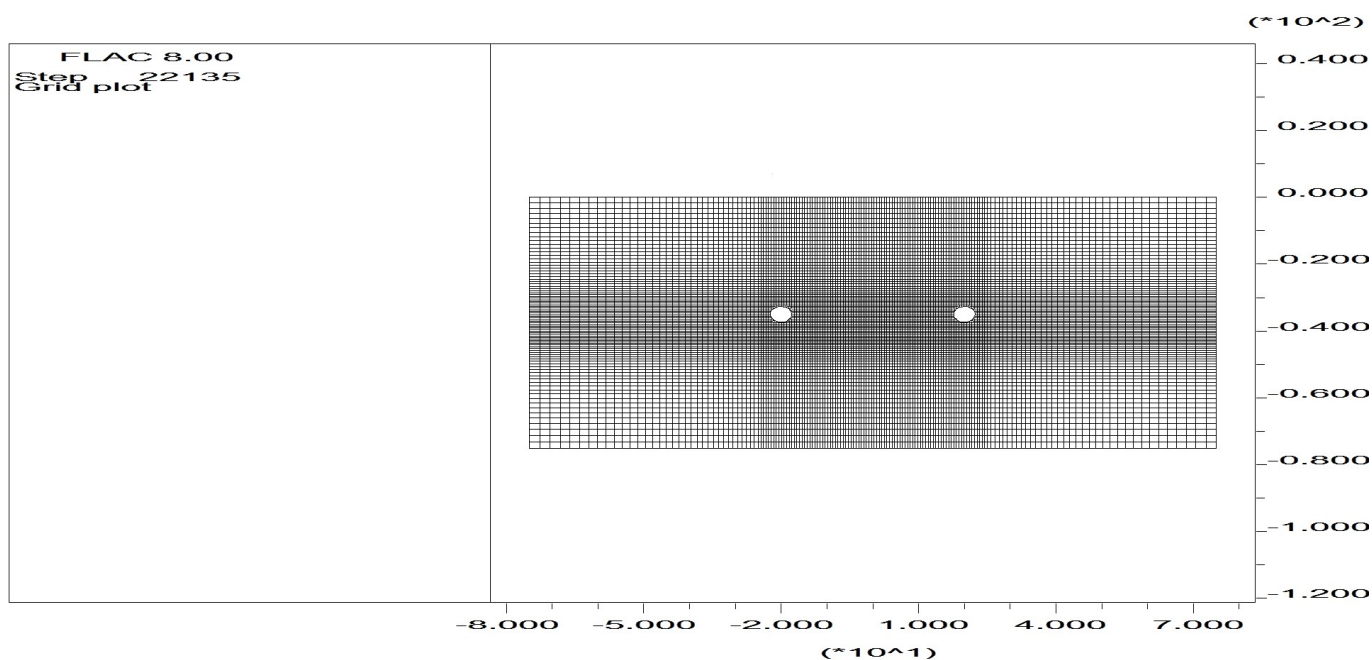


Figura 52 – Mesh di calcolo

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo. La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

definita tramite un fattore di rilascio, determinato dalle analisi assialsimmetriche. Per il valore di K_0 in questo caso si è assunto il valore reale stimato nella caratterizzazione geotecnica.

La seguente tabella schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 2 - Fasi di analisi

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|-----------------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati | 1.0 |

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 153 di 201 |

10.6.4 Verifica dei giunti - pressioni di contatto

La trasmissione degli sforzi assiali lungo l'anello, in corrispondenza dei giunti tra conci successivi, avviene su una superficie di contatto ridotta rispetto alla sezione effettiva in relazione alla presenza degli smussi ai bordi. Pertanto, su tali sezioni sono state condotte le verifiche alla pressione di contatto e alle trazioni indotte per effetto di un carico concentrato.

Le verifiche descritte nel seguito fanno riferimento al dettaglio della geometria dei giunti e dello schema di diffusione delle pressioni di contatto nei giunti tra concio e concio.

Per quanto riguarda le sollecitazioni, i momenti agenti in corrispondenza del giunto sono stati opportunamente ridotti.

10.6.5 Verifica delle pressioni di contatto

La verifica SLU, condotta in base al punto 5.4.8.1 dell'Eurocodice 2, è soddisfatta essendo:

$$N_d < F_{rdu} \leq F_{max}$$

dove:

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot (A_{c1}/A_{c0}) \cdot 0.5$$

$$A_{c0} = b_0 \cdot l_0$$

$$A_{c1} = b_1 \cdot l_1$$

$$F_{max} = 3.3 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}$$


Nelle relazioni sopra riportate risulta:

A_{c0} = area caricata della sezione di verifica in esame, essendo b_0 l'altezza di sezione reagente a compressione, con riferimento alle sollecitazioni di presso-flessione determinate con l'analisi per differenze finite per la condizione di carico considerata, ed l_0 la larghezza del concio decurtata degli smussi presenti sul bordo;

A_{c1} = massima area corrispondente geometricamente ad A_{c0} avente lo stesso baricentro ed inscritta nella sezione del concio, essendo b_1 l'altezza del prisma sostitutivo per carico eccentrico, corrispondente al valore di b_0 prima definito, quindi dedotta dall'altezza di sezione reagente a compressione, ed l_1 la larghezza del concio.

Per il cls le tensioni nel calcestruzzo, nel caso di SLU a $0.85f_{ck}/\gamma_c$

Le verifiche risultano soddisfatte essendo $N_d < F_{rdu} \leq F_{max}$.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 154 di 201 |

10.6.6 Verifica alle trazioni indotte

Il carico concentrato determina inoltre una forza di divaricamento sul concio in direzione radiale che può essere stimata secondo la formula proposta da Leonhardt:

$$F_t = 0.3 \times (N_d) \times (1 - b_0/b_1)$$

in cui b_0 e b_1 sono rispettivamente l'altezza della superficie di contatto e la dimensione del prisma sostitutivo per carico eccentrico, precedentemente determinate.

Allo scopo di assorbire la forza di trazione indotta, verranno disposte lungo la faccia del singolo concio un'area complessiva pari a:

Tipo I: 14φ24

Tipo II: 14φ20

Tipo III: 14φ16

Tipo IV: 14φ20

La massima forza di trazione resistente risulta pari a:

SLU:

Tipo I: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

Tipo II: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

Tipo III: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

Tipo IV: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

In entrambi i casi, le verifiche risultano soddisfatte essendo $F_t < F_{t,res}$.

Analisi 1 - TRV - Verifiche delle pressioni di contatto – Assenza di sovrascavo – 100 m di copertura – C45/55 – Classe IV

CANNA destra

| | 100m TRV | | | |
|----|----------|---------|---------|---------|
| | Nsle | Msle | N | M |
| 7 | 5313.00 | 87.62 | 5313.00 | 87.62 |
| 49 | 6020.00 | -114.50 | 6020.00 | -114.50 |
| 38 | 5501.00 | 93.62 | 5501.00 | 93.62 |
| 25 | 6051.00 | -99.23 | 6051.00 | -99.23 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| Step di calcolo | Sezione | N _{SLE} | M _{SLE} | M _{joint} | Eccentr | H/6 | b ₁ | d ₁ | A _{c0} | b ₂ | d ₂ | A _{c1} |
|-----------------|---------|------------------|------------------|--------------------|---------|------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|
| | | [kN] | [kNm] | [kNm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm ²] | [cm] | [cm] | [cm ²] |
| 100m TRV | 7 | 7969.5 | -131.4 | -92.0 | 3.2 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 49 | 9030.0 | 171.8 | 120.2 | 3.3 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 38 | 8251.5 | -140.4 | -98.3 | 3.2 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 25 | 9076.5 | 148.8 | 104.2 | 3.1 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

| CLS | | | | ACCIAIO | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| N _{SLU} | F _{rdu} | F _{max} | VERIF. | F _{td} | A _{smin} | F _{t,res} | VERIF. |
| [kN] | kN | kN | | [kN] | [cm ²] | [kN] | |
| 10360 | 16995 | 49211 | OK | 578 | 14.8 | 969.8 | OK |
| 11739 | 16995 | 49211 | OK | 655 | 16.8 | 969.8 | OK |
| 10727 | 16995 | 49211 | OK | 599 | 15.3 | 969.8 | OK |
| 11799 | 16995 | 49211 | OK | 659 | 16.8 | 969.8 | OK |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

CANNA sinistra

| | 100m TRV | | | |
|-----|----------|--------|---------|--------|
| | Nsle | Msle | N | M |
| 128 | 5315.00 | 81.64 | 5315.00 | 81.64 |
| 120 | 5981.00 | -52.15 | 5981.00 | -52.15 |
| 100 | 5583.00 | 74.77 | 5583.00 | 74.77 |
| 81 | 5961.00 | -94.14 | 5961.00 | -94.14 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| Step di calcolo | Sezione | N _{SLE} | M _{SLE} | M _{joint} | Eccentr | H/6 | b ₁ | d ₁ | A _{c0} | b ₂ | d ₂ | A _{c1} |
|-----------------|---------|------------------|------------------|--------------------|---------|------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|
| | | [kN] | [kNm] | [kNm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm ²] | [cm] | [cm] | [cm ²] |
| 100m TRV | 128 | 7972.5 | -122.5 | -85.7 | 3.1 | 5.8 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 120 | 8971.5 | 78.2 | 54.8 | 2.6 | 5.8 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 100 | 8374.5 | -112.2 | -78.5 | 2.9 | 5.8 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 81 | 8941.5 | 141.2 | 98.8 | 3.1 | 5.8 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

| CLS | | | | ACCIAIO | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| N _{SLU} | F _{rdu} | F _{max} | VERIF. | F _{td} | A _{smin} | F _{t,res} | VERIF. |
| [kN] | kN | kN | | [kN] | [cm ²] | [kN] | |
| 10364 | 16995 | 49211 | OK | 578 | 14.8 | 969.8 | OK |
| 11663 | 16995 | 49211 | OK | 651 | 16.6 | 969.8 | OK |
| 10887 | 16995 | 49211 | OK | 608 | 15.5 | 969.8 | OK |
| 11624 | 16995 | 49211 | OK | 649 | 16.6 | 969.8 | OK |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

*per il significato delle grandezze nelle tabelle si veda il paragrafo “verifica delle pressioni di contatto”

Le verifiche risultano soddisfatte

Analisi 2 - TRV - Verifica delle pressioni di contatto – 5cm sovrascavo – 200 m di copertura – C45/55– Classe III

CANNA DX

| 200m TRV sovr | | A | |
|---------------|--------|---|--|
| N | M | | |
| 8108.00 | -39.02 | | |
| 7530.00 | 41.18 | | |
| 8228.00 | -73.42 | | |
| 8324.00 | 66.54 | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| Step di calcolo | Sezione | N _{SLE} | M _{SLE} | M _{joint} | Eccentr | H/6 | b ₁ | d ₁ | A _{c0} | b ₂ | d ₂ | A _{c1} |
|-----------------|---------|------------------|------------------|--------------------|---------|------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|
| | | [kN] | [kNm] | [kNm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm ²] | [cm] | [cm] | [cm ²] |
| 200m TRV sovr | 0 | 12162.0 | 58.5 | 41.0 | 2.3 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 11295.0 | -61.8 | -43.2 | 2.4 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 12342.0 | 110.1 | 77.1 | 2.6 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 12486.0 | -99.8 | -69.9 | 2.6 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | | | | | | | | | | | | |

| CLS | | | | ACCIAIO | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| N _{SLU} | F _{rdu} | F _{max} | VERIF. | F _{td} | A _{smin} | F _{t,res} | VERIF. |
| [kN] | kN | kN | | [kN] | [cm ²] | [kN] | |
| 15811 | 16995 | 49211 | OK | 882 | 22.6 | 1266.0 | OK |
| 14684 | 16995 | 49211 | OK | 820 | 21.0 | 1266.0 | OK |
| 16045 | 16995 | 49211 | OK | 896 | 22.9 | 1266.0 | OK |
| 16232 | 16995 | 49211 | OK | 906 | 23.2 | 1266.0 | OK |

CANNA SX

| 200m TRV sovr | | A | |
|---------------|--------|---|--|
| N | M | | |
| 7009.00 | 40.89 | | |
| 7254.00 | 4.60 | | |
| 6986.00 | 11.11 | | |
| 7123.00 | -35.30 | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| Step di calcolo | Sezione | N _{SLE} | M _{SLE} | M _{joint} | Eccentr | H/6 | b ₁ | d ₁ | A _{c0} | b ₂ | d ₂ | A _{c1} |
|-----------------|---------|------------------|------------------|--------------------|---------|------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|
| | | [kN] | [kNm] | [kNm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm ²] | [cm] | [cm] | [cm ²] |
| 200m TRV sovr | 0 | 10513.5 | -61.3 | -42.9 | 2.4 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 10881.0 | -6.9 | -4.8 | 2.0 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 10479.0 | -16.7 | -11.7 | 2.1 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | 0 | 10684.5 | 53.0 | 37.1 | 2.3 | 5.83 | 35.0 | 140.0 | 4,900 | 43.0 | 148.0 | 6364 |
| | | | | | | | | | | | | |

| CLS | | | | ACCIAIO | | | |
|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| N _{SLU} | F _{rdu} | F _{max} | VERIF. | F _{td} | A _{smin} | F _{t,res} | VERIF. |
| [kN] | kN | kN | | [kN] | [cm ²] | [kN] | |
| 13668 | 16995 | 49211 | OK | 763 | 19.5 | 1266.0 | OK |
| 14145 | 16995 | 49211 | OK | 790 | 20.2 | 1266.0 | OK |
| 13623 | 16995 | 49211 | OK | 760 | 19.4 | 1266.0 | OK |
| 13890 | 16995 | 49211 | OK | 775 | 19.8 | 1266.0 | OK |

*per il significato delle grandezze nelle tabelle si veda il paragrafo “verifica delle pressioni di contatto”

Le verifiche risultano soddisfatte

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.7 Analisi n. 15 - Sezione di calcolo pk 25150

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

| Stratigrafia di calcolo | | C | Superficie piezometrica | γ | c'_k | ϕ'_k | E' | K_0 |
|--------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|----------------------|--------|-----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | |
| [-] | [m da pc] | [m] | [m] da calotta | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [MPa] | [-] |
| TRV | In tutto il modello | 100 | 95 | 22 | 78 | 20 | 300 | 0.66 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

| Caratteristiche | Conci dell'anello universale |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Spessore dei conci di cls | 45 cm |
| Coperture | < 100 |
| Classe di calcestruzzo utilizzato | C45/55 |
| Modulo elastico | 36000 MPa |
| Inerzia della sezione di cls | 7.6E-3 m ² |

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura costituita da 14φ14 sia in intradosso che in estradosso per coperture fino a 100m, da 100 a 200 m si applica la classe di armatura II 14φ16 mentre e una classe di

resistenza del calcestruzzo pari a C55/67, da 200 a 400 m la sezione ha un'altezza pari a 0.5m con una classe di resistenza di C55/67 e un'armatura costituita da 14 ϕ 20, da 400 a 600 m di copertura, invece, la classe di resistenza del calcestruzzo è pari a C60/75 e la classe di armatura è la I, 14 ϕ 24.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

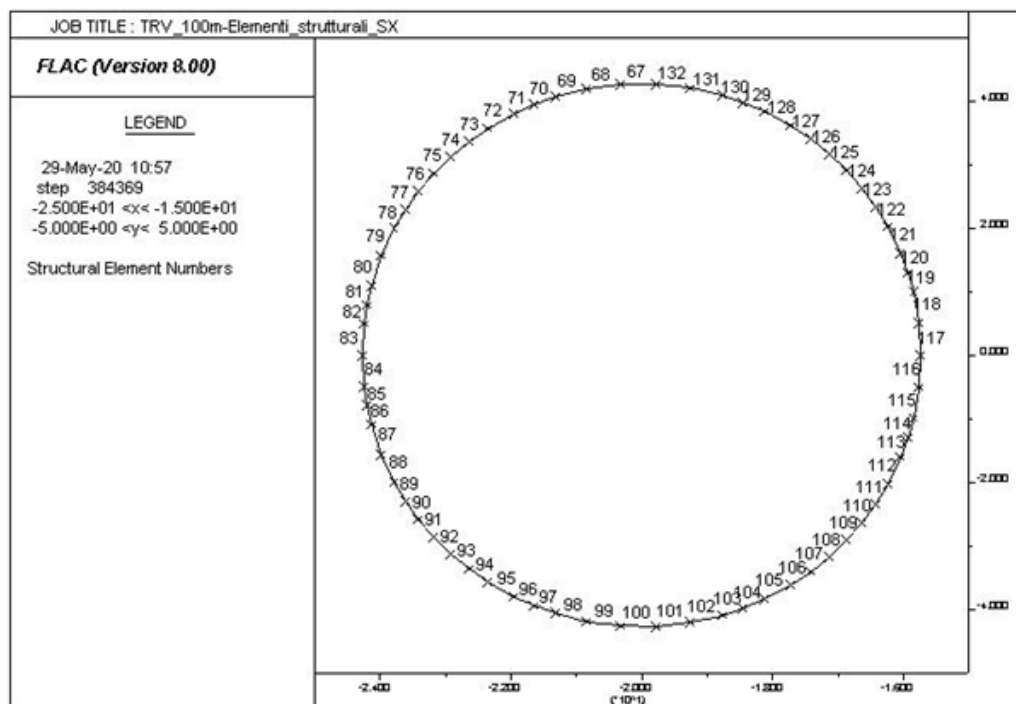


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

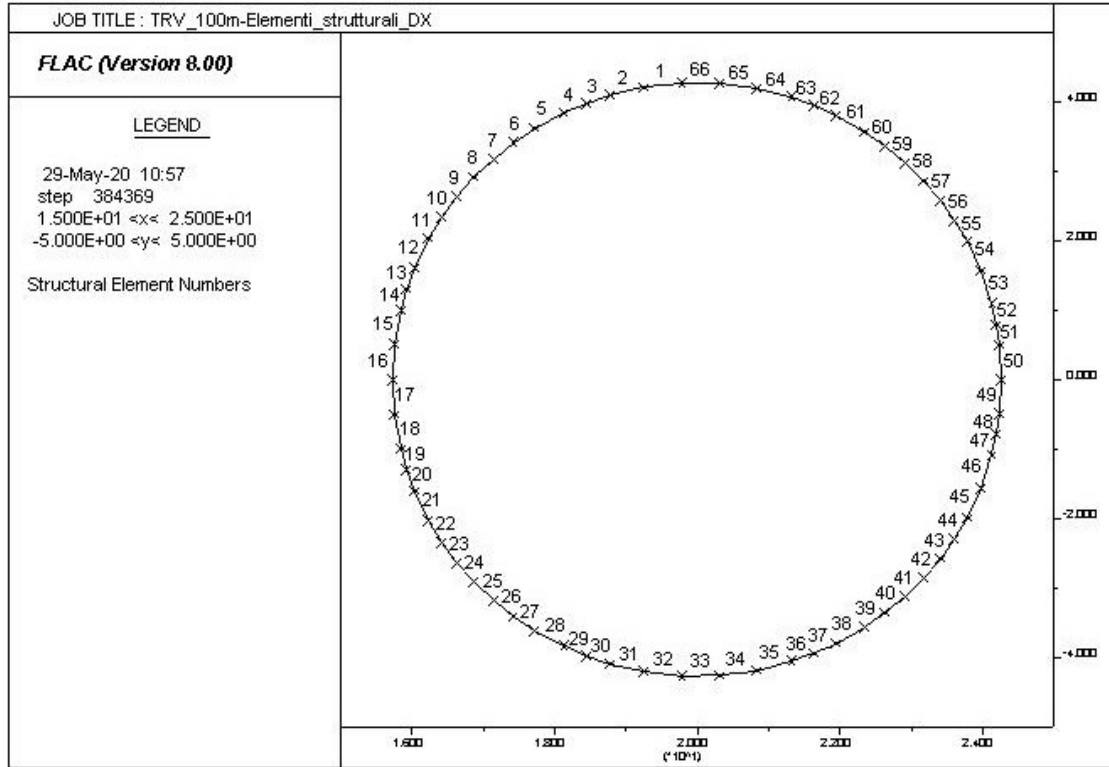


Figura 6 - Elementi liner canna destra

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

| GALL SX | | | | N | M1 | M2 | Mmax | T |
|---------------|-----|-----|-----|----------|---------|---------|-------|--------|
| Calotta | 132 | 132 | 67 | 15945.00 | 244.92 | -222.07 | 244.9 | 1.14 |
| piedritto dx | 112 | 112 | 113 | 17943.00 | -156.45 | 185.61 | 185.6 | 82.38 |
| arco rovescio | 97 | 97 | 98 | 16749.00 | 224.31 | -220.44 | 224.3 | -42.18 |
| piedritto sx | 81 | 81 | 82 | 17883.00 | -282.42 | 281.12 | 282.4 | 57.76 |

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

| GALL DX | ELE | NODO 1 | NODO 2 | N | M1 | M2 | Mmax | T |
|---------------|-----|--------|--------|----------|---------|---------|-------|--------|
| Calotta | 1 | 1 | 2 | 15939.00 | 262.86 | -242.34 | 262.9 | 0.00 |
| piedritto dx | 49 | 49 | 50 | 18060.00 | -343.50 | 332.64 | 343.5 | 63.14 |
| arco rovescio | 33 | 33 | 34 | 16503.00 | 280.86 | -266.28 | 280.9 | -10.39 |
| piedritto sx | 18 | 18 | 19 | 18153.00 | -297.69 | 285.60 | 297.7 | 16.91 |

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 65 mm.

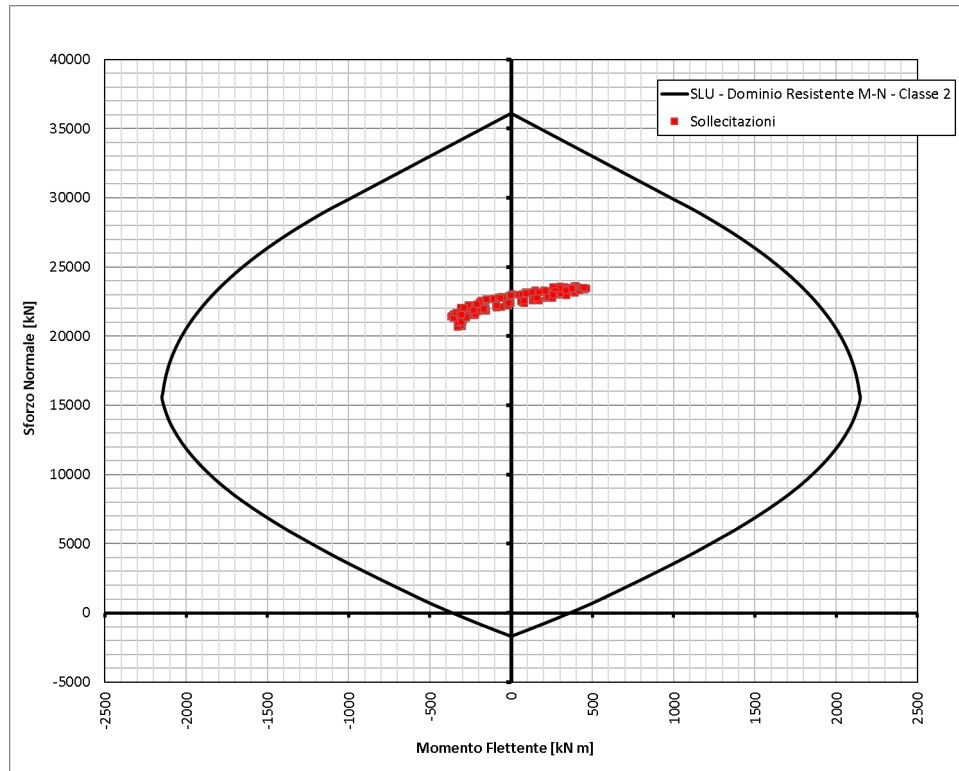


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.45 m) - Classe 4 - C45/55

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

| Sollecitazione da analisi | | Sollecitazione di verifica | |
|---------------------------|----------|----------------------------|----------|
| T | N | T | N |
| [N/m] | [N/m] | [N] | [N] |
| 7.12E+04 | 5.97E+06 | 2.78E+05 | 1.79E+07 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 165 di 201 |

| Geometria della sezione | | | Armatura longitudinale | | |
|--|---------|-----------------|--|---------|-----------------|
| b_w | 1500.00 | mm | ø_l | 14 | mm |
| h | 450.00 | mm | A_{ø_l} | 154 | mm ² |
| c | 63.00 | mm | s_l | 100.00 | mm |
| d | 387.00 | mm | n° strati | 1 | |
| A_c | 675000 | mm ² | n°ø/strato | 15 | |
| b_w d | 580500 | mm ² | A_{sl,tot} | 2309 | mm ² |
| k | 1.72 | | ρ_l | 0.00398 | |
| Materiali | | | | | |
| Cl_s : | | | Acciaio : | | |
| R_{ck} | 55.00 | MPa | f_{yk} | 450.00 | MPa |
| f_{ck} | 45.65 | MPa | f_{yd} | 391.3 | MPa |
| f_{cd} | 30.4 | MPa | γ_s | 1.15 | |
| γ_c | 1.50 | | | | |
| Sollecitazioni (SLU) | | | Resistente al taglio per Cl_s | | |
| N_{sd} | 17913.0 | kN | V_{Rd}^{min} | 839.4 | kN |
| σ_{cp} | 6.09 | MPa | V_{Rd} | 844.7 | kN |
| Verifiche di resistenza | | | | | |
| V_{Ed} | 277.52 | kN | V_{Rd} > V_{Ed} e V_{Rd} > V_{Rd}^{min} | | |
| OK, Sezione non armata verificata | | | | | |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 166 di 201 |

Verifiche SLE

Le verifiche SLE risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa vigente [NTC]. Poiché la sezione risulta interamente compressa non si ha l'apertura di fessure.

Tabella 5 – Analisi e Verifiche SLE per Canna Destra e Canna Sinistra

| VERIFICHE SEZIONE | |
|--|--|
| Rck 45/55 | |
| GEOMETRIA DELLA SEZIONE | CALCESTRUZZO |
| B cm = 300.0 base sezione | Rck Mpa = 55.00 resistenza caratteristica cubica |
| H cm = 45.0 altezza sezione | fck Mpa = 45.65 resistenza caratteristica cilindrica |
| Cs cm = 6.2 copriferro delle staffe | fcd Mpa = 30.43 resistenza di calcolo cilindrica |
| ACCIAIO | fctm Mpa = 4.34 resistenza media a trazione |
| fyk Mpa = 450.0 tensione caratteristica di snervamento | fctk Mpa = 3.04 resistenza caratteristica a trazione |
| fyd Mpa = 391.3 tensione di calcolo | fctd Mpa = 2.02 resistenza di calcolo a trazione |
| σ f adm Mpa = 360.0 tensione ammissibile armatura longitudinale | fc Max. es. Mpa = 20.54 Max. tensione esercizio = 0.45 x fck |
| σ fs adm Mpa = 360.0 tensione ammissibile staffe | σ c adm Mpa = 16.00 tensione ammissibile cls |
| γ cls kN/m3 = 25.0 peso specifico calcestruzzo | τ c o Mpa = 0.93 τ max. con armatura minima a taglio |
| N1 kN = 0.00 azione assiale Z=0 Positiva compressione | τ c 1 Mpa = 2.54 τ max. con armatura a taglio |
| NOTE | n = 15 Coeff. omogeneizzazione armature |
| No = N1 + γ cls x Z x A x B : azione assiale Positiva compressione | MOLTIPLICATORI DELLE AZIONI |
| Mo Positivo tende fibre lato armatura As | Cv = 1.00 Coeff. moltiplicativo azioni di Taglio |
| Mo Negativo tende fibre lato armatura A's | CM = 1.00 Coeff. moltiplicativo Momento flettente |
| S distanza tra le barre tese per verifica a fessurazione (< 14 φ) | CN = 1.00 Coeff. moltiplicativo Azione Assiale |

| SEZIONE | | AZIONI DI INGRESSO | | | AZIONI DI CALCOLO | | | ARMATURA As | | | ARMATURA A's | | |
|---------|------|--------------------|--------|----------|-------------------|-------------|------------|-----------------|------|--------|------------------|------|---------|
| elem | Z m | Vo kN | Mo kNm | No kN | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | n. ferri (x As) | φ mm | As cm2 | n. ferri (x A's) | φ mm | A's cm2 |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 262.86 | 15939.00 | 0.0 | 262.9 | 15939.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 49 | 0.00 | 0.0 | 343.5 | 18060.00 | 0.0 | 343.5 | 18060.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 33 | 0.00 | 0.0 | 280.86 | 16503.00 | 0.0 | 280.9 | 16503.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 18 | 0.00 | 0.0 | 297.69 | 18153.00 | 0.0 | 297.7 | 18153.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 132 | 0.00 | 0.0 | 244.92 | 15945.00 | 0.0 | 244.9 | 15945.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 112 | 0.00 | 0.0 | 185.61 | 17943.00 | 0.0 | 185.6 | 17943.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 97 | 0.00 | 0.0 | 224.31 | 16749.00 | 0.0 | 224.3 | 16749.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |
| 81 | 0.00 | 0.0 | 282.42 | 17883.00 | 0.0 | 282.4 | 17883.0 | 14 | 14 | 21.55 | 14 | 12 | 15.83 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 167 di 201 |

| elem | | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | d cm | d' cm | VERIFICA PRESSO - FLESSIONE | | | | TEST PR./ FL. |
|------|------|---------------|----------------|---------------|---------|----------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| | | | | | | | X cm | σ cls Mpa | σ f Mpa | σ' f Mpa | |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 262.9 | 15,939.0 | 38.10 | 6.80 | | -13.79 | -144.72 | -195.82 | SI |
| 49 | 0.00 | 0.0 | 343.5 | 18,060.0 | 38.10 | 6.80 | | -16.06 | -159.58 | -226.36 | SI * |
| 33 | 0.00 | 0.0 | 280.9 | 16,503.0 | 38.10 | 6.80 | | -14.36 | -149.01 | -203.60 | SI |
| 18 | 0.00 | 0.0 | 297.7 | 18,153.0 | 38.10 | 6.80 | | -15.70 | -164.99 | -222.86 | SI |
| 132 | 0.00 | 0.0 | 244.9 | 15,945.0 | 38.10 | 6.80 | | -13.63 | -146.51 | -194.12 | SI |
| 112 | 0.00 | 0.0 | 185.6 | 17,943.0 | 38.10 | 6.80 | | -14.50 | -173.54 | -209.62 | SI |
| 97 | 0.00 | 0.0 | 224.3 | 16,749.0 | 38.10 | 6.80 | | -14.01 | -157.08 | -200.68 | SI |
| 81 | 0.00 | 0.0 | 282.4 | 17,883.0 | 38.10 | 6.80 | | -15.36 | -163.58 | -218.48 | SI |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI
SI *

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.8 Analisi n. 16 - Sezione di calcolo pk 23850

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

| Stratigrafia di calcolo | | C | Superficie piezometrica | γ | c'_k | ϕ'_k | E' | K_0 |
|--|---------------------------|----------|-------------------------|----------------------|--------|-----------|-------|-------|
| <i>Formazione</i> | <i>Profondità da p.c.</i> | | | | | | | |
| [-] | [m da pc] | [m] | [m] da calotta | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [MPa] | [-] |
| TRV | In tutto il modello | 200 | 115 | 22 | 177 | 17 | 600 | 0.71 |
| <i>C = copertura (rispetto alla calotta)</i> <i>γ = peso di volume</i> <i>c'_k = coesione drenata</i> <i>ϕ'_k = angolo di attrito interno</i> <i>E' = modulo elastico</i> <i>K_0 = coefficiente di spinta a riposo</i> | | | | | | | | |

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

| Caratteristiche | Conci dell'anello universale |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Spessore dei conci di cls | 45 cm |
| Coperture | 100 – 200 m |
| Classe di calcestruzzo utilizzato | C45/55 |
| Modulo elastico | 38000 MPa |
| Inerzia della sezione di cls | 7.6E-3 m ² |

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura classe IV costituita da 14φ14 sia in intradosso che in estradosso per coperture fino a 100m, da 100 a 200 m si applica la classe di armatura III 14φ16 mentre e una classe di resistenza del calcestruzzo pari a C45/55, da 200 a 400 m la sezione ha un'altezza pari a 0.5m con una classe di resistenza di C55/67 e un'armatura classe II costituita da 14φ20, da 400 a 600 m di copertura, invece, la classe di resistenza del calcestruzzo è pari a C60/75 e la classe di armatura è la I, 14φ24.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

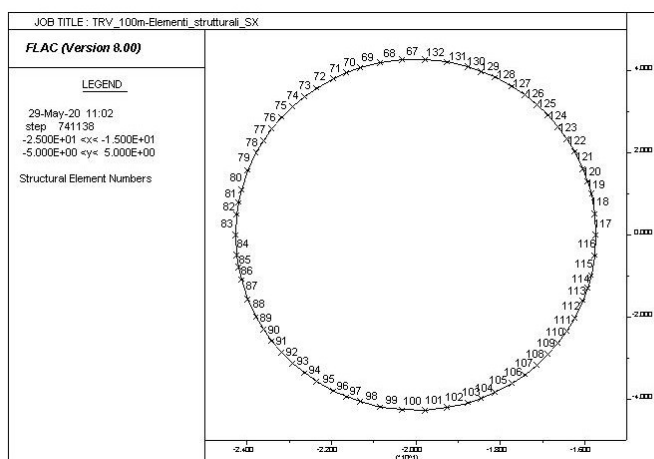


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

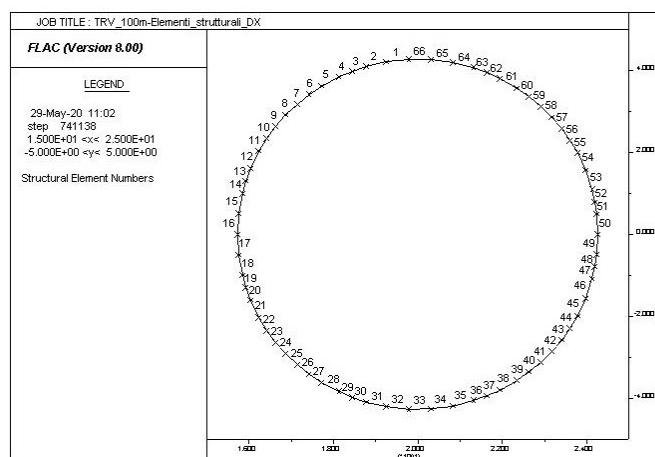


Figura 6 - Elementi liner canna destra

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

| GALL SX | | | | N | M1 | M2 | Mmax | T |
|---------------|-----|-----|-----|----------|---------|---------|-------|--------|
| Calotta | 67 | 67 | 68 | 21027.00 | 122.67 | -101.58 | 122.7 | 71.42 |
| piedritto dx | 111 | 111 | 112 | 21762.00 | 13.79 | -15.70 | 15.7 | 8.95 |
| arco rovescio | 97 | 97 | 98 | 20958.00 | 33.33 | -32.40 | 33.3 | 67.34 |
| piedritto sx | 77 | 77 | 78 | 21369.00 | -105.90 | 92.37 | 105.9 | 100.02 |

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

| GALL DX | ELE | NODO 1 | NODO 2 | N | M1 | M2 | Mmax | T |
|---------------|-----|--------|--------|----------|---------|---------|-------|--------|
| Calotta | 6 | 6 | 7 | 24324.00 | -117.06 | 113.82 | 117.1 | 5.94 |
| piedritto dx | 50 | 50 | 51 | 22590.00 | 123.54 | -88.06 | 123.5 | -18.71 |
| arco rovescio | 28 | 28 | 29 | 24684.00 | -220.26 | 150.22 | 220.3 | 15.86 |
| piedritto sx | 19 | 19 | 20 | 24972.00 | 199.62 | -162.93 | 199.6 | -10.15 |

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 65 mm.

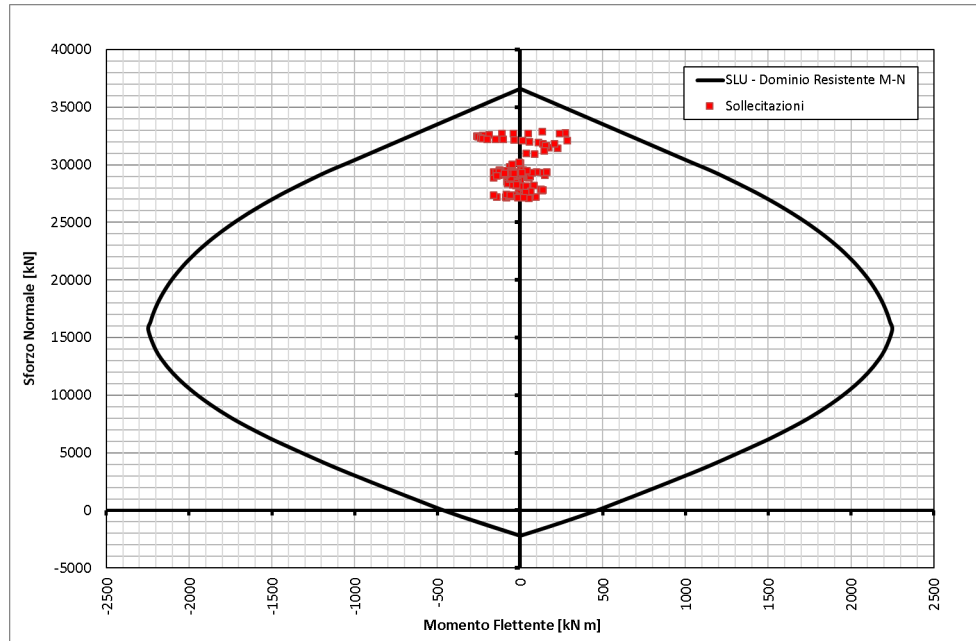


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.45 m) - Classe III – C45/55

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

| Sollecitazioni da analisi | | Sollecitazioni di verifica | |
|---------------------------|----------|----------------------------|-----------|
| T | N | T | N |
| [N] | [N] | [N/m] | [N/m] |
| 7.87E+04 | 7.40E+06 | 3.069E+05 | 2.219E+07 |

Verifica a taglio di sezioni rettangolari

1) Elementi non armati a taglio ($V_{Ed} \leq V_{Rd}$)

| Geometria della sezione | | | Armatura longitudinale | | |
|-------------------------|---------|-----------------|---------------------------|---------|-----------------|
| b_w | 1500.00 | mm | ø_l | 16 | mm |
| h | 450.00 | mm | A_{øl} | 201 | mm ² |
| c | 63.00 | mm | s_l | 100.00 | mm |
| d | 387.00 | mm | n° strati | 1 | |
| A_c | 675000 | mm ² | n°ø/strato | 15 | |
| b_w d | 580500 | mm ² | A_{sl,tot} | 3016 | mm ² |
| k | 1.72 | | ρ_l | 0.00520 | |

| Materiali | | | | | |
|-------------------------|-------|-----|-----------------------|--------|-----|
| Cl_s : | | | Acciaio : | | |
| R_{ek} | 55.00 | MPa | fy_k | 450.00 | MPa |
| f_{ek} | 45.65 | MPa | fy_d | 391.3 | MPa |
| f_{cd} | 30.4 | MPa | γ_s | 1.15 | |
| γ_c | 1.50 | | | | |

| Sollecitazioni (SLU) | | | Resistente al taglio per Cl _s | | |
|-----------------------|---------|-----|--|-------|----|
| N_{Sd} | 22185.0 | kN | V_{Rd}^{min} | 839.4 | kN |
| σ_{cp} | 6.09 | MPa | V_{Rd} | 874.0 | kN |

Verifiche di resistenza

| | | |
|-----------------------|---------------|----|
| V_{Ed} | 306.93 | kN |
|-----------------------|---------------|----|

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad e \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 174 di 201 |

Verifiche SLE

Le verifiche SLE risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa vigente [NTC]. Poiché la sezione risulta interamente compressa non si ha l'apertura di fessure.

Tabella 5 – Analisi e Verifiche SLE per Canna Destra e Canna Sinistra

VERIFICHE SEZIONE

Rck 45/55

| GEOMETRIA DELLA SEZIONE | | | | CALCESTRUZZO | | | |
|-------------------------|--|-------|---|------------------------------------|-------|-------|--|
| B | cm = | 300.0 | base sezione | Rck | Mpa = | 55.00 | resistenza caratteristica cubica |
| H | cm = | 45.0 | altezza sezione | fck | Mpa = | 45.65 | resistenza caratteristica cilindrica |
| Cs | cm = | 6.2 | copriferro delle staffe | fcd | Mpa = | 30.43 | resistenza di calcolo cilindrica |
| ACCIAIO | | | | fctm | Mpa = | 4.34 | resistenza media a trazione |
| f _{yk} | Mpa = | 450.0 | tensione caratteristica di snervamento | fctk | Mpa = | 3.04 | resistenza caratteristica a trazione |
| f _{yd} | Mpa = | 391.3 | tensione di calcolo | fctd | Mpa = | 2.02 | resistenza di calcolo a trazione |
| σ _{f adm} | Mpa = | 360.0 | tensione ammissibile armatura longitudinale | f _{c Max. es.} | Mpa = | 20.54 | Max. tensione esercizio = 0.45 x f _{ck} |
| σ _{fs adm} | Mpa = | 360.0 | tensione ammissibile staffe | σ _{c adm} | Mpa = | 16.00 | tensione ammissibile cls |
| γ _{cls} | kN/m ³ | 25.0 | peso specifico calcestruzzo | τ _{c o} | Mpa = | 0.93 | τ max. con armatura minima a taglio |
| N ₁ | kN = | 0.00 | azione assiale Z=0 Positiva compressione | τ _{c 1} | Mpa = | 2.54 | τ max. con armatura a taglio |
| NOTE | | | | n | = | 15 | Coeff. omogeneizzazione armature |
| No | = N ₁ + γ _{cls} x Z x A x B : azione assiale Positiva compressione | | | MOLTIPLICATORI DELLE AZIONI | | | |
| Mo | Positivo tende fibre lato armatura As | | | C _V | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo azioni di Taglio |
| Mo | Negativo tende fibre lato armatura A's | | | C _M | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo Momento flettente |
| S | distanza tra le barre tese per verifica a fessurazione (< 14 φ) | | | C _N | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo Azione Assiale |

| SEZIONE | | AZIONI DI INGRESSO | | | AZIONI DI CALCOLO | | | ARMATURA As | | | ARMATURA A's | | |
|---------|--------|--------------------|-----------|----------|-------------------|----------------|---------------|--------------------|---------|-----------------------|---------------------|---------|------------------------|
| elem | Z m | Vo kN | Mo kNm | No kN | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | n. ferri (x As) | φ mm | As cm ² | n. ferri (x A's) | φ mm | A's cm ² |
| 6 | 0.00 | 0.0 | 117.06 | 24324.00 | 0.0 | 117.1 | 24324.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 50 | 0.00 | 0.0 | 123.54 | 22590.00 | 0.0 | 123.5 | 22590.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 28 | 0.00 | 0.0 | 220.26 | 24684.00 | 0.0 | 220.3 | 24684.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 19 | 0.00 | 0.0 | 199.62 | 24972.00 | 0.0 | 199.6 | 24972.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 67 | 0.00 | 0.0 | 122.67 | 21027.00 | 0.0 | 122.7 | 21027.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 111 | 0.00 | 0.0 | 15.70 | 21762.00 | 0.0 | 15.7 | 21762.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 97 | 0.00 | 0.0 | 33.33 | 20958.00 | 0.0 | 33.3 | 20958.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |
| 77 | 0.00 | 0.0 | 105.90 | 21369.00 | 0.0 | 105.9 | 21369.0 | 14 | 16 | 28.15 | 14 | 16 | 28.15 |

| VERIFICA PRESSO - FLESSIONE | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|---------------|----------------|---------------|---------|----------|---------|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| elem | | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | d cm | d' cm | X cm | σ _{cls} Mpa | σ _f Mpa | σ' _f Mpa | TEST PR./ FL. |
| 6 | 0.00 | 0.0 | 117.1 | 24,324.0 | 38.00 | 7.00 | | -18.02 | -243.39 | -265.33 | SI * |
| 50 | 0.00 | 0.0 | 123.5 | 22,590.0 | 38.00 | 7.00 | | -16.87 | -224.65 | -247.80 | SI * |
| 28 | 0.00 | 0.0 | 220.3 | 24,684.0 | 38.00 | 7.00 | | -19.21 | -237.48 | -278.76 | SI * |
| 19 | 0.00 | 0.0 | 199.6 | 24,972.0 | 38.00 | 7.00 | | -19.22 | -242.43 | -279.84 | SI * |
| 67 | 0.00 | 0.0 | 122.7 | 21,027.0 | 38.00 | 7.00 | | -15.77 | -208.38 | -231.37 | SI |
| 111 | 0.00 | 0.0 | 15.7 | 21,762.0 | 38.00 | 7.00 | | -15.31 | -226.09 | -229.04 | SI |
| 97 | 0.00 | 0.0 | 33.3 | 20,958.0 | 38.00 | 7.00 | | -14.91 | -216.03 | -222.28 | SI |
| 77 | 0.00 | 0.0 | 105.9 | 21,369.0 | 38.00 | 7.00 | | -15.86 | -213.53 | -233.38 | SI |

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.9 Analisi n. 17 - Sezione di calcolo pk 19600

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

| Stratigrafia di calcolo | | C | Superficie piezometrica | γ | c'_k | ϕ'_k | E' | K_0 |
|--------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|----------------------|--------|-----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | |
| [-] | [m da pc] | [m] | [m] da calotta | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [MPa] | [-] |
| TRV | In tutto il modello | 300 | 90 | 22 | 391 | 15 | 900 | 0.74 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

| Caratteristiche | Conci dell'anello universale |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Spessore dei conci di cls | 50 cm |
| Coperture | 200-300 m |
| Classe di calcestruzzo utilizzato | C55/67 |
| Modulo elastico | 38000 MPa |
| Inerzia della sezione di cls | 10.4E-3 m ² |

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

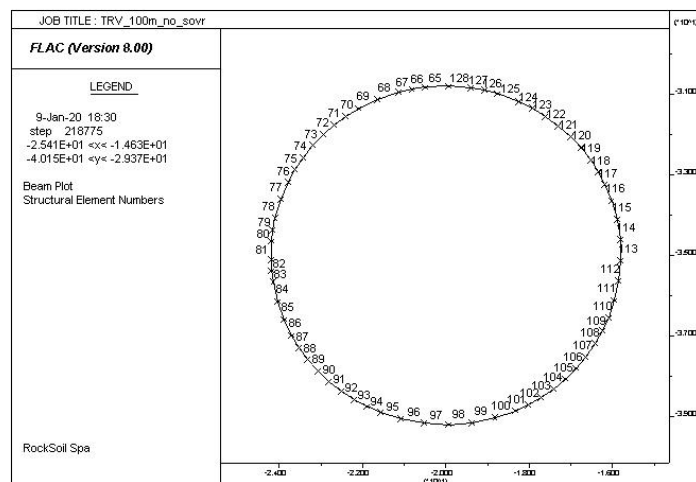
Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura costituita da 14 ϕ 14 sia in intradosso che in estradosso per coperture fino a 100m, da 100 a 200 m si applica la classe di armatura II 14 ϕ 16 mentre e una classe di resistenza del calcestruzzo pari a C55/67, da 200 a 400 m la sezione ha un'altezza pari a 0.5m con una classe di resistenza di C55/67 e un'armatura costituita da 14 ϕ 20, da 400 a 600 m di copertura, invece, la classe di resistenza del calcestruzzo è pari a C60/75 e la classe di armatura è la I, 14 ϕ 24.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.



| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

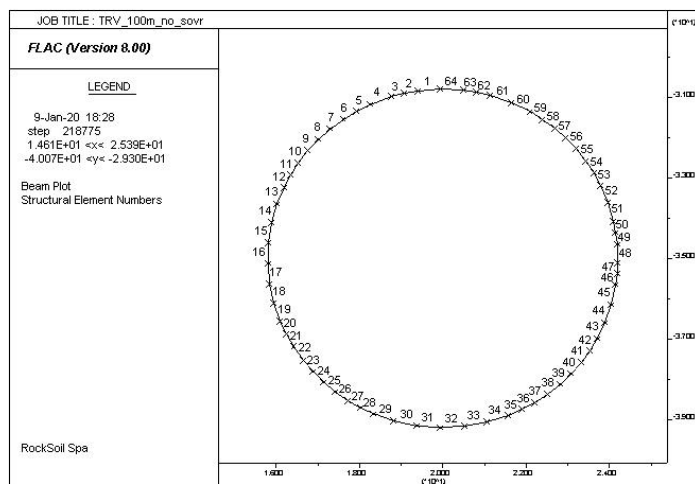


Figura 6 - Elementi liner canna destra

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

| GALL Sx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 121 | 121 | 122 | 9387.00 | 68.13 | -61.58 | 68.1 | 36609.30 | 265.71 | -240.16 | 265.71 |
| piedritto dx | 112 | 112 | 113 | 9878.00 | -53.23 | 49.93 | 53.2 | 38524.20 | -207.60 | 194.73 | 207.60 |
| arco rovescio | 90 | 90 | 91 | 9565.00 | 66.01 | -77.76 | 77.8 | 37303.50 | 257.44 | -303.26 | 303.26 |
| piedritto sx | 74 | 74 | 75 | 9500.00 | 52.30 | -37.02 | 52.3 | 37050.00 | 203.97 | -144.38 | 203.97 |

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

| GALL Dx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|--------|---------|-------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 7 | 7 | 8 | 9456.00 | 106.70 | -93.66 | 106.7 | 36878.40 | 416.13 | -365.27 | 416.13 |
| piedritto dx | 49 | 49 | 50 | 9875.00 | -95.45 | 95.80 | 95.8 | 38512.50 | -372.26 | 373.62 | 373.62 |
| arco rovescio | 39 | 39 | 40 | 9514.00 | 129.10 | -108.20 | 129.1 | 37104.60 | 503.49 | -421.98 | 503.49 |
| piedritto sx | 17 | 17 | 18 | 10310.00 | -65.56 | 67.59 | 67.6 | 40209.00 | -255.68 | 263.60 | 263.60 |

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 65 mm.

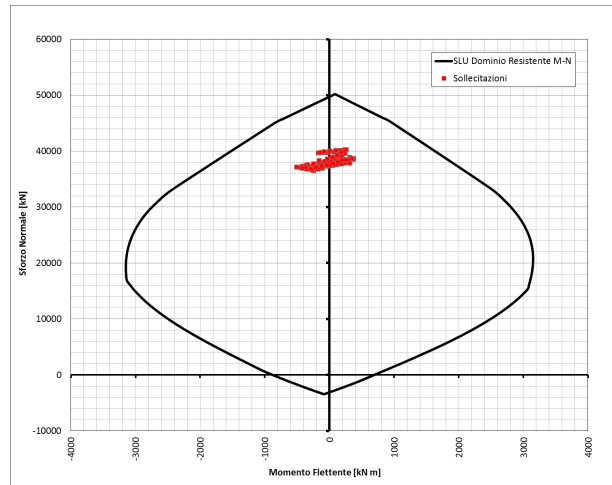


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.5 m) - Classe 2 – C55/67

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

| Sollecitazioni da analisi | | Sollecitazioni di verifica | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| T | N | T | N |
| [N/m] | [N/m] | [N] | [N] |
| 1.056E+05 | 9.548E+06 | 4.118E+05 | 2.864E+07 |

| Geometria della sezione | | |
|-------------------------|---------|-----------------|
| b_w | 1500.00 | mm |
| h | 500.00 | mm |
| c | 63.00 | mm |
| d | 437.00 | mm |
| A_c | 750000 | mm ² |
| b_w d | 655500 | mm ² |
| k | 1.68 | |

| Armatura longitudinale | | |
|----------------------------------|---------|-----------------|
| ø_l | 20 | mm |
| A_{ø_l} | 314 | mm ² |
| s_l | 100.00 | mm |
| n° strati | 1 | |
| n°ø/strato | 15 | |
| A_{sl,tot} | 4712 | mm ² |
| ρ_l | 0.00719 | |

| Materiali | | |
|-------------------------|--------|-----|
| Cl_s : | | |
| R_{ck} | 67.00 | MPa |
| f_{ck} | 55.61 | MPa |
| f_{cd} | 37.1 | MPa |
| γ_c | 1.50 | |
| Acciaio : | | |
| f_{yk} | 450.00 | MPa |
| f_{yd} | 391.3 | MPa |
| γ_s | 1.15 | |

| Sollecitazioni (SLU) | | |
|-----------------------|---------|-----|
| N_{Sd} | 28644.0 | kN |
| σ_{cp} | 7.41 | MPa |

| Resistente al taglio per Cl _s | | |
|--|--------|----|
| V_{Rd}^{min} | 1100.4 | kN |
| V_{Rd} | 1180.0 | kN |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 181 di 201 |

VERIFICHE SEZIONE

VERIFICA TENSIONI AMMISSIBILI (Positive soll. di trazione)

| elem | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | d cm | d' cm | VERIFICA PRESSO - FLESSIONE | | | | TEST PR / FL | |
|------|---------------|----------------|---------------|----------|----------|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------|------|
| | | | | | | X cm | σ cls Mpa | σ f Mpa | σ ' f Mpa | | |
| 7 | 0.00 | 0.0 | 320.1 | 28 368.0 | 42.80 | 7.20 | | -19.64 | -236.62 | -284.87 | SI * |
| 49 | 0.00 | 0.0 | 286.4 | 29 625.0 | 42.80 | 7.20 | | -20.17 | -250.72 | -293.88 | SI * |
| 39 | 0.00 | 0.0 | 387.3 | 28 542.0 | 42.80 | 7.20 | | -20.22 | -233.16 | -291.53 | SI * |
| 17 | 0.00 | 0.0 | 196.7 | 30 930.0 | 42.80 | 7.20 | | -20.34 | -269.47 | -299.11 | SI * |
| 121 | 0.00 | 0.0 | 204.4 | 28 161.0 | 42.80 | 7.20 | | -18.70 | -243.44 | -274.24 | SI |
| 112 | 0.00 | 0.0 | 159.7 | 29 634.0 | 42.80 | 7.20 | | -19.29 | -260.35 | -284.41 | SI * |
| 90 | 0.00 | 0.0 | 217.7 | 28 695.0 | 42.80 | 7.20 | | -19.12 | -247.34 | -280.16 | SI * |
| 74 | 0.00 | 0.0 | 156.9 | 28 500.0 | 42.80 | 7.20 | | -18.57 | -250.13 | -273.78 | SI |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI = tensioni inferiori alle ammissibili
SI * = tensioni inferiori alle Max. in esercizio (0.4 - 0.6 fck)

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.10 Analisi n. 18 - Sezione di calcolo pk 20150

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

| Stratigrafia di calcolo | | C | Superficie piezometrica | γ | c'_k | ϕ'_k | E' | K_0 |
|--------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|----------------------|--------|-----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | |
| [-] | [m da pc] | [m] | [m] da calotta | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [MPa] | [-] |
| TRV | In tutto il modello | 400 | 0 | 22 | 85 | 22 | 1200 | 1 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

| Caratteristiche | Conci dell'anello universale |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Spessore dei conci di cls | 50 cm |
| Coperture | 300 - 400 m |
| Classe di calcestruzzo utilizzato | C55/67 |
| Modulo elastico | 38000 MPa |
| Inerzia della sezione di cls | 10.4E-3 m ² |

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura costituita da 14φ14 sia in intradosso che in estradosso per

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

coperture fino a 100m, da 100 a 200 m si applica la classe di armatura II 14φ16 mentre e una classe di resistenza del calcestruzzo pari a C55/67, da 200 a 400 m la sezione ha un'altezza pari a 0.5m con una classe di resistenza di C55/67 e un'armatura costituita da 14φ20, da 400 a 600 m di copertura, invece, la classe di resistenza del calcestruzzo è pari a C60/75 e la classe di armatura è la I, 14φ24.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

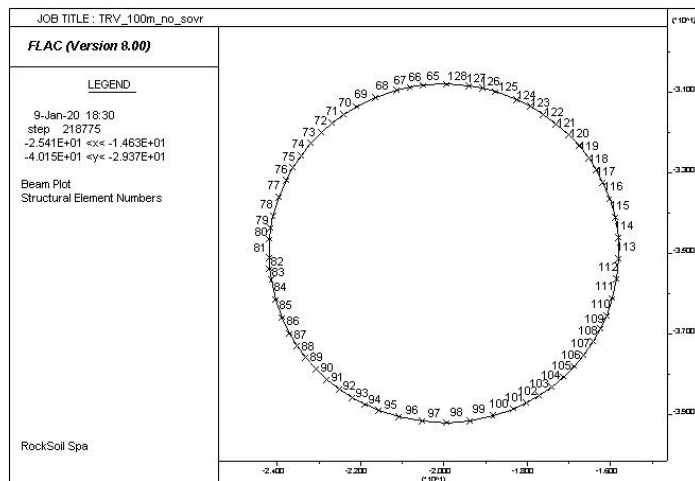


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

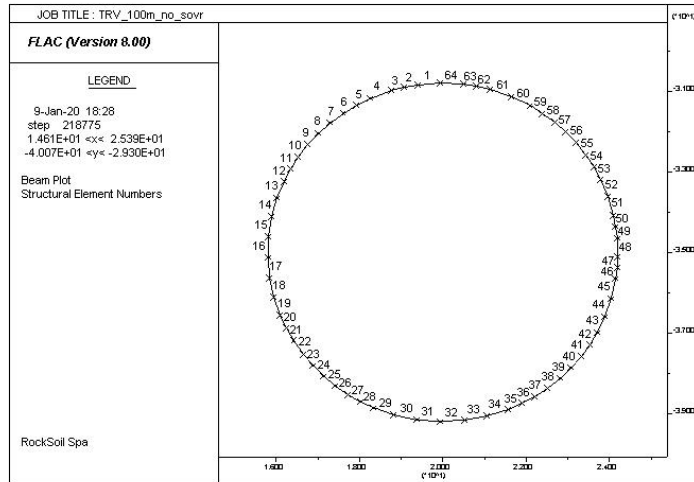


Figura 6 - Elementi liner canna destra

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

| GALL Sx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 53 | 53 | 54 | 8397.00 | 44.94 | -57.46 | 57.5 | 32748.30 | 175.27 | -224.09 | 224.09 |
| piedritto dx | 96 | 96 | 97 | 8306.00 | -39.85 | 34.43 | 39.9 | 32393.40 | -155.42 | 134.28 | 155.42 |
| arco rovescio | 79 | 79 | 80 | 8398.00 | 91.52 | -89.81 | 91.5 | 32752.20 | 356.93 | -350.26 | 356.93 |
| piedritto sx | 66 | 66 | 67 | 8059.00 | -94.68 | 94.75 | 94.8 | 31430.10 | -369.25 | 369.53 | 369.53 |

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

| GALL Dx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|-------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 1 | 1 | 2 | 8155.00 | 67.81 | -54.48 | 67.8 | 31804.50 | 264.46 | -212.47 | 264.46 |
| piedritto dx | 42 | 42 | 43 | 8395.00 | -58.97 | 77.63 | 77.6 | 32740.50 | -229.98 | 302.76 | 302.76 |
| arco rovescio | 28 | 28 | 29 | 8170.00 | 111.70 | -64.00 | 111.7 | 31863.00 | 435.63 | -249.60 | 435.63 |
| piedritto sx | 22 | 22 | 23 | 8652.00 | -45.14 | 40.45 | 45.1 | 33742.80 | -176.05 | 157.76 | 176.05 |

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 72 mm.

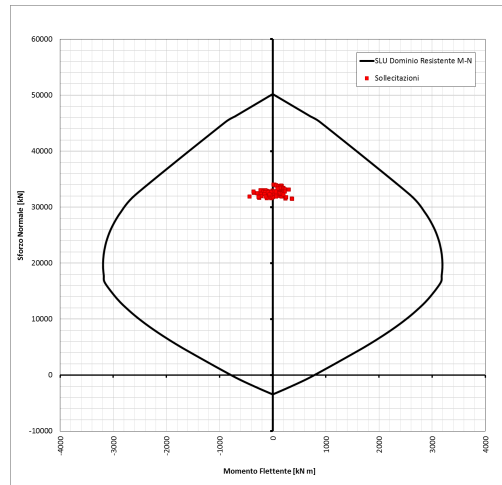


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.5 m) - Classe 2 – C55/67

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

| Sollecitazioni da analisi | | Sollecitazioni di verifica | |
|---------------------------|----------|----------------------------|----------|
| T | N | T | N |
| [N/m] | [N/m] | [N] | [N] |
| 1.06E+05 | 8.13E+06 | 4.15E+05 | 2.44E+07 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 187 di 201 |

| Geometria della sezione | | |
|-------------------------|---------|-----------------|
| b_w | 1500.00 | mm |
| h | 500.00 | mm |
| c | 63.00 | mm |
| d | 437.00 | mm |
| A_c | 750000 | mm ² |
| b_w d | 655500 | mm ² |
| k | 1.68 | |

| Armatura longitudinale | | |
|----------------------------------|---------|-----------------|
| ø_l | 20 | mm |
| A_{ø_l} | 314 | mm ² |
| s_l | 100.00 | mm |
| n° strati | 1 | |
| n°ø/strato | 15 | |
| A_{sl,tot} | 4712 | mm ² |
| ρ_l | 0.00719 | |

| Materiali | | | | | |
|-----------------------|-------|-----|-----------------------|--------|-----|
| Cls : | | | Acciaio : | | |
| R_{ck} | 67.00 | MPa | f_{yk} | 450.00 | MPa |
| f_{ck} | 55.61 | MPa | f_{yd} | 391.3 | MPa |
| f_{cd} | 37.1 | MPa | γ_s | 1.15 | |
| γ_c | 1.50 | | | | |

| Sollecitazioni (SLU) | | |
|-----------------------|---------|-----|
| N_{Sd} | 24402.0 | kN |
| σ_{cp} | 7.41 | MPa |

| Resistente al taglio per Cls | | |
|-------------------------------------|--------|----|
| V_{Rd}^{min} | 1100.4 | kN |
| V_{Rd} | 1180.0 | kN |

Verifiche di resistenza

| | | |
|-----------------------|---------------|----|
| V_{Ed} | 414.96 | kN |
|-----------------------|---------------|----|

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad \text{e} \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{\min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 189 di 201 |

VERIFICHE SEZIONE

VERIFICA TENSIONI AMMISSIBILI (Positive soll. di trazione)

| elem | Vo x Cv | Mo x CM | No x CN | d | d' | VERIFICA PRESSO - FLESSIONE | | | | TEST | |
|------|---------|---------|---------|----------|-------|-----------------------------|----------------|------------|-------------|---------|----|
| | | | | | | X | σ_{cls} | σ_f | σ'_f | | |
| | kN | kNm | kN | cm | cm | cm | Mpa | Mpa | Mpa | PR/ FL. | |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 203.4 | 24 465.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.45 | -210.21 | -239.53 | SI |
| 42 | 0.00 | 0.0 | 217.4 | 25 185.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.99 | -215.83 | -247.15 | SI |
| 28 | 0.00 | 0.0 | 335.1 | 24 510.0 | 41.80 | 8.20 | | -17.41 | -201.14 | -249.43 | SI |
| 22 | 0.00 | 0.0 | 135.4 | 25 956.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.87 | -228.82 | -248.33 | SI |
| 53 | 0.00 | 0.0 | 160.9 | 25 191.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.59 | -219.95 | -243.13 | SI |
| 96 | 0.00 | 0.0 | 119.6 | 24 918.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.12 | -220.42 | -237.65 | SI |
| 79 | 0.00 | 0.0 | 274.6 | 25 194.0 | 41.80 | 8.20 | | -17.40 | -211.79 | -251.35 | SI |
| 66 | 0.00 | 0.0 | 284.0 | 24 177.0 | 41.80 | 8.20 | | -16.85 | -201.76 | -242.69 | SI |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI = tensioni inferiori alle ammissibili
SI* = tensioni inferiori alle Max. in esercizio (0.4 - 0.6 fck)

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

10.6.11 Analisi n. 19 - Sezione di calcolo pk 20300

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

| Stratigrafia di calcolo | | C | Superficie piezometrica | γ | c'_k | ϕ'_k | E' | K_0 |
|--------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|----------------------|--------|-----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | |
| [-] | [m da pc] | [m] | [m] da calotta | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [MPa] | [-] |
| TRV | In tutto il modello | 600 | 0 | 22 | 85 | 22 | 1200 | 1 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| | Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C |

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

| Caratteristiche | Conci dell'anello universale |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Spessore dei conci di cls | 50 cm |
| Coperture | 400-600 m |
| Classe di calcestruzzo utilizzato | C60/75 |
| Modulo elastico | 39100 MPa |
| Inerzia della sezione di cls | 10.4E-3 m ² |

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura costituita da 14φ14 sia in intradosso che in estradosso per

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p> | | | | | |
| | <p>Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p> | <p>COMMESSA RS3U</p> | <p>LOTTO 40 D 07</p> | <p>CODIFICA CL</p> | <p>DOCUMENTO GN 03 0001</p> | <p>REV. C</p> |

coperture fino a 100m, da 100 a 200 m si applica la classe di armatura II 14φ16 mentre e una classe di resistenza del calcestruzzo pari a C55/67, da 200 a 400 m la sezione ha un'altezza pari a 0.5m con una classe di resistenza di C55/67 e un'armatura costituita da 14φ20, da 400 a 600 m di copertura, invece, la classe di resistenza del calcestruzzo è pari a C60/75 e la classe di armatura è la I, 14φ24.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

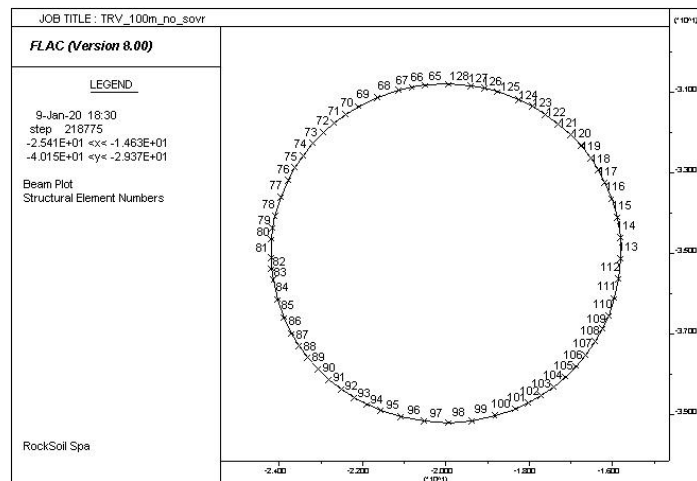


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

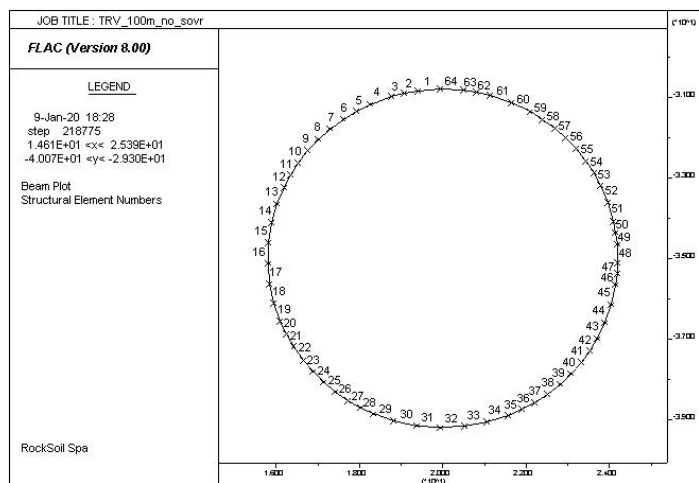


Figura 6 - Elementi liner canna destra

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

| GALL Sx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|---------|---------|-------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 53 | 53 | 54 | 11230.00 | 77.10 | -114.90 | 114.9 | 43797.00 | 300.69 | -448.11 | 448.11 |
| piedritto dx | 85 | 85 | 86 | 10620.00 | -168.60 | 146.20 | 168.6 | 41418.00 | -657.54 | 570.18 | 657.54 |
| arco rovescio | 79 | 79 | 80 | 11200.00 | 217.10 | -212.10 | 217.1 | 43680.00 | 846.69 | -827.19 | 846.69 |
| piedritto sx | 67 | 67 | 68 | 10120.00 | -145.10 | 91.09 | 145.1 | 39468.00 | -565.89 | 355.25 | 565.89 |

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

| GALL Dx | ELE | NODO 1 | NODO 2 | Sollecitazioni da analisi numerica | | | | Sollecitazioni di verifica | | | |
|---------------|-----|--------|--------|------------------------------------|--------|---------|-------|----------------------------|---------|---------|--------|
| | | | | N | M1 | M2 | Mmax | N | M1 | M2 | Mmax |
| Calotta | 52 | 52 | 1 | 10910.00 | 108.60 | -119.30 | 119.3 | 42549.00 | 423.54 | -465.27 | 465.27 |
| piedritto dx | 44 | 44 | 45 | 10980.00 | -77.31 | 82.79 | 82.8 | 42822.00 | -301.51 | 322.88 | 322.88 |
| arco rovescio | 28 | 28 | 29 | 10770.00 | 190.80 | -89.54 | 190.8 | 42003.00 | 744.12 | -349.21 | 744.12 |
| piedritto sx | 10 | 10 | 11 | 11170.00 | -83.73 | 76.58 | 83.7 | 43563.00 | -326.55 | 298.66 | 326.55 |

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 72 mm.

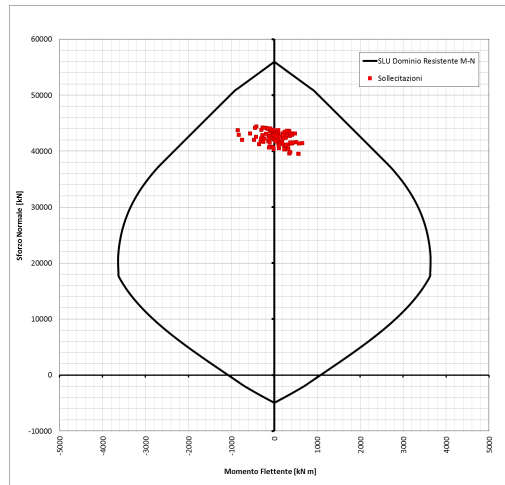


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.5 m) - Classe 1 – C60/75

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

| Sollecitazioni da Analisi | | Sollecitazioni da verifica | |
|---------------------------|----------|----------------------------|----------|
| T | N | T | N |
| [N/m] | [N/m] | [N] | [N] |
| -2.11E+05 | 1.09E+07 | -8.23E+05 | 3.27E+07 |

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

| | | | | | |
|----------|---------|----------|------------|------|------------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| RS3U | 40 D 07 | CL | GN 03 0001 | C | 195 di 201 |

| Geometria della sezione | | |
|-------------------------|---------|-----------------|
| b_w | 1500.00 | mm |
| h | 500.00 | mm |
| c | 63.00 | mm |
| d | 437.00 | mm |
| A_c | 750000 | mm ² |
| b_w d | 655500 | mm ² |
| k | 1.68 | |

| Armatura longitudinale | | |
|----------------------------------|---------|-----------------|
| ø_l | 24 | mm |
| A_{ø_l} | 452 | mm ² |
| s_l | 100.00 | mm |
| n° strati | 1 | |
| n°ø/strato | 15 | |
| A_{sl,tot} | 6786 | mm ² |
| ρ_l | 0.01035 | |

| Materiali | | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|
| Cls : | | Acciaio : | |
| R_{ck} | 75.00 MPa | f_{yk} | 450.00 MPa |
| f_{ck} | 62.25 MPa | f_{yd} | 391.3 MPa |
| f_{cd} | 41.5 MPa | γ_s | 1.15 |
| γ_c | 1.50 | | |

| Sollecitazioni (SLU) | | |
|-----------------------|---------|-----|
| N_{Sd} | 32700.0 | kN |
| σ_{cp} | 8.30 | MPa |

| Resistente al taglio per Cls | | |
|-------------------------------------|--------|----|
| V_{Rd}^{min} | 1209.0 | kN |
| V_{Rd} | 1344.8 | kN |

Verifiche di resistenza

| | | |
|-----------------------|---------------|----|
| V_{Ed} | 822.90 | kN |
|-----------------------|---------------|----|

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad \text{e} \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{\min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
RS3U 40 D 07 CL GN 03 0001 C 196 di 201

Le verifiche SLE risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa vigente [NTC]. Poiché la sezione risulta interamente compressa non si ha l'apertura di fessure.

Tabella 5 – Analisi e Verifiche SLE per Canna Destra e Canna Sinistra

| VERIFICHE SEZIONE | | Rck 60/75 | | | | | |
|--------------------------------|--|-----------|---|------------------------------------|-------|-------|---|
| GEOMETRIA DELLA SEZIONE | | | | CALCESTRUZZO | | | |
| B | cm = | 300.0 | base sezione | Rck | Mpa = | 75.00 | resistenza caratteristica cubica |
| H | cm = | 50.0 | altezza sezione | fck | Mpa = | 62.25 | resistenza caratteristica cilindrica |
| Cs | cm = | 7.2 | copriferro delle staffe | fdc | Mpa = | 41.50 | resistenza di calcolo cilindrica |
| ACCIAIO | | | | fctm | Mpa = | 5.34 | resistenza media a trazione |
| f _{yk} | Mpa = | 450.0 | tensione caratteristica di snervamento | fctk | Mpa = | 3.73 | resistenza caratteristica a trazione |
| f _{yd} | Mpa = | 391.3 | tensione di calcolo | fctd | Mpa = | 2.49 | resistenza di calcolo a trazione |
| σ _{f adm} | Mpa = | 360.0 | tensione ammissibile armatura longitudinale | fc Max. es. | Mpa = | 28.01 | Max. tensione esercizio = 0.45 x fck |
| σ _{fs adm} | Mpa = | 360.0 | tensione ammissibile staffe | σ _{c adm} | Mpa = | 21.00 | tensione ammissibile cls |
| γ _{cls} | kN/m ³ | 25.0 | peso specifico calcestruzzo | τ _{c o} | Mpa = | 1.20 | τ max. con armatura minima a taglio |
| N1 | kN = | 0.00 | azione assiale Z=0 Positiva compressione | τ _{c 1} | Mpa = | 3.11 | τ max. con armatura a taglio |
| NOTE | | | | n | = | 15 | Coeff. omogeneizzazione armature |
| No | = N1 + γ _{cls} x Z x A x B : azione assiale Positiva compressione | | | MOLTIPLICATORI DELLE AZIONI | | | |
| Mo | Positivo tende fibre lato armatura A's | | | C V | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo azioni di Taglio |
| Mo | Negativo tende fibre lato armatura A's | | | C M | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo Momento flettente |
| S | distanza tra le barre tese per verifica a fessurazione (< 14 φ) | | | C N | = | 1.00 | Coeff. moltiplicativo Azione Assiale |

| SEZIONE | | AZIONI DI INGRESSO | | | AZIONI DI CALCOLO | | | ARMATURA As | | | ARMATURA A's | | | ARMATURA A TAGLIO | | | distanza barre |
|---------|------|--------------------|--------|----------|-------------------|-------------|------------|-----------------|------|--------------------|------------------|------|---------------------|-------------------|----------|------------|----------------|
| elem | Z m | Vo kN | Mo kNm | No kN | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | n. ferri (x As) | φ mm | As cm ² | n. ferri (x A's) | φ mm | A's cm ² | φ mm | passo cm | n. braccia | S (< 14 φ) mm |
| 52 | 0.00 | 0.0 | 334.04 | 32730.00 | 0.0 | 334.0 | 32730.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 44 | 0.00 | 0.0 | 231.93 | 32940.00 | 0.0 | 231.9 | 32940.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 28 | 0.00 | 0.0 | 572.4 | 32310.00 | 0.0 | 572.4 | 32310.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 10 | 0.00 | 0.0 | 251.19 | 33510.00 | 0.0 | 251.2 | 33510.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 53 | 0.00 | 0.0 | 321.72 | 33690.00 | 0.0 | 321.7 | 33690.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 85 | 0.00 | 0.0 | 505.80 | 31860.00 | 0.0 | 505.8 | 31860.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 79 | 0.00 | 0.0 | 651.30 | 33600.00 | 0.0 | 651.3 | 33600.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |
| 67 | 0.00 | 0.0 | 435.30 | 30360.00 | 0.0 | 435.3 | 30360.0 | 14 | 24 | 63.33 | 14 | 24 | 63.33 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100 |

| VERIFICA TENSIONI AMMISSIBILI | | (Positive soll. di trazione) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------------------------------|-------------|------------|-------------------|-------|------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------|--|--|--|--|--|------|
| elem | Z m | AZIONI DI INGRESSO | | | AZIONI DI CALCOLO | | | VERIFICA PRESSO - FLESSIONE | | | | | | | | | TEST |
| | | Vo x Cv kN | Mo x CM kNm | No x CN kN | d cm | d' cm | X cm | σ _{cls} Mpa | σ _f Mpa | σ' _f Mpa | PR/ FL. | | | | | | |
| 52 | 0.00 | 0.0 | 334.0 | 32 730.0 | 41.60 | 8.40 | | -21.66 | -267.71 | -313.30 | SI * | | | | | | |
| 44 | 0.00 | 0.0 | 231.9 | 32 940.0 | 41.60 | 8.40 | | -21.08 | -276.54 | -308.19 | SI * | | | | | | |
| 28 | 0.00 | 0.0 | 572.4 | 32 310.0 | 41.60 | 8.40 | | -23.04 | -247.71 | -325.84 | SI * | | | | | | |
| 10 | 0.00 | 0.0 | 251.2 | 33 510.0 | 41.60 | 8.40 | | -21.55 | -280.28 | -314.57 | SI * | | | | | | |
| 53 | 0.00 | 0.0 | 321.7 | 33 690.0 | 41.60 | 8.40 | | -22.14 | -277.07 | -320.98 | SI * | | | | | | |
| 85 | 0.00 | 0.0 | 505.8 | 31 860.0 | 41.60 | 8.40 | | -22.32 | -248.26 | -317.30 | SI * | | | | | | |
| 79 | 0.00 | 0.0 | 651.3 | 33 600.0 | 41.60 | 8.40 | | -24.34 | -253.78 | -342.67 | SI * | | | | | | |
| 67 | 0.00 | 0.0 | 435.3 | 30 360.0 | 41.60 | 8.40 | | -20.95 | -239.76 | -299.17 | SI | | | | | | |

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI = tensioni inferiori alle ammissibili
SI* = tensioni inferiori alle Max. in esercizio (0.4 - 0.6 fck)

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 197 di 201 |

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|----------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 198 di 201 |

Azioni di mitigazione dei potenziali rischi

Le azioni di mitigazione dei potenziali rischi individuati nella fase conoscitiva sono state descritte nei paragrafi precedenti e sono di seguito riepilogate:

Rischi potenziali

Sono di seguito descritte le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico, geotecnico e ambientale, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie, e le conseguenti azione di mitigazione previste in progetto. La mappatura dei diversi rischi è illustrata nell'elaborato "Profilo geotecnico" di ogni singola galleria e generale (0). Oltre alle criticità di seguito riportate, che riguardano l'intero Lotto, si rimanda ai paragrafi precedenti in cui si sono descritte le criticità specifiche per le singole tratte delle gallerie di linea e imbocchi.

Presenza di acquiferi produttivi

Corpi idrici produttivi e caratterizzati da permeabilità media relativamente alta sono localizzati all'interno della Formazione di Terravecchia, in particolare nel membro sabbioso-conglomeratico (complesso idrogeologico CSC, $1E-07 < k < 1E-05$).

Presenza di gas

Dati bibliografici integrati con le osservazioni di terreno e misurazioni fatte in sondaggio sia nella presente fase progettuale sia in fase di progettazione preliminare confermano che la potenziale presenza di gas in galleria, metano in particolare, rappresenta un rischio non trascurabile.

Manifestazioni gassose che danno origine a vulcani di fango (le cosiddette "maccalube") sono note nell'area di Caltanissetta, alla cui periferia est si trova un campo di emanazioni gassose attivo. Da dati bibliografici sono considerate suscettibili alla presenza di gas metano la Formazione Terravecchia, il Flysch Numidico e le Argille Variegate. Dati storici riportano anche la presenza di emanazioni superficiali di gas nei pressi di Marianopoli, mentre i rilievi di gas metano effettuati a boccaforo in alcuni sondaggi del PP hanno confermato la presenza di metano nel sottosuolo.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 199 di 201 |

11 FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO

11.1 Criteri generali

Nel caso di scavo meccanizzato, la flessibilità in fase di avanzamento, in risposta alle condizioni riscontrate, è garantita dalla variabilità dei parametri operativi di controllo della TBM.

Pertanto, sulla base dei dati macchina raccolti durante l'avanzamento e le risultanze del monitoraggio geotecnico e topografico in superficie e in galleria, i parametri macchina (ad es.: contropressione al fronte) saranno modificati operando all'interno della variabilità prevista in fase progettuale.

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

11.2 Monitoraggio in corso d'opera

Nella fase realizzativa dovrà essere posto in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare le previsioni progettuali e ad affinare le soluzioni tecniche nell'ambito delle variabilità indicate in progetto.

Con riferimento alla realizzazione della galleria naturale il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

Si riportano di seguito alcuni esempi da valutare se pertinenti con l'opera in progetto

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

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

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


| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 200 di 201 |

- il monitoraggio degli spostamenti verticali assoluti e relativi dei terreni di copertura nelle tratte a bassa copertura mediante assestimetri;
- il monitoraggio piezometrico per la misura della variazione della quota di falda nelle tratte a bassa copertura;
- il monitoraggio inclinometrico per la misura degli spostamenti orizzontali nelle tratte a bassa copertura.

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

Le grandezze individuate come rappresentative dovranno essere rilevate e controllate con un sistema di misura che abbia un grado di precisione compatibile con i valori attesi per le grandezze sopra dette.

Per ulteriori dettagli riguardo le frequenze delle letture e gli altri aspetti legati al monitoraggio delle opere minori si rimanda agli elaborati specialistici allegati al progetto.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|----------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA | | | | | |
| Galleria Trinacria - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 D 07 | CODIFICA CL | DOCUMENTO GN 03 0001 | REV. C | FOGLIO 201 di 201 |

12 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione della galleria Trinacria.

La progettazione delle opere in sottterraneo è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (0), articolandosi nelle seguenti fasi:

1. Fase conoscitiva (cap. 8): questa fase è stata dedicata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico di inserimento in cui sarà realizzata la galleria, considerati anche i dati relativi alle precedenti fasi progettuali, ed ha portato alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo utilizzato per le successive fasi del progetto.

2. Fase di diagnosi (cap. 9): in questa fase è stata eseguita la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione, per la determinazione delle categorie di comportamento; sulla base delle analisi condotte, lungo il tracciato della galleria il comportamento del fronte allo scavo risulta sia di tipo stabile o stabile a breve termine (categorie A e B) sia di tipo instabile (categoria C).

3. Fase di terapia (cap. 10): si prevede di realizzare lo scavo sia con metodo meccanizzato che con metodo tradizionale. Entrambe le soluzioni progettuali sono state analizzate verificandone adeguatezza ed efficacia in tutte le fasi costruttive previste ed in condizioni di esercizio.

Il progetto è completato dal piano di monitoraggio (cap. 11) da predisporre ed attuare nella fase realizzativa, nel quale sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso e della galleria al procedere dello scavo e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.

ALLEGATO 1

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| TITOLO | |
| TIPO DI DOCUMENTO | Documento – Formato A4 |
| CODIFICA | RS3U40D07CLGN0300001C |
| PAGINE | 72 |
| DATA | 05-2020 |
| SORGENTE | U.O. Gallerie Italferr S.p.A. |
| NOTE | - |

Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

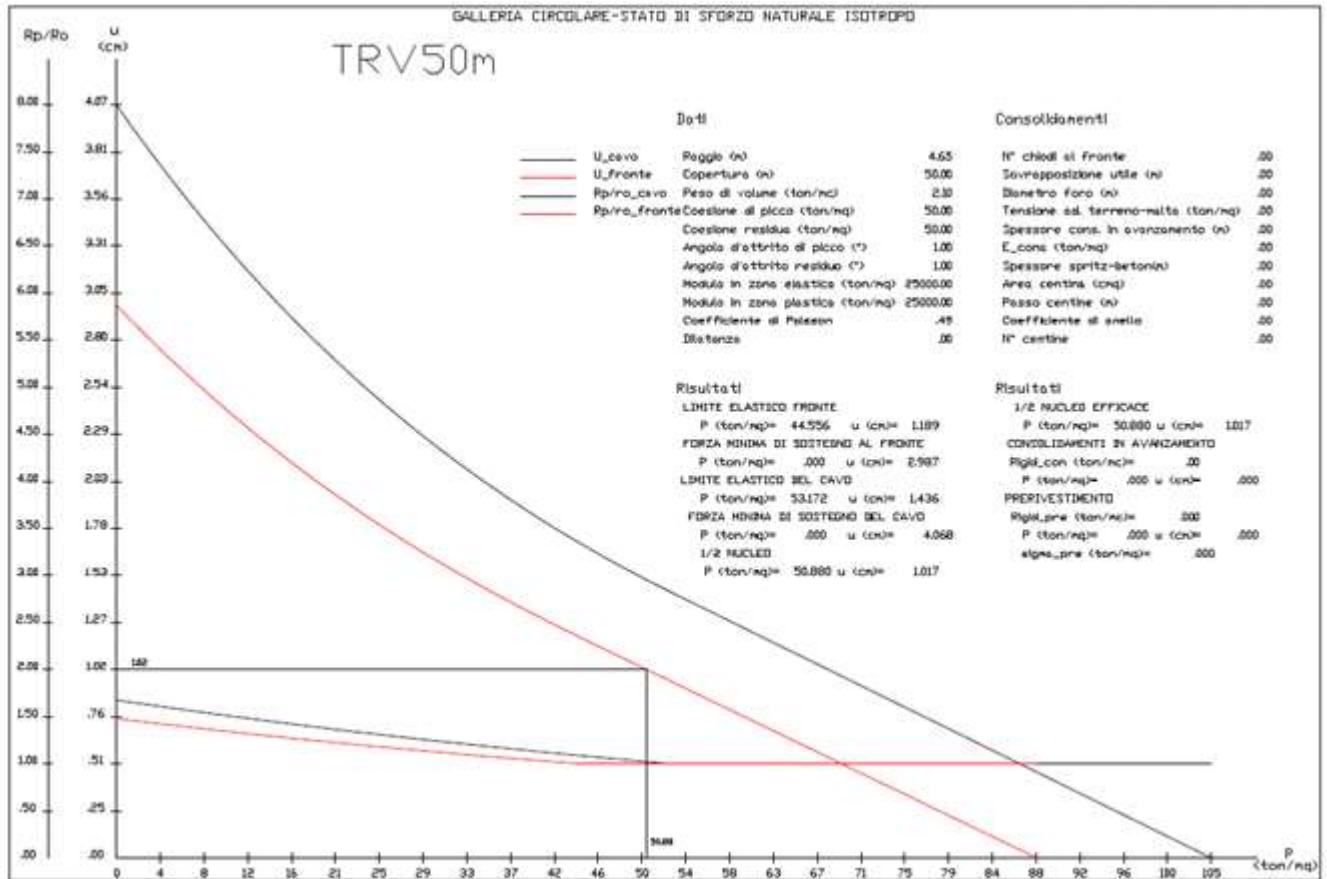


Figura 1: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 50 metri

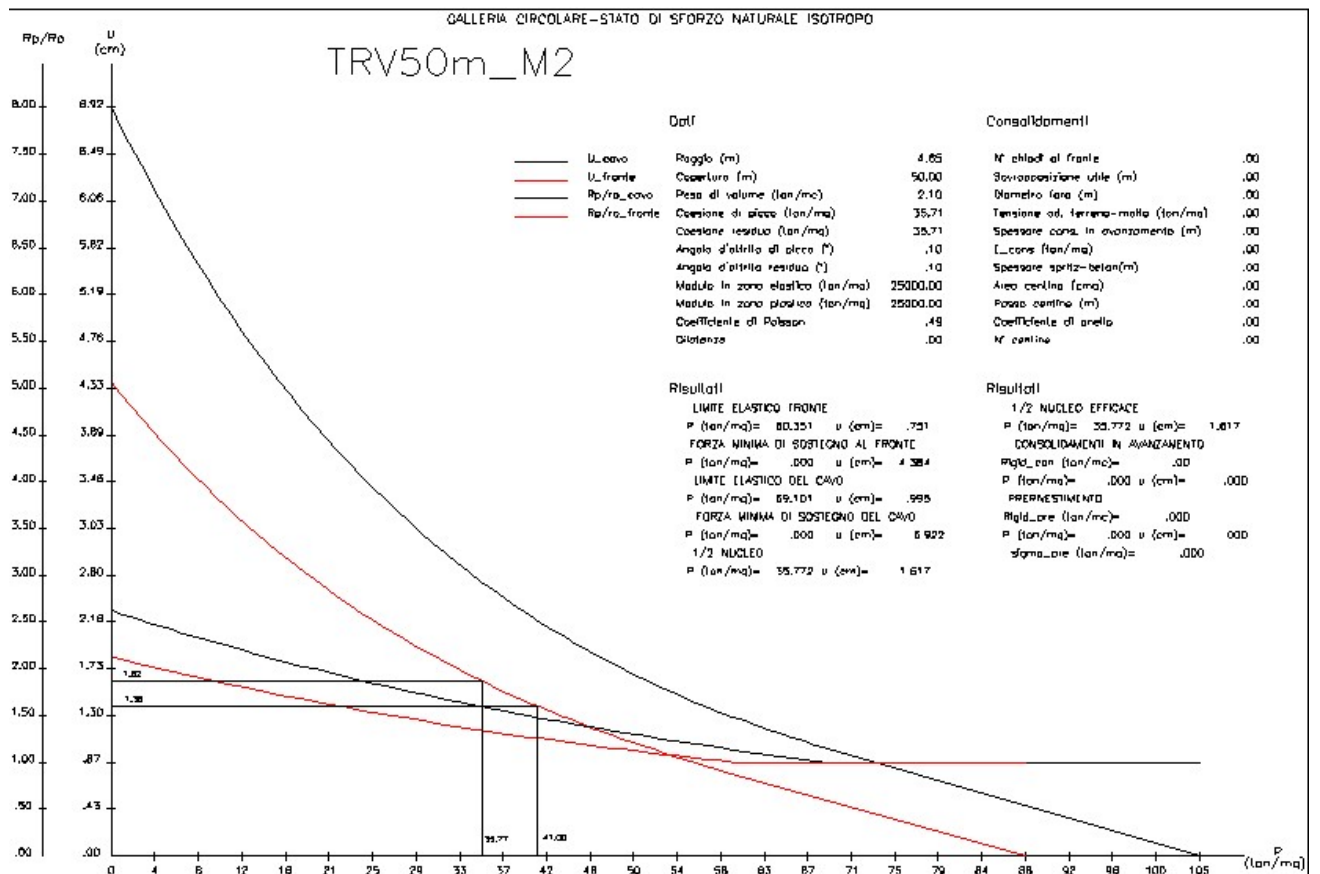


Figura 2: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 50 metri

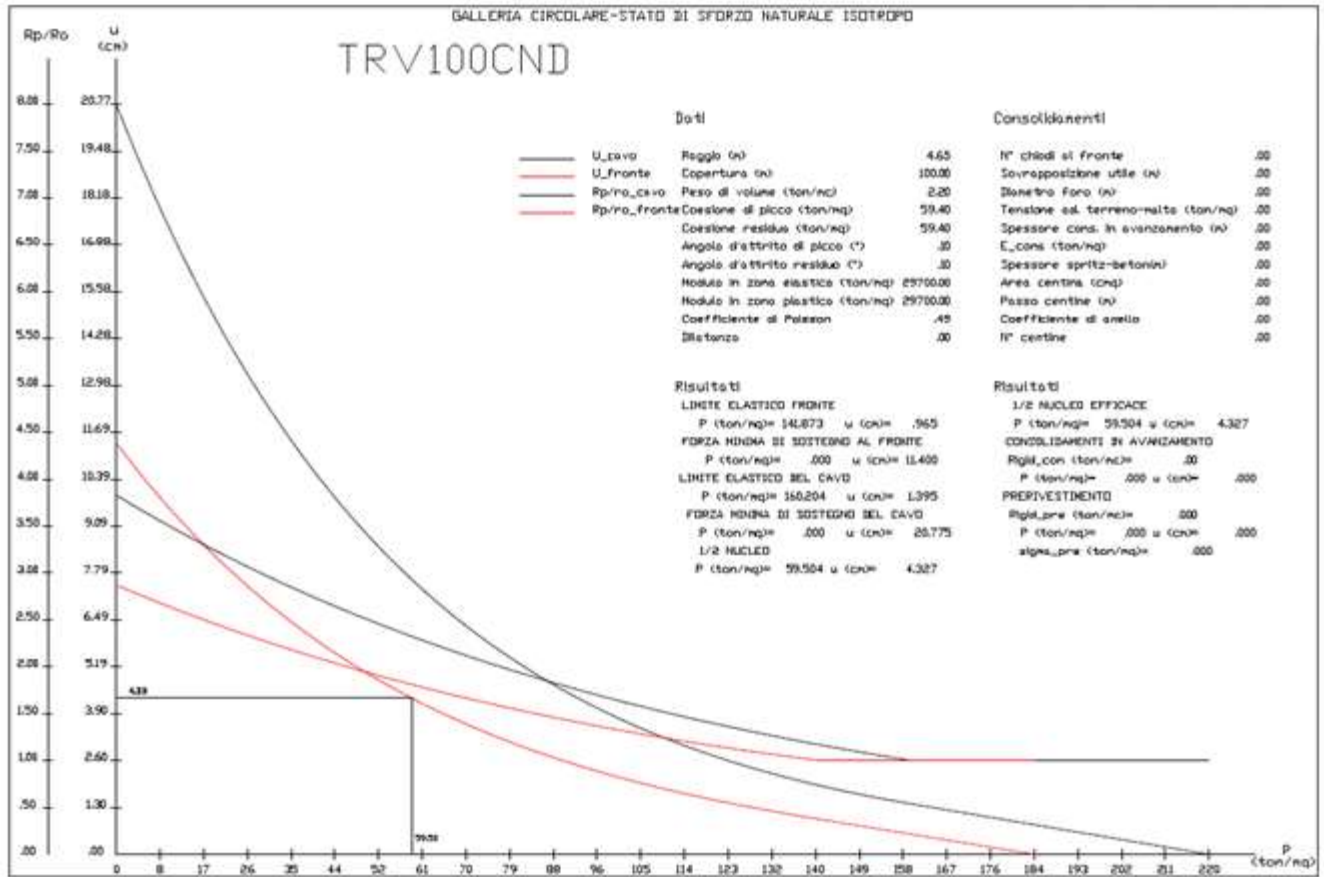


Figura 3: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 100 metri

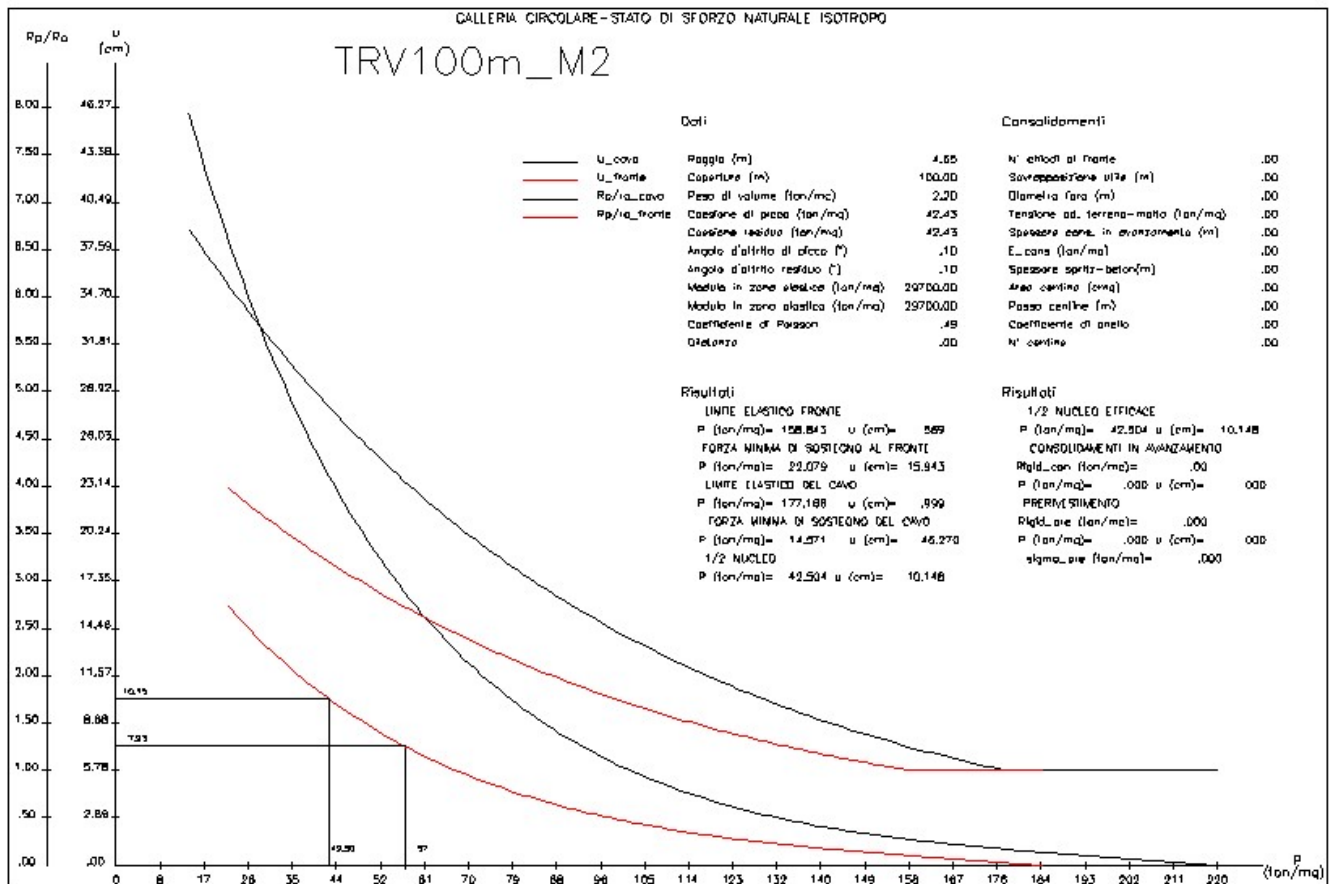


Figura 4: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 100 metri

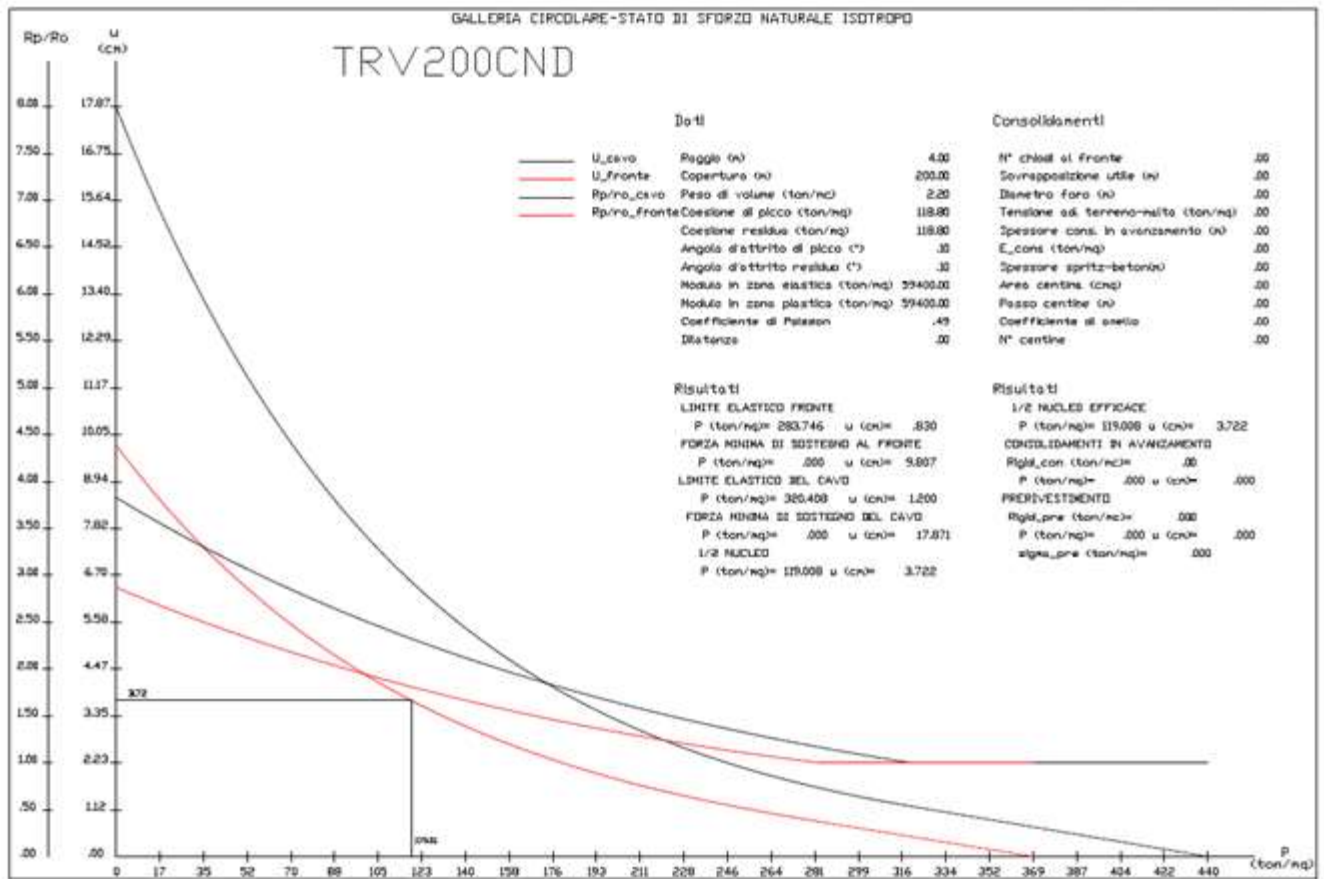


Figura 5: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 200 metri

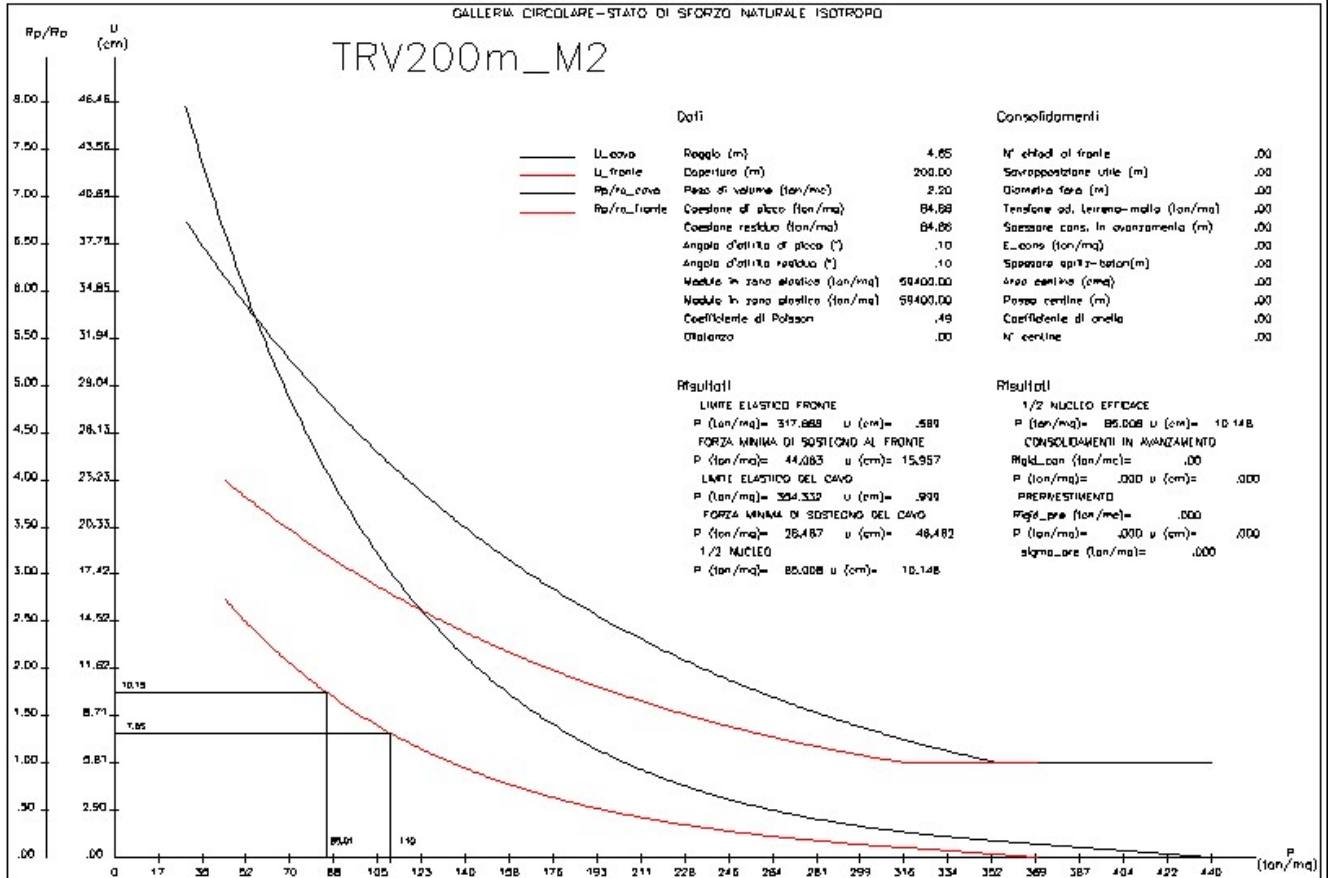


Figura 6: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 200 metri

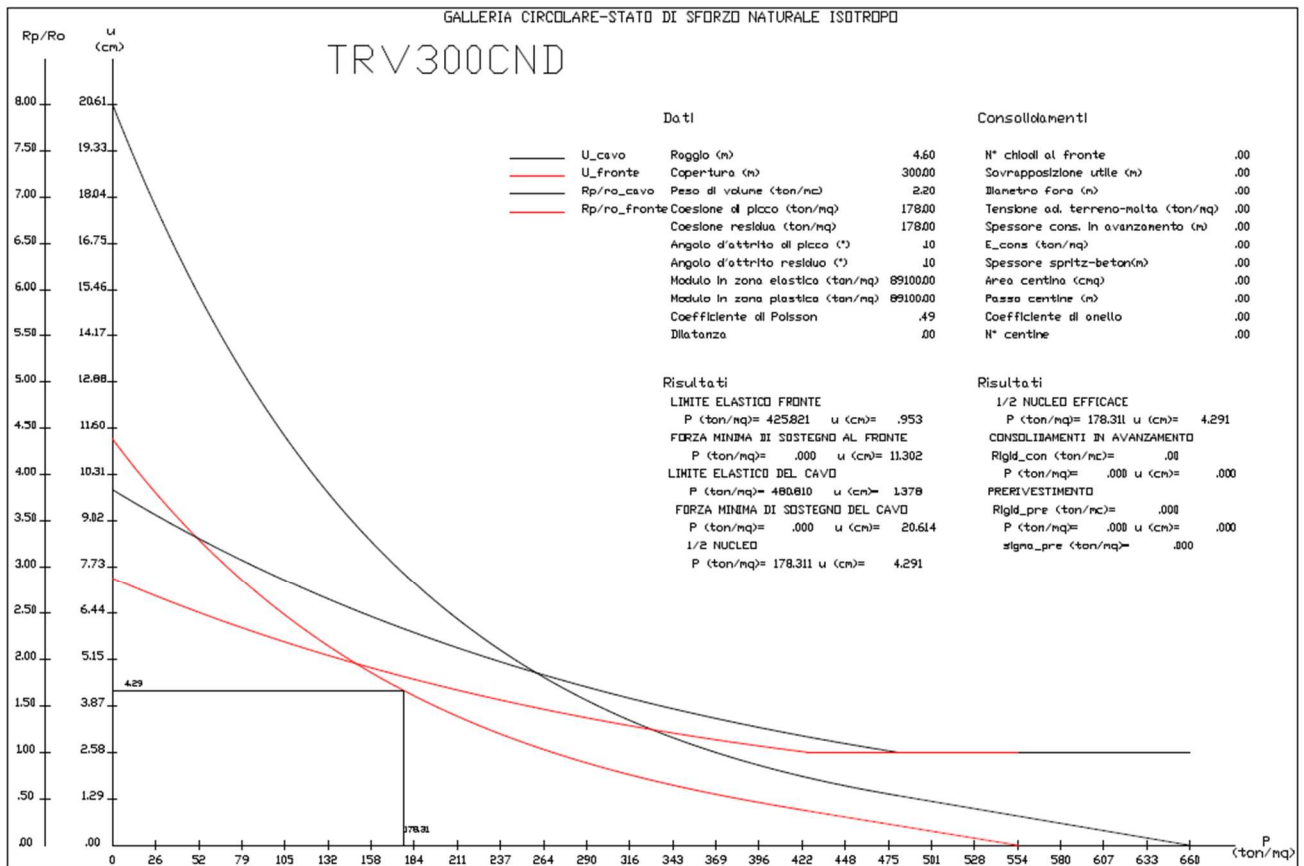


Figura 7: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 300 metri

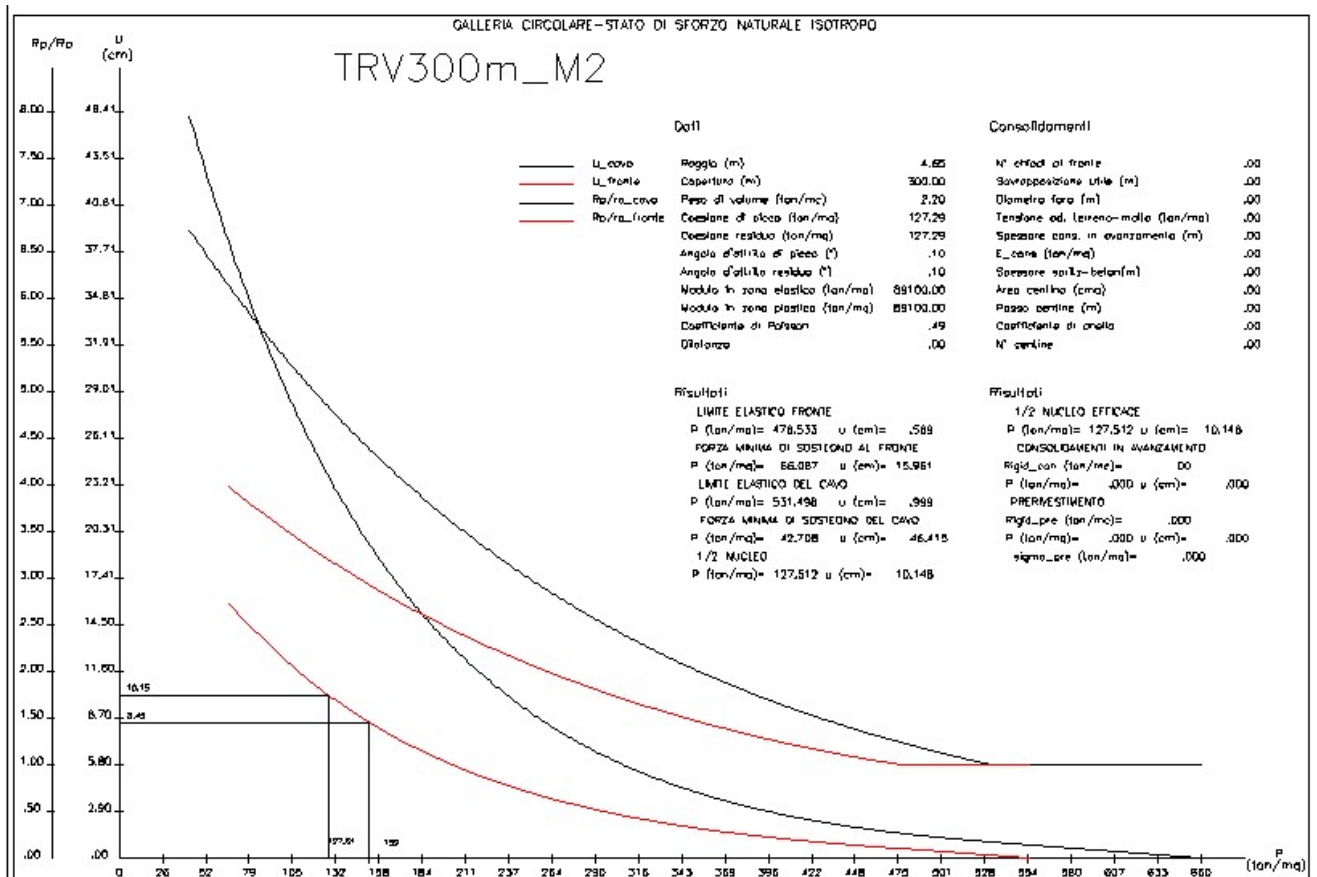


Figura 8: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 300 metri

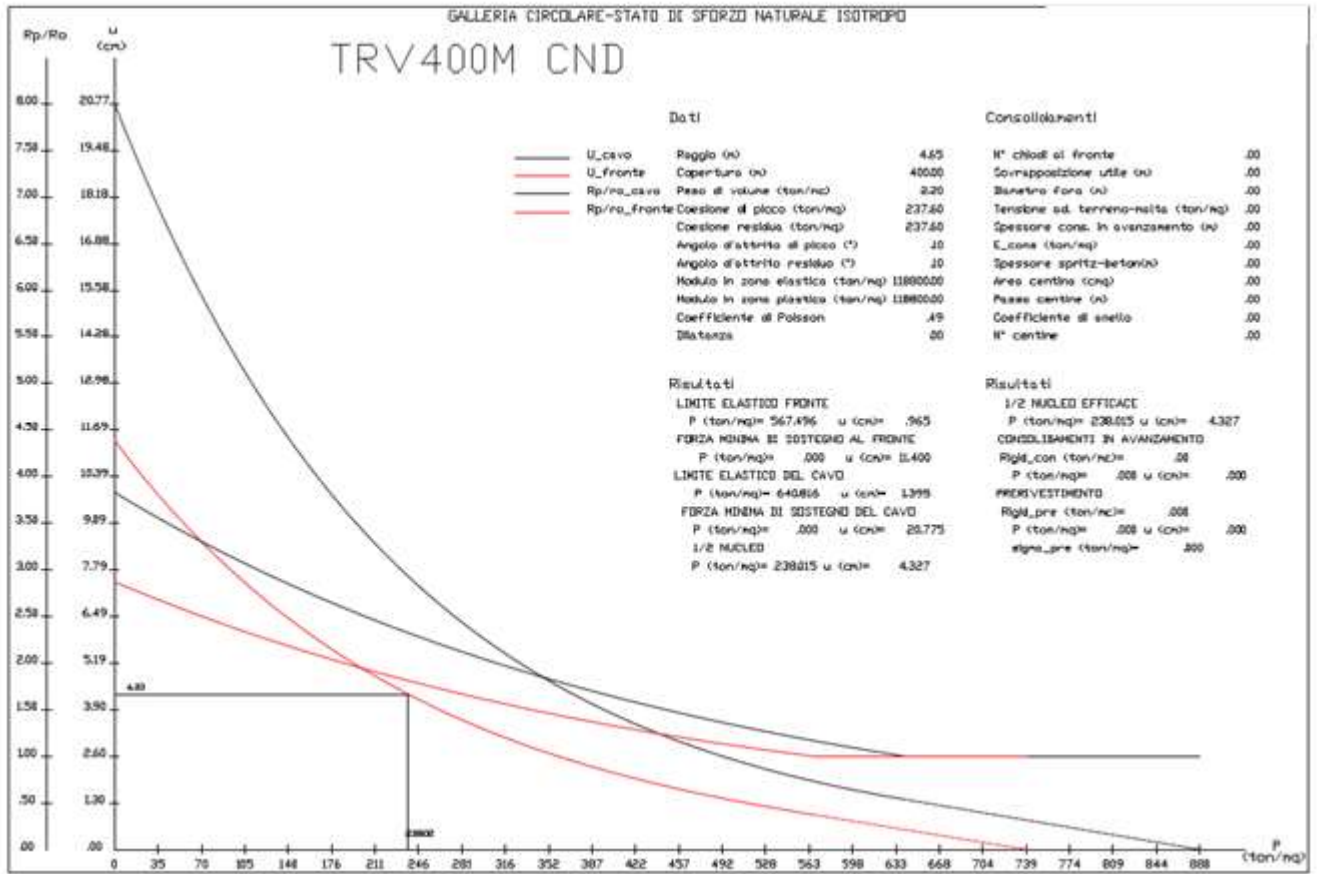


Figura 9: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 400 metri

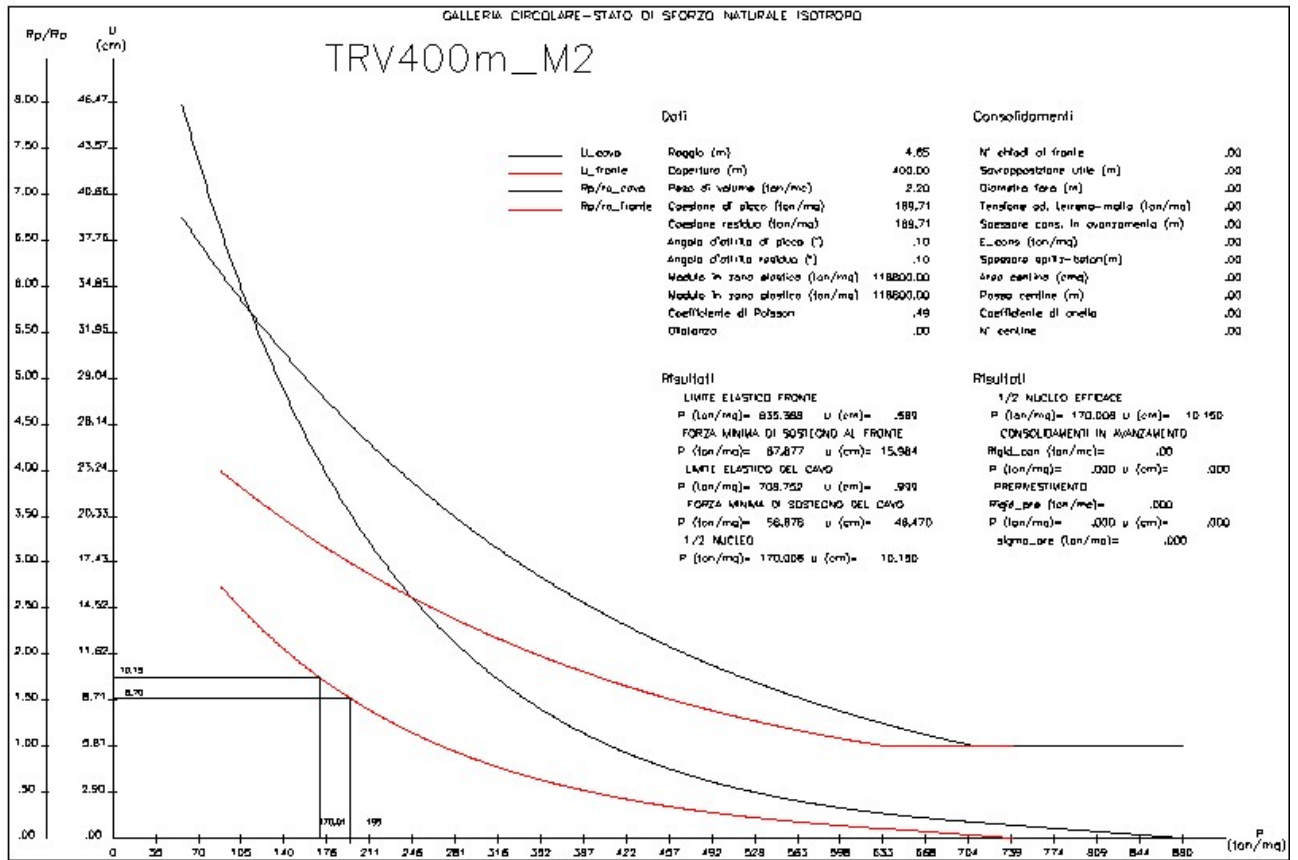


Figura 10: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 400 metri

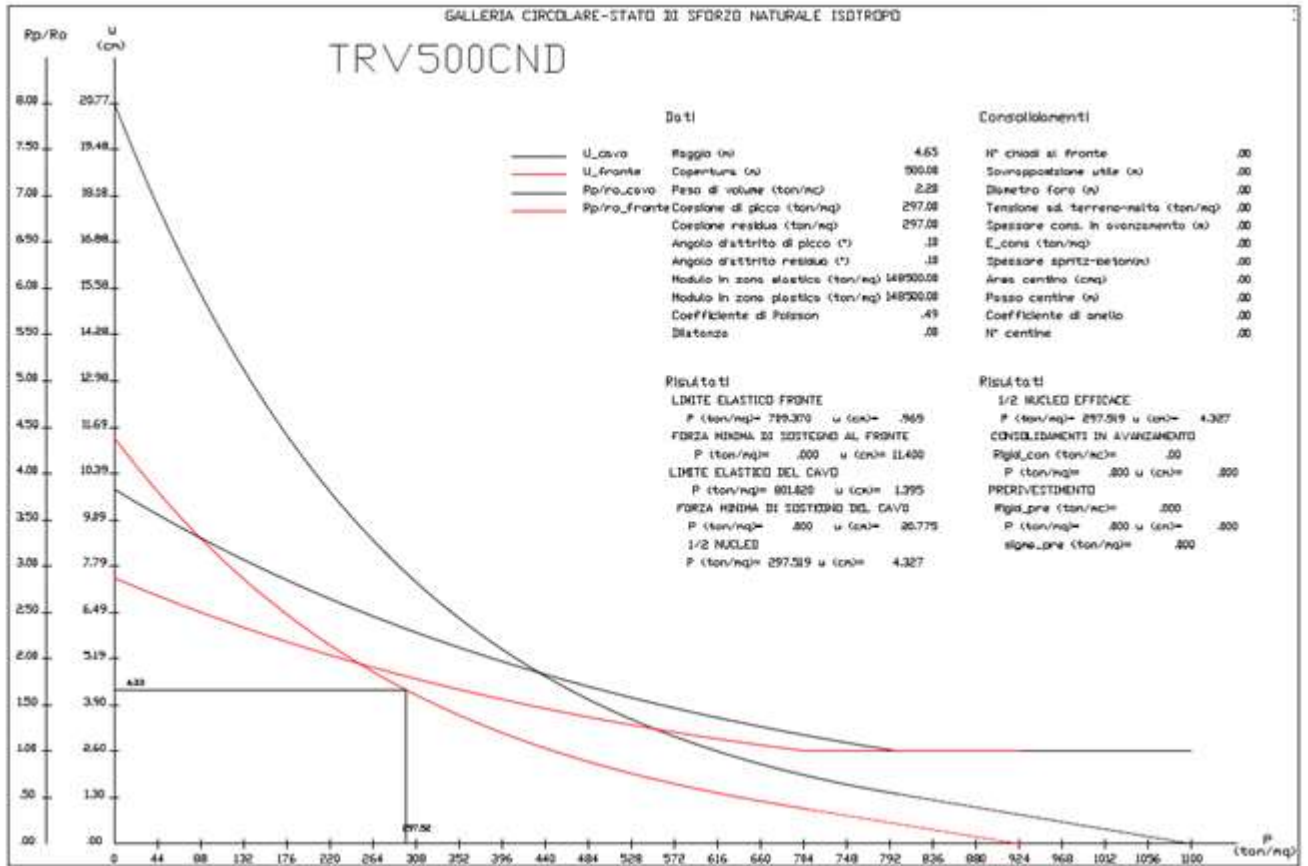


Figura 11: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 500 metri

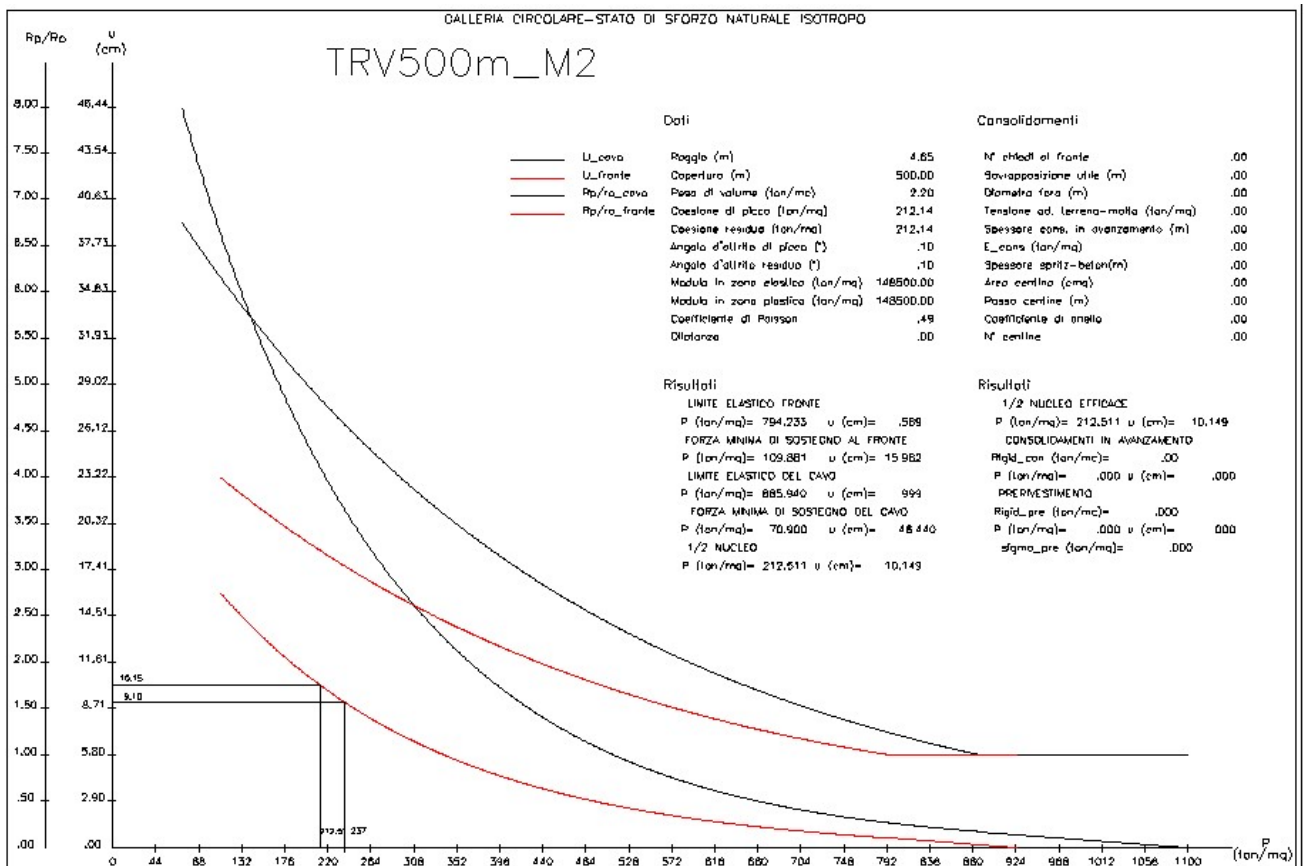


Figura 12: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 500 metri

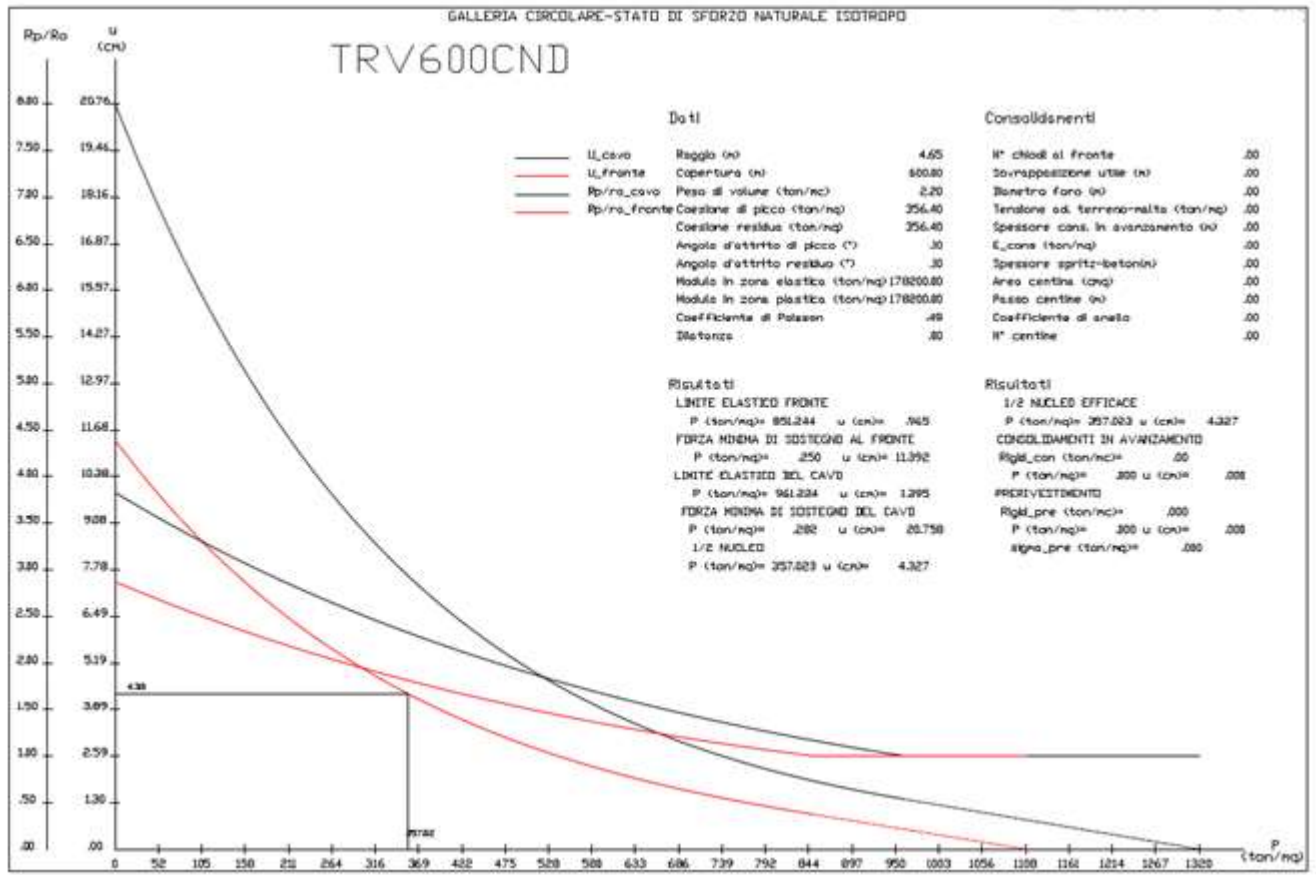


Figura 13: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 600 metri

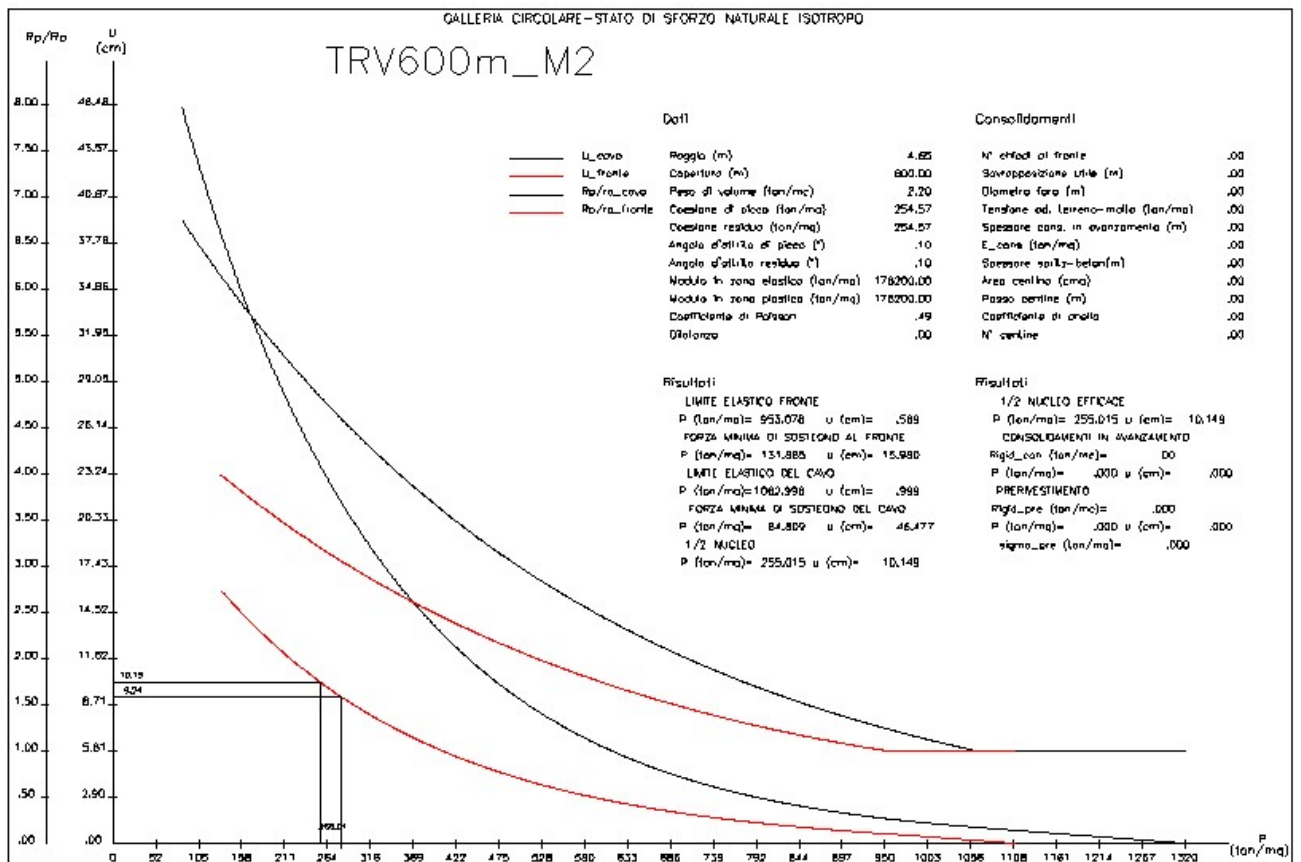


Figura 14: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 600 metri

Analisi con il metodo di stabilità al fronte



FACE STABILITY ANALYSIS

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

| Overburden layers | ΔH [m] | γ_n [kNm ⁻³] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] | Tunnel Face layers | ΔH [m] | γ_n [kNm ⁻³] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] |
|--|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| layers ordering: from tunnel crown to ground surface | | | | | layers ordering: invert-crown | | | | |
| 1 | 15.0 | 21.0 | 225 | 0.0 | 2 | 9.3 | 21.0 | 225 | 0.0 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

| | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------|-----------------------------------|---------------------|-------|
| Total Overburden | H [m] | 15.0 | Equivalent tunnel diameter | D _{eq} [m] | 9.30 |
| Surface load | q _s [kPa] | 0.0 | Free span length | a [m] | 0.0 |
| water table level above tunnel invert | H _w [m] | 0.00 | <i>Failure Mechanism geometry</i> | | |
| Tunnel full face area | A _{EXCAV} [m ²] | 67.9 | Discharge zone height | Z _d [m] | 14.01 |
| Tunnel face height | A [m] | 9.30 | Length of prisms in advance | L _p [m] | 9.30 |
| Tunnel face width | D [m] | 8.24 | | | |

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

| Prisms 1 | | | Prisms 2-3 | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------|--|---------------------------------|-------|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm ⁻³] | 21.0 | Average buoyant unit weight | γ_b [kNm ⁻³] | 21.0 |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm ⁻³] | 21.0 | Average saturated unit weight | γ_n [kNm ⁻³] | 21.0 |
| Average cohesion | cu [kPa] | 225.0 | Average cohesion within Discharge Zone | cu [kPa] | 225.0 |
| Average friction angle | ϕ'_e [°] | 0.0 | Average friction angle within Discharge Zone | ϕ'_p [°] | 0.0 |
| Coefficient of passive earth pressure | Kp [-] | 1.00 | Friction Coefficient within Discharge Zone | Kf [-] | 1.00 |

Therapy phase

Conventional Excavation

| Injection grout properties | | | Face VTR Bars/Bolts properties | | |
|---------------------------------|-----------------------|--|---|-----------------------------------|---|
| Cubic compression resistance | R _{ck} [MPa] | | Unit Tensile strength | α_b [MPa] | |
| Injection influence ratio | i _i [-] | | Unit Tensile strength at joint | α_j [MPa] | |
| Curing factor | γ_c [-] | | Unit Shear strength | α_s [MPa] | |
| Material partial safety factor | γ_f [-] | | Drilling diameter | ϕ_{dril} [mm] | |
| Poisson ratio | ν_c [-] | | External diameter | ϕ_{ext} [mm] | |
| Elastic module | E _c [GPa] | | Thickness | th _b [mm] | |
| Grout-soil bond | τ_a [kPa] | | Single bar Cross sectional area | A _b [mm ²] | |
| Injection penetrability coeff. | α_i [-] | | Overlapping length | L _{LAP} [m] | |
| Design strenght (ULS) | α_r [-] | | Joint step | i _{joint} [m] | |
| Single bar Shear strenght | T _t [kN] | | Number of bars installed at tunnel face | N _b [-] | |
| Single bar Tensile strenght | T _t [kN] | | N° of bars for unit of area | n _b [m ⁻²] | |
| Single bar Pull-out strenght | T _f [kN] | | Applied pressure at tunnel boundary | pa [kPa] | 0 |
| Max. resistance offered by bars | T _{max} [kN] | | Equivalent pressure acting at face | pf [kPa] | 0 |

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

| Failure Mechanism wedges - Effective stresses | | | Pore Pressure distribution | | |
|--|----------------------|-----|-------------------------------------|-------------------------|---|
| Eff. vert. stress at discharge-zone top | σ'_{vd} [kPa] | 21 | pore pressure at discharge-zone top | u _d [kPa] | 0 |
| Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 14 | pore pressure at 1/3 discharge-zone | u _{d1/3} [kPa] | 0 |
| Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 7 | pore pressure at 2/3 discharge-zone | u _{d2/3} [kPa] | 0 |
| Undist. eff. vertical stress at crown | σ'_{v} [kPa] | 315 | pore pressure at tunnel springline | u _o [kPa] | 0 |
| Undist. eff. vert. stress at tunnel springline | σ'_{vo} [kPa] | 413 | pore pressure at tunnel invert | u _r [kPa] | 0 |

| Failure Mechanism wedges - Unit strenghts | | | Tunnel-face global stability | |
|---|---------------------|-------|--|-----------------|
| Face wedge unit strength (prism 1) | q [kPa] | 315 | Tunnel-face global stability (M _{S28} /M _{S_v}) | FS _g |
| Unit shear strength (prisms 2) | γ_{m2} [kPa] | 225.0 | | 5.39 |
| Unit shear strength (prism 3) | γ_{m3} [kPa] | 225.0 | | |

| Crown prism stress-field check (lateral boundaries) | | Crown-wedge stability (vertical sliding) | |
|---|------|---|-----------------|
| $k_r c / 0.3(\gamma H - p_a) =$ | 2.4 | (Shear at release elastic limit) | FS _c |
| Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) σ_{vp} [kPa] | | Crown wedge local stability (against plasticization): | - |
| z ₁ : Vertical dist. from tunnel boundary [m] = | 0.01 | | |

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

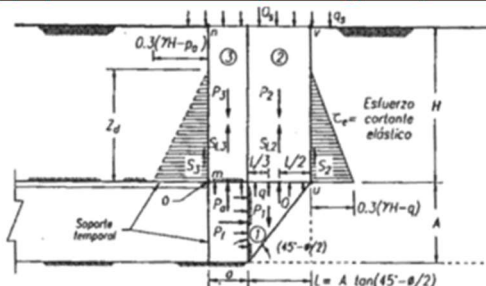


Figura 15: Fase di diagnosi – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

| Overburden layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] |
|--|----------------|----------------------------------|---------------|-------------|
| layers ordering: from tunnel crown to ground surface | | | | |
| 1 | 25.0 | 21.0 | 225 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

| Tunnel Face layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] |
|-------------------------------|----------------|----------------------------------|---------------|-------------|
| layers ordering: invert-crown | | | | |
| 2 | 9.3 | 21.0 | 225 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------|
| Total Overburden | H [m] | 25.0 |
| Surface load | qs [kPa] | 0.0 |
| water table level above tunnel invert | H _w [m] | 0.00 |
| Tunnel full face area | A _{excav} [m ²] | 67.9 |
| Tunnel face height | A [m] | 9.30 |
| Tunnel face width | D [m] | 8.24 |

| | | |
|----------------------------|---------------------|------|
| Equivalent tunnel diameter | D _{eq} [m] | 9.30 |
| Free span length | a [m] | 0.0 |

| | | |
|-----------------------------|--------------------|-------|
| Failure Mechanism geometry | | |
| Discharge zone height | Z _d [m] | 14.01 |
| Length of prisms in advance | L _p [m] | 9.30 |

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

| Prisms 1 | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average cohesion | cu [kPa] | 225.0 |
| Average friction angle | ϕ'_E [°] | 0.0 |
| Coefficient of passive earth pressure | Kp [-] | 1.00 |

| Prisms 2-3 | | |
|--|----------------------------------|-------|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average cohesion within Discharge Zone | cu [kPa] | 225.0 |
| Average friction angle within Discharge Zone | ϕ'_E [°] | 0.0 |
| Friction Coefficient within Discharge Zone | Kf [-] | 1.00 |

Therapy phase
Conventional Excavation

| Injection grout properties | | |
|---------------------------------|-----------------------|--|
| Cubic compression resistance | R _{ck} [MPa] | |
| Injection influence ratio | i _i [-] | |
| Curing factor | γ_c [-] | |
| Material partial safety factor | γ_f [-] | |
| Possion ratio | ν_c [-] | |
| Elastic module | E _c [GPa] | |
| Grout-soil bond | τ_a [kPa] | |
| Injection penetrability coeff. | α_i [-] | |
| Design strenght (ULS) | α_c [-] | |
| Single bar Shear strenght | T _s [kN] | |
| Single bar Tensile strenght | T _t [kN] | |
| Single bar Pull-out strenght | T _f [kN] | |
| Max. resistance offered by bars | T _{max} [kN] | |

| Face VTR Bars/Bolts properties | | |
|---|-----------------------------------|---|
| Unit Tensile strength | σ_b [MPa] | |
| Unit Tensile strength at joint | σ_j [MPa] | |
| Unit Shear strength | σ_s [MPa] | |
| Drilling diameter | ϕ_{dril} [mm] | |
| External diameter | ϕ_{ext} [mm] | |
| Thickness | th _b [mm] | |
| Single bar Cross sectional area | A _b [mm ²] | |
| Overlapping length | L _{LAP} [m] | |
| Joint step | i _{joint} [m] | |
| Number of bars installed at tunnel face | N _b [-] | |
| N° of bars for unit of area | n _b [m ⁻²] | |
| Applied pressure at tunnel boundary | pa [kPa] | 0 |
| Equivalent pressure acting at face | pf [kPa] | 0 |

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

| Failure Mechanism wedges - Effective stresses | | |
|--|----------------------|-----|
| Eff. vert. stress at discharge-zone top | σ'_{vd} [kPa] | 231 |
| Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 154 |
| Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 77 |
| Undist. eff. vertical stress at crown | σ'_v [kPa] | 525 |
| Undist. eff. vert. stress at tunnel springline | σ'_{v0} [kPa] | 623 |

| Pore Pressure distribution | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---|
| pore pressure at discharge-zone top | u _d [kPa] | 0 |
| pore pressure at 1/3 discharge-zone | u _{d1/3} [kPa] | 0 |
| pore pressure at 2/3 discharge-zone | u _{d2/3} [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel springline | u _o [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel invert | u _f [kPa] | 0 |

| Failure Mechanism wedges - Unit strenghts | | |
|---|-------------------|-------|
| Face wedge unit strength (prism 1) | q [kPa] | 510 |
| Unit shear strength (prisms 2) | τ_{m2} [kPa] | 225.0 |
| Unit shear strength (prism 3) | τ_{m3} [kPa] | 225.0 |

| | | |
|---|-----------------|------|
| Tunnel-face global stability (M _{SF} /M _{SF,d}) | FS _g | 3.47 |
|---|-----------------|------|

| | | |
|--|------|---|
| Crown prism stress-field check (lateral boundaries) | | |
| $k_1 c / 0.3(\gamma H - p_0) =$ | 1.4 | - |
| Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) $\sigma_{v,d}$ [kPa] | | |
| z1 Vertical dist. from tunnel boundary [m] = | 0.01 | - |

| | | |
|--|-----------------|---|
| Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses) | FS _c | - |
| Crown wedge local stability (against plasticization): | | |
| | | - |

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

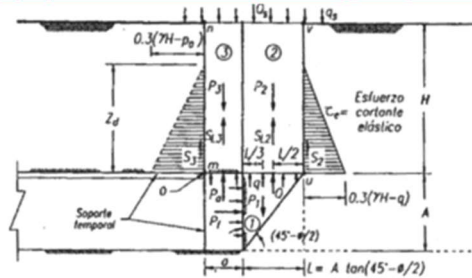


Figura 16: Fase di diagnosi – TRV - analisi di stabilità al fronte di Tamez a 25 metri di copertura

FACE STABILITY ANALYSIS

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

| Overburden layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] |
|---|----------------|----------------------------------|---------------|-------------|
| <i>layers ordering: from tunnel crown to ground surface</i> | | | | |
| 1 | 15.0 | 21.0 | 161 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

| Tunnel Face layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/Cu [kPa] | ϕ' [°] |
|--------------------------------------|----------------|----------------------------------|---------------|-------------|
| <i>layers ordering: invert-crown</i> | | | | |
| 2 | 9.3 | 21.0 | 161 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------|
| Total Overburden | H [m] | 15.0 |
| Surface load | qs [kPa] | 0.0 |
| water table level above tunnel invert | H _w [m] | 0.00 |
| Tunnel full face area | A _{EXCAV} [m ²] | 67.9 |
| Tunnel face height | A [m] | 9.30 |
| Tunnel face width | D [m] | 8.24 |

| | | |
|----------------------------|---------------------|------|
| Equivalent tunnel diameter | D _{eq} [m] | 9.30 |
| Free span length | a [m] | 0.0 |

Failure Mechanism geometry

| | | |
|-----------------------------|--------------------|-------|
| Discharge zone height | Z _d [m] | 14.01 |
| Length of prisms in advance | L _p [m] | 9.30 |

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

| <i>Prisms 1</i> | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average cohesion | cu [kPa] | 161.0 |
| Average friction angle | ϕ'_e [°] | 0.0 |
| Coefficient of passive earth pressure | Kp [-] | 1.00 |

| <i>Prisms 2-3</i> | | |
|--|----------------------------------|-------|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 |
| Average cohesion within Discharge Zone | cu [kPa] | 161.0 |
| Average friction angle within Discharge Zone | ϕ'_e [°] | 0.0 |
| Friction Coefficient within Discharge Zone | Kf [-] | 1.00 |

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

| | | |
|--------------------------------|-----------------------|--|
| Cubic compression resistance | R _{ck} [MPa] | |
| Injection influence ratio | i _i [-] | |
| Curing factor | γ_c [-] | |
| Material partial safety factor | γ_F [-] | |
| Possion ratio | v _c [-] | |
| Elastic module | E _c [GPa] | |
| Grout-soil bond | τ_a [kPa] | |
| Injection penetrability coeff. | α_i [-] | |
| Design strenght (ULS) | α [-] | |

| | | |
|---------------------------------|-----------------------|--|
| Single bar Shear strenght | T _i [kN] | |
| Single bar Tensile strenght | T _T [kN] | |
| Single bar Pull-out strenght | T _P [kN] | |
| Max. resistance offered by bars | T _{max} [kN] | |

Face VTR Bars/Bolts properties

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Unit Tensile strength | α [MPa] | |
| Unit Tensile strength at joint | α_j [MPa] | |
| Unit Shear strength | α_s [MPa] | |
| Drilling diameter | ϕ_{dril} [mm] | |
| External diameter | ϕ_{ext} [mm] | |
| Thickness | th _b [mm] | |
| Single bar Cross sectional area | A _b [mm ²] | |
| Overlapping length | L _{LAP} [m] | |
| Joint step | i _{joint} [m] | |

| | | |
|---|-----------------------------------|---|
| Number of bars installed at tunnel face | N _b [-] | |
| N° of bars for unit of area | n _b [m ⁻²] | |
| Applied pressure at tunnel boundary | pa [kPa] | 0 |
| Equivalent pressure acting at face | pf [kPa] | 0 |

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

| | | |
|--|----------------------|-----|
| Eff. vert. stress at discharge-zone top | σ'_{vd} [kPa] | 21 |
| Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 14 |
| Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 7 |
| Undist. eff. vertical stress at crown | σ'_{v0} [kPa] | 315 |
| Undist. eff. vert. stress at tunnel springline | σ'_{v0} [kPa] | 413 |

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

| | | |
|------------------------------------|-----------------------|-------|
| Face wedge unit strength (prism 1) | q [kPa] | 315 |
| Unit shear strength (prisms 2) | s _{m2} [kPa] | 161.0 |
| Unit shear strength (prism 3) | s _{m3} [kPa] | 161.0 |

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

| | | |
|---------------------------------|-----|---|
| $k_1 c / 0.3(\gamma H - p_0) =$ | 1.7 | - |
|---------------------------------|-----|---|

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) σ_{v0} [kPa]

| | |
|---|---|
| z ¹ Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01 | - |
|---|---|

Pore Pressure distribution

| | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---|
| pore pressure at discharge-zone top | u _d [kPa] | 0 |
| pore pressure at 1/3 discharge-zone | u _{d1/3} [kPa] | 0 |
| pore pressure at 2/3 discharge-zone | u _{d2/3} [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel springline | u _o [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel invert | u _f [kPa] | 0 |

| | | |
|--|-----------------|------|
| Tunnel-face global stability (MΣFF / MΣFA) | FS _g | 3.86 |
|--|-----------------|------|

| | | |
|---|-----------------|---|
| Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses) | FS _c | - |
|---|-----------------|---|

| | |
|---|---|
| Crown wedge local stability (against plasticization): | - |
|---|---|

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

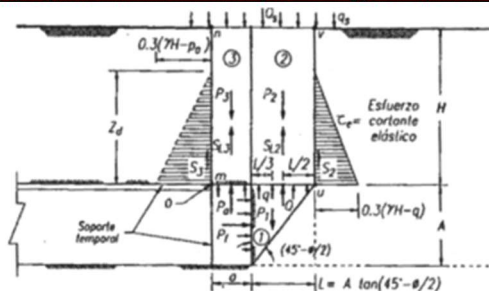


Figura 17: Fase di terapia – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

FACE STABILITY ANALYSIS

Enrique Tamez Gonzáles - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

| Overburden layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/c_u [kPa] | ϕ' [°] |
|---|----------------|----------------------------------|----------------|-------------|
| <i>layers ordering: from tunnel crown to ground surface</i> | | | | |
| 1 | 25.0 | 21.0 | 161 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

| Tunnel Face layers | ΔH [m] | γ_n [kNm^{-3}] | c'/c_u [kPa] | ϕ' [°] |
|--------------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|-------------|
| <i>layers ordering: invert-crown</i> | | | | |
| 2 | 9.3 | 21.0 | 161 | 0.0 |
| | | | | |
| | | | | |

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

| | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|------|
| Total Overburden | H [m] | 25.0 |
| Surface load | q_s [kPa] | 0.0 |
| water table level above tunnel invert | H_w [m] | 0.00 |
| Tunnel full face area | A_{EXCAV} [m ²] | 67.9 |
| Tunnel face height | A [m] | 9.30 |
| Tunnel face width | D [m] | 8.24 |

| | | |
|----------------------------|--------------|------|
| Equivalent tunnel diameter | D_{eq} [m] | 9.30 |
| Free span length | a [m] | 0.0 |

Failure Mechanism geometry

| | | |
|-----------------------------|-----------|-------|
| Discharge zone height | Z_d [m] | 14.01 |
| Length of prisms in advance | L_p [m] | 9.30 |

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

| <i>Prisms 1</i> | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------|--|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 | |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 | |
| Average cohesion | c_u [kPa] | 161.0 | |
| Average friction angle | ϕ'_c [°] | 0.0 | |
| Coefficient of passive earth pressure | K_p [-] | 1.00 | |

| <i>Prisms 2-3</i> | | | |
|--|----------------------------------|-------|--|
| Average buoyant unit weight | γ_b [kNm^{-3}] | 21.0 | |
| Average saturated unit weight | γ_n [kNm^{-3}] | 21.0 | |
| Average cohesion within Discharge Zone | c_u [kPa] | 161.0 | |
| Average friction angle within Discharge Zone | ϕ'_p [°] | 0.0 | |
| Friction Coefficient within Discharge Zone | K_f [-] | 1.00 | |

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

| | | |
|--------------------------------|----------------|--|
| Cubic compression resistance | R_{ck} [MPa] | |
| Injection influence ratio | i_i [-] | |
| Curing factor | γ_c [-] | |
| Material partial safety factor | γ_f [-] | |
| Possion ratio | v_c [-] | |
| Elastic module | E_c [GPa] | |
| Grout-soil bond | τ_a [kPa] | |
| Injection penetrability coeff. | α_i [-] | |
| Design strenght (ULS) | α_c [-] | |

Face VTR Bars/Bolts properties

| | | |
|---------------------------------|--------------------------|--|
| Unit Tensile strength | σ_b [MPa] | |
| Unit Tensile strength at joint | σ_j [MPa] | |
| Unit Shear strength | α_r [MPa] | |
| Drilling diameter | ϕ_{dril} [mm] | |
| External diameter | ϕ_{ext} [mm] | |
| Thickness | th_b [mm] | |
| Single bar Cross sectional area | A_b [mm ²] | |
| Overlapping length | L_{LAP} [m] | |
| Joint step | i_{joint} [m] | |

| | | |
|---------------------------------|----------------|--|
| Single bar Shear strenght | T_t [kN] | |
| Single bar Tensile strenght | T_T [kN] | |
| Single bar Pull-out strenght | T_F [kN] | |
| Max. resistance offered by bars | T_{max} [kN] | |

| | | |
|---|--------------------------|---|
| Number of bars installed at tunnel face | N_b [-] | |
| N° of bars for unit of area | n_b [m ⁻²] | |
| Applied pressure at tunnel boundary | pa [kPa] | 0 |
| Equivalent pressure acting at face | pf [kPa] | 0 |

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

| | | |
|--|----------------------|-----|
| Eff. vert. stress at discharge-zone top | σ'_{vd} [kPa] | 231 |
| Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 154 |
| Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone | σ'_{vd} [kPa] | 77 |
| Undist. eff. vertical stress at crown | σ'_v [kPa] | 525 |
| Undist. eff. vert. stress at tunnel springline | σ'_{v0} [kPa] | 623 |

Pore Pressure distribution

| | | |
|-------------------------------------|------------------|---|
| pore pressure at discharge-zone top | u_d [kPa] | 0 |
| pore pressure at 1/3 discharge-zone | $u_{d1/3}$ [kPa] | 0 |
| pore pressure at 2/3 discharge-zone | $u_{d2/3}$ [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel springline | u_o [kPa] | 0 |
| pore pressure at tunnel invert | u_r [kPa] | 0 |

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

| | | |
|------------------------------------|----------------|-------|
| Face wedge unit strength (prism 1) | q [kPa] | 337 |
| Unit shear strength (prisms 2) | s_{m2} [kPa] | 161.0 |
| Unit shear strength (prism 3) | s_{m3} [kPa] | 161.0 |

Tunnel-face global stability

| | | |
|-------------------------------------|--------|------|
| $(M_{\Sigma F_H} / M_{\Sigma S_A})$ | FS_g | 2.49 |
|-------------------------------------|--------|------|

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

| | |
|---------------------------------|-----|
| $k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$ | 1.0 |
|---------------------------------|-----|

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) $\sigma_{v,d}$ [kPa]

| | |
|--|---|
| z_t Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01 | - |
|--|---|

Crown-wedge stability (vertical sliding)

| | | |
|------------------|--------|---|
| (Shear stresses) | FS_c | - |
|------------------|--------|---|

Crown wedge local stability (against plasticization):

| | | |
|--|--|---|
| | | - |
|--|--|---|

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

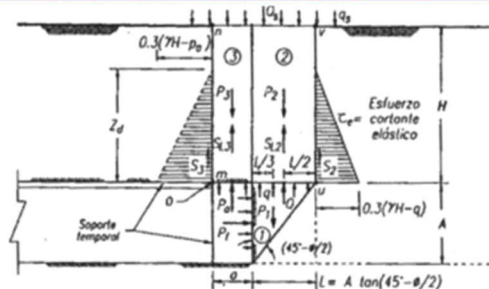


Figura 18: Fase di terapia – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.45 m - Analisi n°15

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|----------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| 2a | Eventuale inizializzazione pressioni interstiziali drenate: abbattimento pressioni al contorno della TBM (TRVa) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (ma in parametri efficaci) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo | 1.0 |

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

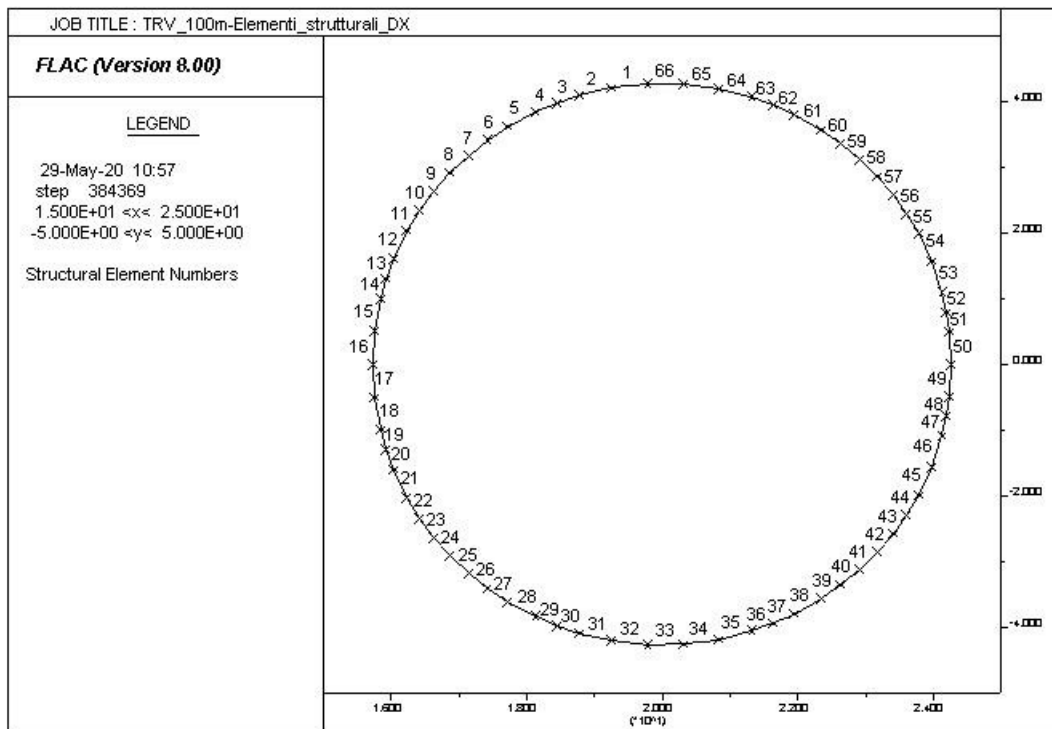


Figura 19 - Numerazione elementi beam canna Destra

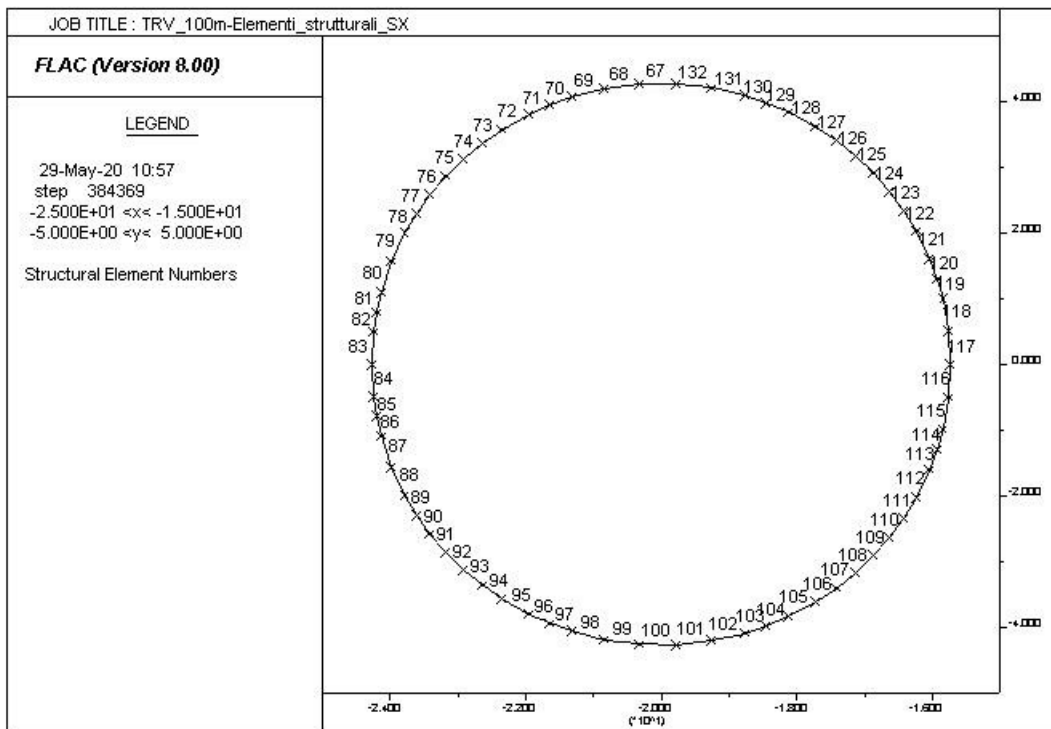


Figura 20 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

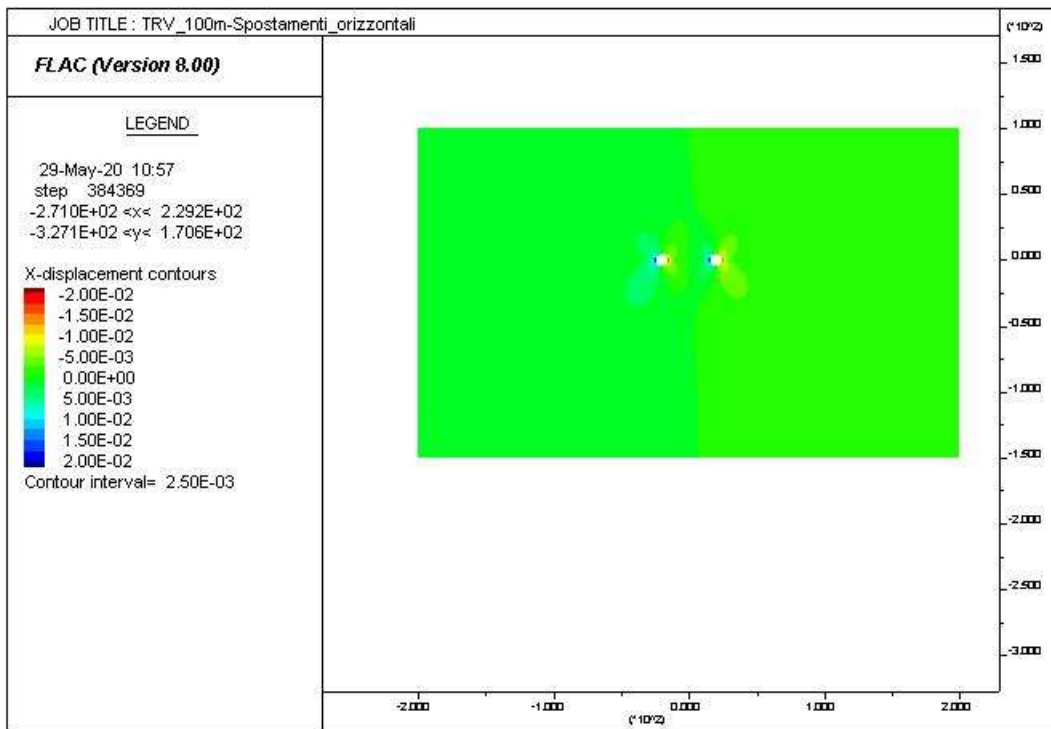


Figura 21 - Spostamenti x

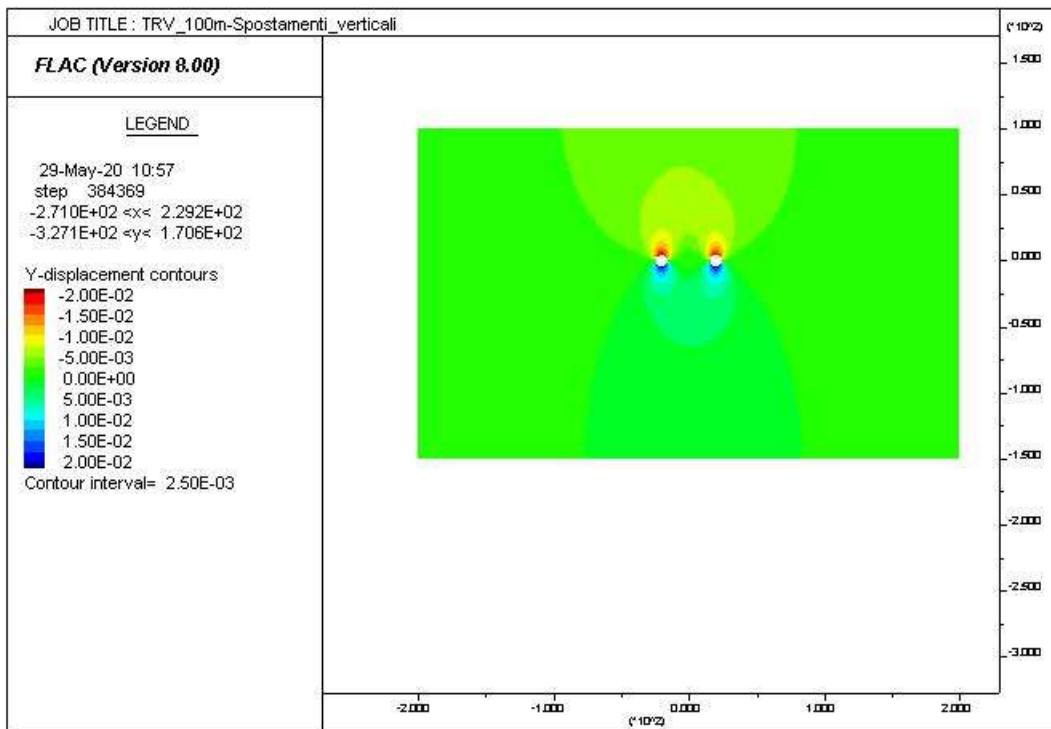


Figura 22 - Spostamenti y

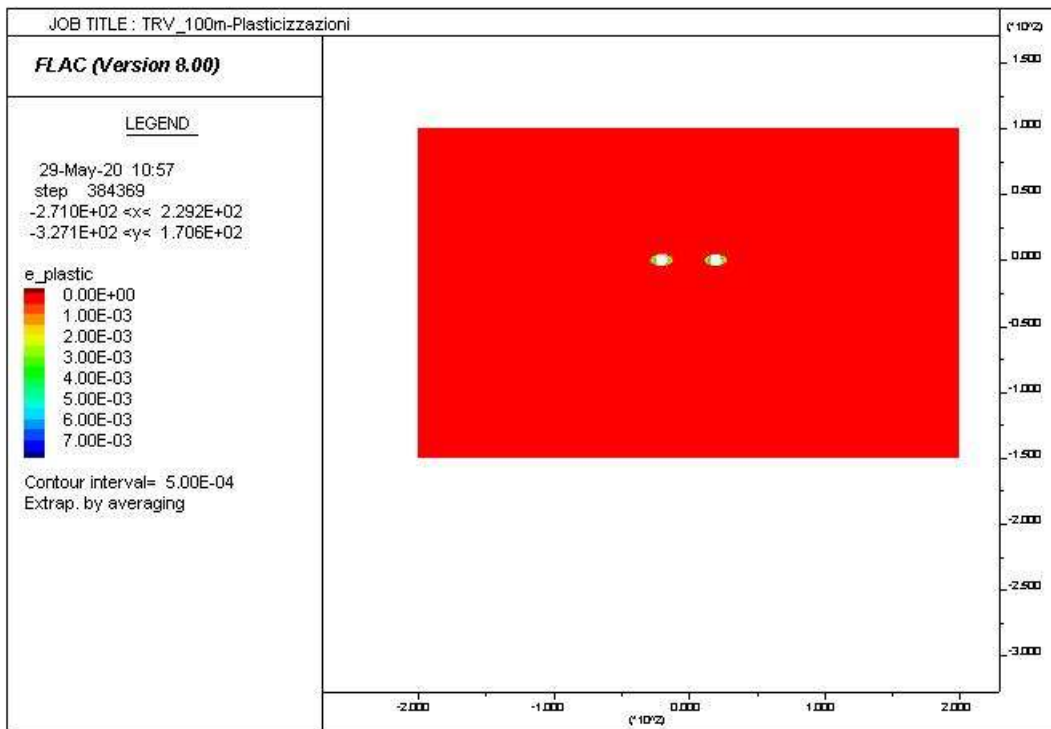


Figura 23 – Plasticizzazioni

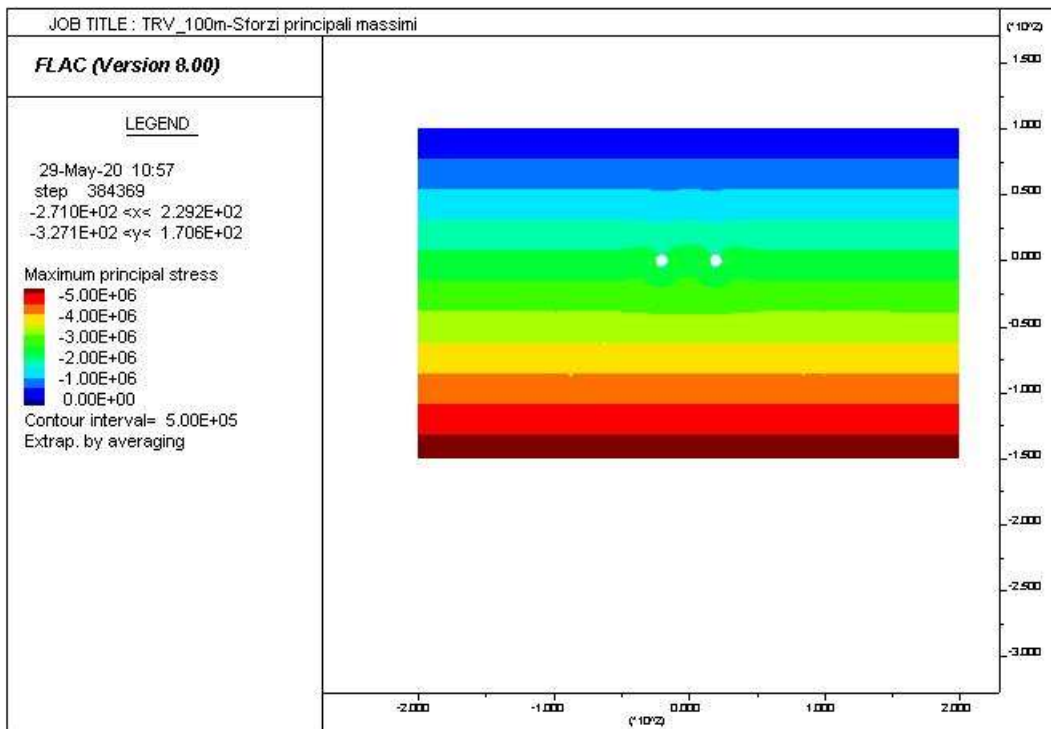


Figura 24 - Tensioni principali totali sigma1

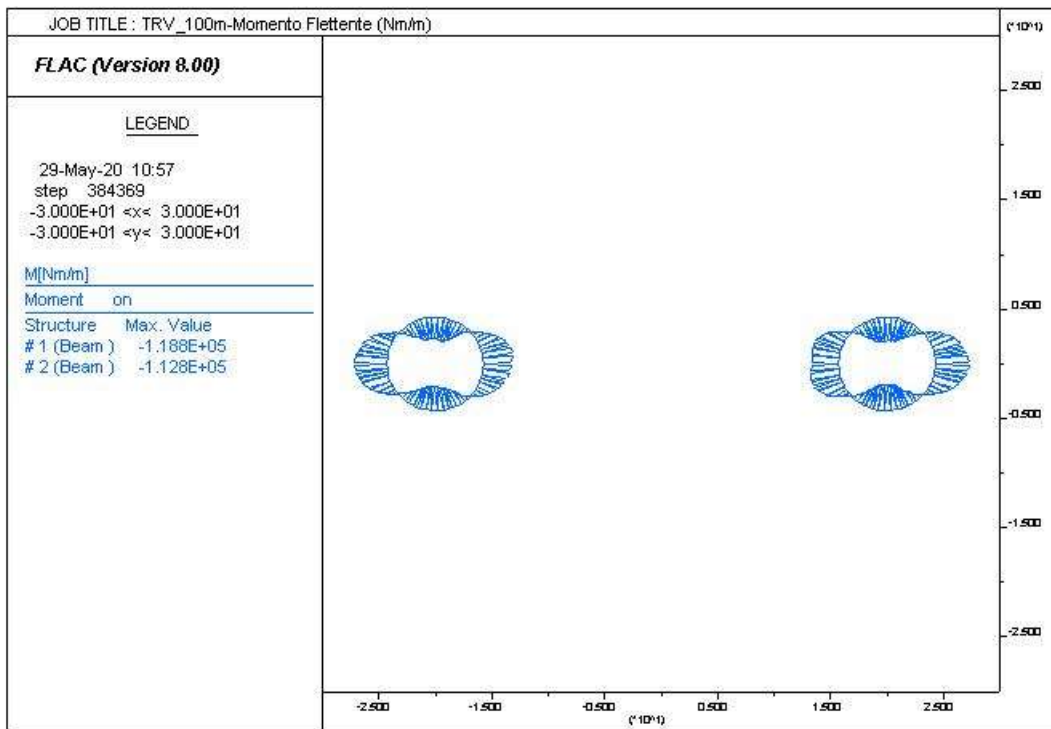


Figura 25 – Sollecitazioni M

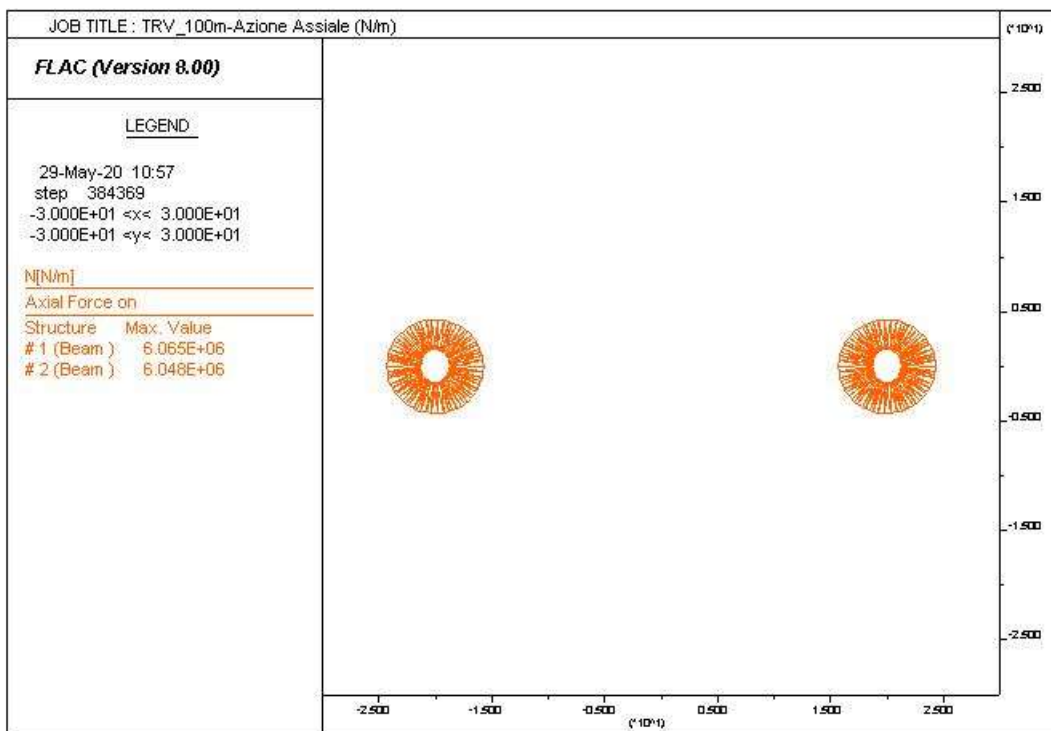


Figura 26 – Sollecitazioni N

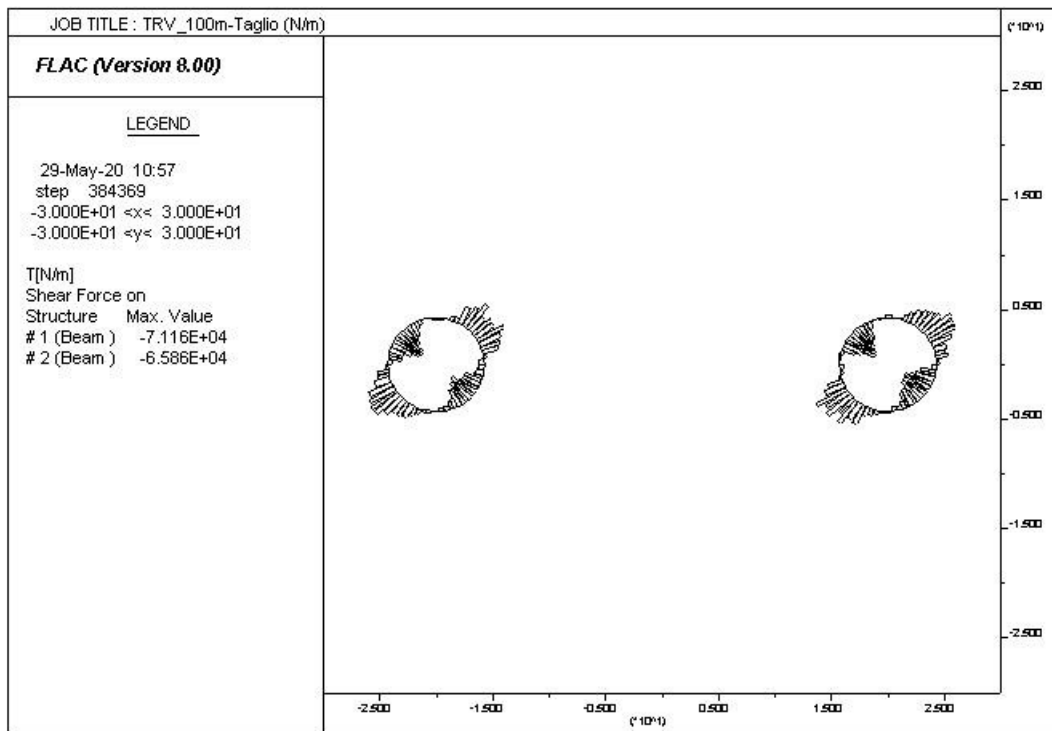


Figura 27 – Sollecitazioni T

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|----------|----------|----------|-------|-----------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 132 | 2 | 132 | 67 | 1001 | beam | 4.42E+03 | 5.32E+06 | 8.16E+04 | - | -3.11E-04 |
| 131 | 2 | 131 | 132 | 1001 | beam | 5.70E+02 | 5.38E+06 | 8.19E+04 | - | -3.14E-04 |
| 130 | 2 | 130 | 131 | 1001 | beam | - | 5.39E+06 | 7.91E+04 | - | -3.15E-04 |
| 129 | 2 | 129 | 130 | 1001 | beam | - | 5.45E+06 | 7.53E+04 | - | -3.19E-04 |
| 128 | 2 | 128 | 129 | 1001 | beam | - | 5.51E+06 | 5.70E+04 | - | -3.23E-04 |
| 127 | 2 | 127 | 128 | 1001 | beam | - | 5.60E+06 | 3.95E+04 | - | -3.28E-04 |
| 126 | 2 | 126 | 127 | 1001 | beam | - | 5.67E+06 | 1.54E+04 | - | -3.32E-04 |
| 125 | 2 | 125 | 126 | 1001 | beam | - | 5.74E+06 | 9.28E+02 | - | -3.35E-04 |
| 124 | 2 | 124 | 125 | 1001 | beam | - | 5.75E+06 | - | - | -3.36E-04 |
| 123 | 2 | 123 | 124 | 1001 | beam | - | 5.78E+06 | - | - | -3.38E-04 |
| 122 | 2 | 122 | 123 | 1001 | beam | - | 5.83E+06 | - | - | -3.41E-04 |
| 121 | 2 | 121 | 122 | 1001 | beam | - | 5.89E+06 | - | - | -3.44E-04 |
| 120 | 2 | 120 | 121 | 1001 | beam | - | 5.95E+06 | - | - | -3.48E-04 |
| 119 | 2 | 119 | 120 | 1001 | beam | - | 5.98E+06 | - | - | -3.50E-04 |
| 118 | 2 | 118 | 119 | 1001 | beam | - | 6.01E+06 | - | - | -3.52E-04 |
| 117 | 2 | 117 | 118 | 1001 | beam | - | 6.02E+06 | - | - | -3.52E-04 |
| 116 | 2 | 116 | 117 | 1001 | beam | - | 6.03E+06 | - | - | -3.52E-04 |
| 115 | 2 | 115 | 116 | 1001 | beam | - | 6.03E+06 | - | - | -3.53E- |

| | | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|------|------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| | | | | | | | | 8.43E+04 | | 04 |
| 114 | 2 | 114 | 115 | 1001 | beam | 1.96E+04 | 6.05E+06 | - 7.79E+04 | 8.42E+04 | -3.54E- 04 |
| 113 | 2 | 113 | 114 | 1001 | beam | 3.58E+04 | 6.04E+06 | - 6.63E+04 | 7.78E+04 | -3.53E- 04 |
| 112 | 2 | 112 | 113 | 1001 | beam | 3.00E+04 | 5.98E+06 | - 5.22E+04 | 6.63E+04 | -3.50E- 04 |
| 111 | 2 | 111 | 112 | 1001 | beam | 4.12E+04 | 5.98E+06 | - 3.77E+04 | 5.24E+04 | -3.50E- 04 |
| 110 | 2 | 110 | 111 | 1001 | beam | 4.26E+04 | 5.94E+06 | - 2.24E+04 | 3.77E+04 | -3.48E- 04 |
| 109 | 2 | 109 | 110 | 1001 | beam | 5.67E+04 | 5.91E+06 | - 1.33E+03 | 2.25E+04 | -3.46E- 04 |
| 108 | 2 | 108 | 109 | 1001 | beam | 4.35E+04 | 5.86E+06 | 1.49E+04 | 1.36E+03 | -3.43E- 04 |
| 107 | 2 | 107 | 108 | 1001 | beam | 4.94E+04 | 5.81E+06 | 3.30E+04 | - 1.49E+04 | -3.40E- 04 |
| 106 | 2 | 106 | 107 | 1001 | beam | 3.81E+04 | 5.78E+06 | 4.70E+04 | - 3.30E+04 | -3.38E- 04 |
| 105 | 2 | 105 | 106 | 1001 | beam | 3.85E+04 | 5.70E+06 | 6.49E+04 | - 4.70E+04 | -3.34E- 04 |
| 104 | 2 | 104 | 105 | 1001 | beam | 2.05E+04 | 5.65E+06 | 7.19E+04 | - 6.49E+04 | -3.30E- 04 |
| 103 | 2 | 103 | 104 | 1001 | beam | 1.61E+04 | 5.56E+06 | 7.75E+04 | - 7.20E+04 | -3.25E- 04 |
| 102 | 2 | 102 | 103 | 1001 | beam | 7.77E+03 | 5.54E+06 | 8.15E+04 | - 7.76E+04 | -3.24E- 04 |
| 101 | 2 | 101 | 102 | 1001 | beam | 6.84E+03 | 5.48E+06 | 8.52E+04 | - 8.16E+04 | -3.20E- 04 |
| 100 | 2 | 100 | 101 | 1001 | beam | - 6.28E+02 | 5.49E+06 | 8.50E+04 | - 8.54E+04 | -3.21E- 04 |
| 99 | 2 | 99 | 100 | 1001 | beam | - 5.09E+03 | 5.50E+06 | 8.23E+04 | - 8.49E+04 | -3.22E- 04 |
| 98 | 2 | 98 | 99 | 1001 | beam | - 6.46E+03 | 5.56E+06 | 7.89E+04 | - 8.21E+04 | -3.25E- 04 |
| 97 | 2 | 97 | 98 | 1001 | beam | - 1.15E+04 | 5.58E+06 | 7.48E+04 | - 7.87E+04 | -3.27E- 04 |
| 96 | 2 | 96 | 97 | 1001 | beam | - 2.11E+04 | 5.65E+06 | 6.73E+04 | - 7.45E+04 | -3.30E- 04 |
| 95 | 2 | 95 | 96 | 1001 | beam | - 3.09E+04 | 5.70E+06 | 5.33E+04 | - 6.73E+04 | -3.34E- 04 |
| 94 | 2 | 94 | 95 | 1001 | beam | - 3.34E+04 | 5.78E+06 | 4.11E+04 | - 5.32E+04 | -3.38E- 04 |
| 93 | 2 | 93 | 94 | 1001 | beam | - 3.75E+04 | 5.83E+06 | 2.74E+04 | - 4.09E+04 | -3.41E- 04 |
| 92 | 2 | 92 | 93 | 1001 | beam | - 4.64E+04 | 5.85E+06 | 1.04E+04 | - 2.74E+04 | -3.42E- 04 |
| 91 | 2 | 91 | 92 | 1001 | beam | - 6.28E+04 | 5.89E+06 | - 1.27E+04 | - 1.03E+04 | -3.44E- 04 |
| 90 | 2 | 90 | 91 | 1001 | beam | - 6.20E+04 | 5.92E+06 | - 3.42E+04 | 1.25E+04 | -3.46E- 04 |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1001 | beam | - 5.96E+04 | 5.95E+06 | - 5.49E+04 | 3.40E+04 | -3.48E- 04 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1001 | beam | - 5.26E+04 | 5.98E+06 | - 7.93E+04 | 5.49E+04 | -3.50E- 04 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1001 | beam | - 3.43E+04 | 6.01E+06 | - 9.67E+04 | 7.93E+04 | -3.51E- 04 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1001 | beam | - 2.34E+04 | 6.02E+06 | - 1.04E+05 | 9.67E+04 | -3.52E- 04 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1001 | beam | - 2.36E+04 | 6.02E+06 | - 1.11E+05 | 1.04E+05 | -3.52E- 04 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1001 | beam | - 3.93E+03 | 6.00E+06 | - 1.13E+05 | 1.11E+05 | -3.51E- 04 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1001 | beam | 8.07E+03 | 5.99E+06 | - 1.09E+05 | 1.13E+05 | -3.50E- 04 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1001 | beam | 2.78E+04 | 5.98E+06 | - 1.00E+05 | 1.09E+05 | -3.50E- 04 |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | 2.06E+04 | 5.96E+06 | - 9.41E+04 | 1.00E+05 | -3.49E- 04 |
| 80 | 2 | 80 | 81 | 1001 | beam | 2.89E+04 | 5.92E+06 | - 7.95E+04 | 9.41E+04 | -3.46E- 04 |
| 79 | 2 | 79 | 80 | 1001 | beam | 4.60E+04 | 5.86E+06 | - 5.82E+04 | 7.95E+04 | -3.43E- 04 |
| 78 | 2 | 78 | 79 | 1001 | beam | 6.07E+04 | 5.82E+06 | - 3.71E+04 | 5.83E+04 | -3.41E- 04 |
| 77 | 2 | 77 | 78 | 1001 | beam | 6.10E+04 | 5.78E+06 | - 1.57E+04 | 3.71E+04 | -3.38E- 04 |
| 76 | 2 | 76 | 77 | 1001 | beam | 6.52E+04 | 5.73E+06 | 8.07E+03 | 1.58E+04 | -3.35E- 04 |
| 75 | 2 | 75 | 76 | 1001 | beam | 4.34E+04 | 5.68E+06 | 2.39E+04 | - 7.96E+03 | -3.32E- 04 |
| 74 | 2 | 74 | 75 | 1001 | beam | 4.47E+04 | 5.64E+06 | 4.00E+04 | - 2.38E+04 | -3.30E- 04 |
| 73 | 2 | 73 | 74 | 1001 | beam | 3.62E+04 | 5.59E+06 | 5.31E+04 | - 4.00E+04 | -3.27E- 04 |
| 72 | 2 | 72 | 73 | 1001 | beam | 3.12E+04 | 5.52E+06 | 6.72E+04 | - 5.31E+04 | -3.23E- 04 |
| 71 | 2 | 71 | 72 | 1001 | beam | 1.63E+04 | 5.46E+06 | 7.29E+04 | - 6.73E+04 | -3.19E- 04 |
| 70 | 2 | 70 | 71 | 1001 | beam | 1.02E+04 | 5.39E+06 | 7.65E+04 | - 7.29E+04 | -3.15E- 04 |
| 69 | 2 | 69 | 70 | 1001 | beam | 9.24E+02 | 5.38E+06 | 7.70E+04 | - 7.65E+04 | -3.14E- 04 |
| 68 | 2 | 68 | 69 | 1001 | beam | 3.48E+01 | 5.31E+06 | 7.70E+04 | - 7.70E+04 | -3.11E- 04 |
| 67 | 2 | 67 | 68 | 1001 | beam | 4.29E+03 | 5.32E+06 | 7.93E+04 | - 7.70E+04 | -3.11E- 04 |
| 66 | 1 | 66 | 1 | 1001 | beam | - 6.06E+03 | 5.32E+06 | 8.45E+04 | - 8.77E+04 | -3.11E- 04 |
| 65 | 1 | 65 | 66 | 1001 | beam | 4.08E+01 | 5.30E+06 | 8.45E+04 | - 8.45E+04 | -3.10E- 04 |
| 64 | 1 | 64 | 65 | 1001 | beam | - 2.63E+03 | 5.37E+06 | 8.31E+04 | - 8.44E+04 | -3.14E- 04 |
| 63 | 1 | 63 | 64 | 1001 | beam | - 1.31E+04 | 5.40E+06 | 7.86E+04 | - 8.31E+04 | -3.16E- 04 |
| 62 | 1 | 62 | 63 | 1001 | beam | - 2.28E+04 | 5.47E+06 | 7.07E+04 | - 7.85E+04 | -3.20E- 04 |
| 61 | 1 | 61 | 62 | 1001 | beam | - 3.24E+04 | 5.53E+06 | 5.58E+04 | - 7.05E+04 | -3.24E- 04 |
| 60 | 1 | 60 | 61 | 1001 | beam | - 4.13E+04 | 5.60E+06 | 4.06E+04 | - 5.55E+04 | -3.28E- 04 |
| 59 | 1 | 59 | 60 | 1001 | beam | - 4.73E+04 | 5.65E+06 | 2.33E+04 | - 4.04E+04 | -3.31E- 04 |
| 58 | 1 | 58 | 59 | 1001 | beam | - 5.19E+04 | 5.69E+06 | 4.30E+03 | - 2.33E+04 | -3.33E- 04 |
| 57 | 1 | 57 | 58 | 1001 | beam | - 6.93E+04 | 5.74E+06 | 2.11E+04 | - 4.34E+03 | -3.36E- 04 |
| 56 | 1 | 56 | 57 | 1001 | beam | - 6.50E+04 | 5.79E+06 | 4.37E+04 | 2.10E+04 | -3.39E- 04 |
| 55 | 1 | 55 | 56 | 1001 | beam | - 6.21E+04 | 5.84E+06 | 6.53E+04 | 4.36E+04 | -3.42E- 04 |
| 54 | 1 | 54 | 55 | 1001 | beam | - 4.72E+04 | 5.88E+06 | 8.71E+04 | 6.52E+04 | -3.44E- 04 |
| 53 | 1 | 53 | 54 | 1001 | beam | - 2.78E+04 | 5.93E+06 | 1.01E+05 | 8.69E+04 | -3.47E- 04 |
| 52 | 1 | 52 | 53 | 1001 | beam | - 2.19E+04 | 5.98E+06 | 1.08E+05 | 1.01E+05 | -3.50E- 04 |
| 51 | 1 | 51 | 52 | 1001 | beam | - 2.59E+04 | 6.00E+06 | 1.16E+05 | 1.08E+05 | -3.51E- 04 |
| 50 | 1 | 50 | 51 | 1001 | beam | - 6.56E+03 | 6.01E+06 | 1.19E+05 | 1.16E+05 | -3.51E- 04 |
| 49 | 1 | 49 | 50 | 1001 | beam | 8.71E+03 | 6.02E+06 | - 1.15E+05 | 1.19E+05 | -3.52E- 04 |
| 48 | 1 | 48 | 49 | 1001 | beam | 3.16E+04 | 6.03E+06 | - | 1.15E+05 | -3.53E- |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| | | | | | | | | 1.05E+05 | | 04 |
| 47 | 1 | 47 | 48 | 1001 | beam | 2.63E+04 | 6.03E+06 | - 9.72E+04 | 1.05E+05 | -3.53E- 04 |
| 46 | 1 | 46 | 47 | 1001 | beam | 4.01E+04 | 6.01E+06 | - 7.69E+04 | 9.72E+04 | -3.52E- 04 |
| 45 | 1 | 45 | 46 | 1001 | beam | 5.04E+04 | 5.97E+06 | - 5.39E+04 | 7.72E+04 | -3.49E- 04 |
| 44 | 1 | 44 | 45 | 1001 | beam | 6.00E+04 | 5.94E+06 | - 3.30E+04 | 5.40E+04 | -3.48E- 04 |
| 43 | 1 | 43 | 44 | 1001 | beam | 4.63E+04 | 5.91E+06 | - 1.74E+04 | 3.36E+04 | -3.46E- 04 |
| 42 | 1 | 42 | 43 | 1001 | beam | 5.63E+04 | 5.89E+06 | 2.97E+03 | 1.77E+04 | -3.44E- 04 |
| 41 | 1 | 41 | 42 | 1001 | beam | 4.56E+04 | 5.85E+06 | 1.97E+04 | - 3.04E+03 | -3.42E- 04 |
| 40 | 1 | 40 | 41 | 1001 | beam | 5.22E+04 | 5.80E+06 | 3.88E+04 | - 1.99E+04 | -3.39E- 04 |
| 39 | 1 | 39 | 40 | 1001 | beam | 3.09E+04 | 5.75E+06 | 4.99E+04 | - 3.88E+04 | -3.37E- 04 |
| 38 | 1 | 38 | 39 | 1001 | beam | 3.80E+04 | 5.70E+06 | 6.72E+04 | - 5.00E+04 | -3.34E- 04 |
| 37 | 1 | 37 | 38 | 1001 | beam | 3.49E+04 | 5.65E+06 | 7.93E+04 | - 6.73E+04 | -3.31E- 04 |
| 36 | 1 | 36 | 37 | 1001 | beam | 1.61E+04 | 5.53E+06 | 8.53E+04 | - 7.98E+04 | -3.24E- 04 |
| 35 | 1 | 35 | 36 | 1001 | beam | 1.03E+04 | 5.53E+06 | 9.04E+04 | - 8.52E+04 | -3.24E- 04 |
| 34 | 1 | 34 | 35 | 1001 | beam | 8.60E+03 | 5.48E+06 | 9.49E+04 | - 9.04E+04 | -3.21E- 04 |
| 33 | 1 | 33 | 34 | 1001 | beam | - 2.78E+03 | 5.50E+06 | 9.36E+04 | - 9.51E+04 | -3.22E- 04 |
| 32 | 1 | 32 | 33 | 1001 | beam | - 5.20E+03 | 5.47E+06 | 9.09E+04 | - 9.36E+04 | -3.20E- 04 |
| 31 | 1 | 31 | 32 | 1001 | beam | - 8.82E+03 | 5.56E+06 | 8.63E+04 | - 9.08E+04 | -3.25E- 04 |
| 30 | 1 | 30 | 31 | 1001 | beam | - 1.43E+04 | 5.56E+06 | 8.11E+04 | - 8.60E+04 | -3.25E- 04 |
| 29 | 1 | 29 | 30 | 1001 | beam | - 1.97E+04 | 5.66E+06 | 7.42E+04 | - 8.09E+04 | -3.31E- 04 |
| 28 | 1 | 28 | 29 | 1001 | beam | - 4.36E+04 | 5.72E+06 | 5.38E+04 | - 7.41E+04 | -3.34E- 04 |
| 27 | 1 | 27 | 28 | 1001 | beam | - 4.14E+04 | 5.81E+06 | 3.86E+04 | - 5.37E+04 | -3.40E- 04 |
| 26 | 1 | 26 | 27 | 1001 | beam | - 6.05E+04 | 5.83E+06 | 1.63E+04 | - 3.85E+04 | -3.41E- 04 |
| 25 | 1 | 25 | 26 | 1001 | beam | - 4.30E+04 | 5.88E+06 | 2.79E+02 | - 1.63E+04 | -3.44E- 04 |
| 24 | 1 | 24 | 25 | 1001 | beam | - 6.48E+04 | 5.92E+06 | 2.39E+04 | - 2.75E+02 | -3.46E- 04 |
| 23 | 1 | 23 | 24 | 1001 | beam | - 5.55E+04 | 5.94E+06 | 4.38E+04 | 2.39E+04 | -3.47E- 04 |
| 22 | 1 | 22 | 23 | 1001 | beam | - 7.12E+04 | 5.97E+06 | 6.92E+04 | 4.37E+04 | -3.49E- 04 |
| 21 | 1 | 21 | 22 | 1001 | beam | - 4.46E+04 | 6.00E+06 | 9.00E+04 | 6.90E+04 | -3.51E- 04 |
| 20 | 1 | 20 | 21 | 1001 | beam | - 3.09E+04 | 6.05E+06 | 1.00E+05 | 9.01E+04 | -3.54E- 04 |
| 19 | 1 | 19 | 20 | 1001 | beam | - 5.86E+03 | 6.07E+06 | 1.02E+05 | 1.00E+05 | -3.55E- 04 |
| 18 | 1 | 18 | 19 | 1001 | beam | 5.60E+03 | 6.05E+06 | 9.92E+04 | 1.02E+05 | -3.54E- 04 |
| 17 | 1 | 17 | 18 | 1001 | beam | 8.46E+03 | 6.03E+06 | 9.49E+04 | 9.92E+04 | -3.53E- 04 |
| 16 | 1 | 16 | 17 | 1001 | beam | - 1.56E+03 | 6.01E+06 | 9.57E+04 | 9.49E+04 | -3.52E- 04 |
| 15 | 1 | 15 | 16 | 1001 | beam | - 3.30E+03 | 6.00E+06 | 9.73E+04 | 9.57E+04 | -3.51E- 04 |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|
| 14 | 1 | 14 | 15 | 1001 | beam | 5.52E+03 | 6.01E+06 | - 9.56E+04 | 9.74E+04 | -3.51E- 04 |
| 13 | 1 | 13 | 14 | 1001 | beam | 2.82E+04 | 5.98E+06 | - 8.65E+04 | 9.56E+04 | -3.50E- 04 |
| 12 | 1 | 12 | 13 | 1001 | beam | 4.31E+04 | 5.90E+06 | - 6.61E+04 | 8.64E+04 | -3.45E- 04 |
| 11 | 1 | 11 | 12 | 1001 | beam | 6.88E+04 | 5.84E+06 | - 4.15E+04 | 6.61E+04 | -3.42E- 04 |
| 10 | 1 | 10 | 11 | 1001 | beam | 5.84E+04 | 5.79E+06 | - 2.06E+04 | 4.15E+04 | -3.39E- 04 |
| 9 | 1 | 9 | 10 | 1001 | beam | 6.55E+04 | 5.74E+06 | 3.74E+03 | 2.07E+04 | -3.36E- 04 |
| 8 | 1 | 8 | 9 | 1001 | beam | 5.10E+04 | 5.69E+06 | 2.27E+04 | - 3.65E+03 | -3.33E- 04 |
| 7 | 1 | 7 | 8 | 1001 | beam | 5.68E+04 | 5.63E+06 | 4.35E+04 | - 2.27E+04 | -3.29E- 04 |
| 6 | 1 | 6 | 7 | 1001 | beam | 4.29E+04 | 5.61E+06 | 5.92E+04 | - 4.35E+04 | -3.28E- 04 |
| 5 | 1 | 5 | 6 | 1001 | beam | 4.10E+04 | 5.52E+06 | 7.84E+04 | - 5.93E+04 | -3.23E- 04 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 1001 | beam | 1.66E+04 | 5.47E+06 | 8.41E+04 | - 7.84E+04 | -3.20E- 04 |
| 3 | 1 | 3 | 4 | 1001 | beam | 5.42E+03 | 5.36E+06 | 8.60E+04 | - 8.42E+04 | -3.14E- 04 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1001 | beam | 4.92E+02 | 5.36E+06 | 8.65E+04 | - 8.62E+04 | -3.13E- 04 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1001 | beam | 2.04E+03 | 5.31E+06 | 8.76E+04 | - 8.66E+04 | -3.11E- 04 |

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.45 m - Analisi n°16

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|----------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (ma in parametri efficaci) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati | 1.0 |

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

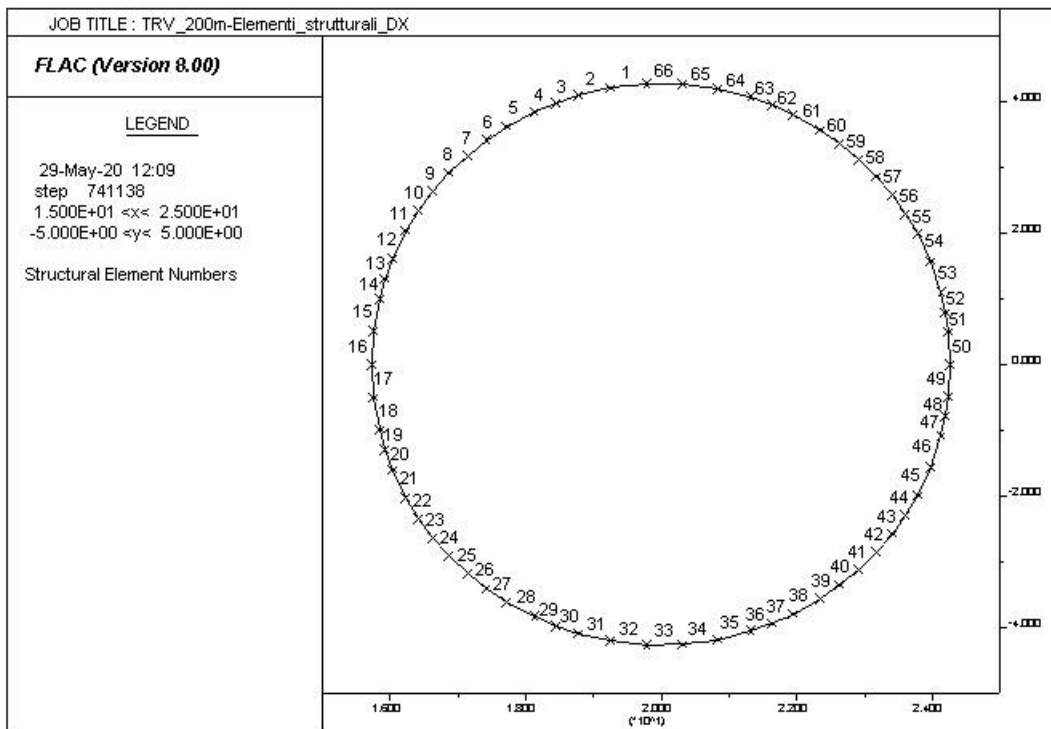


Figura 28 - Numerazione elementi beam canna Destra

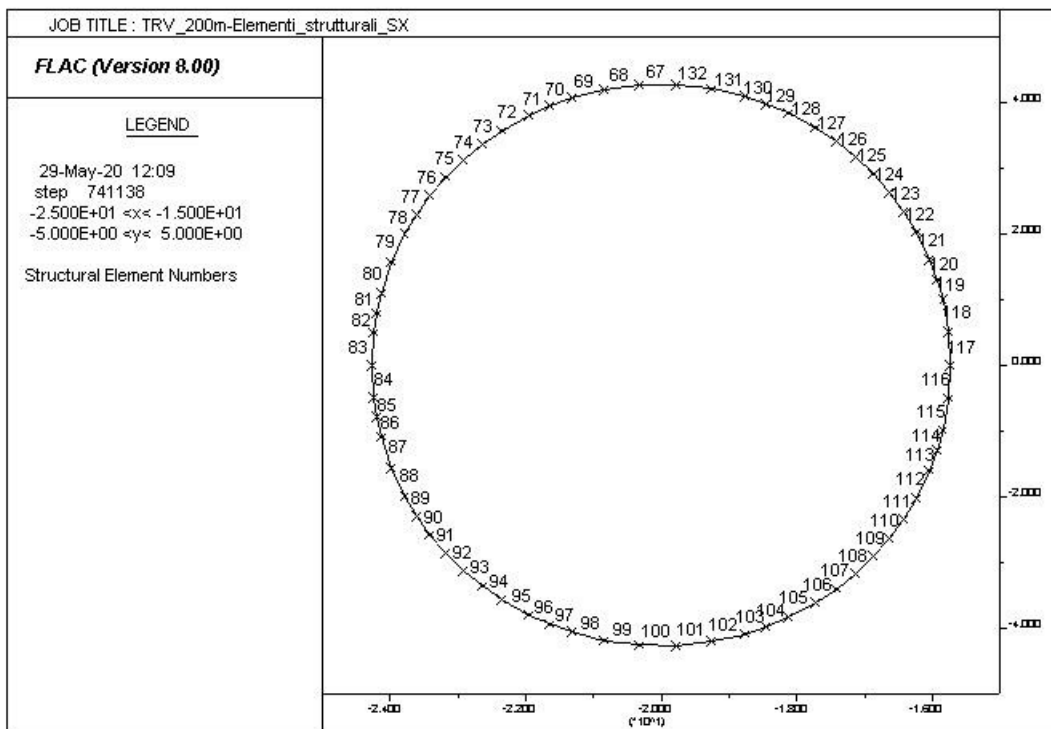


Figura 29 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

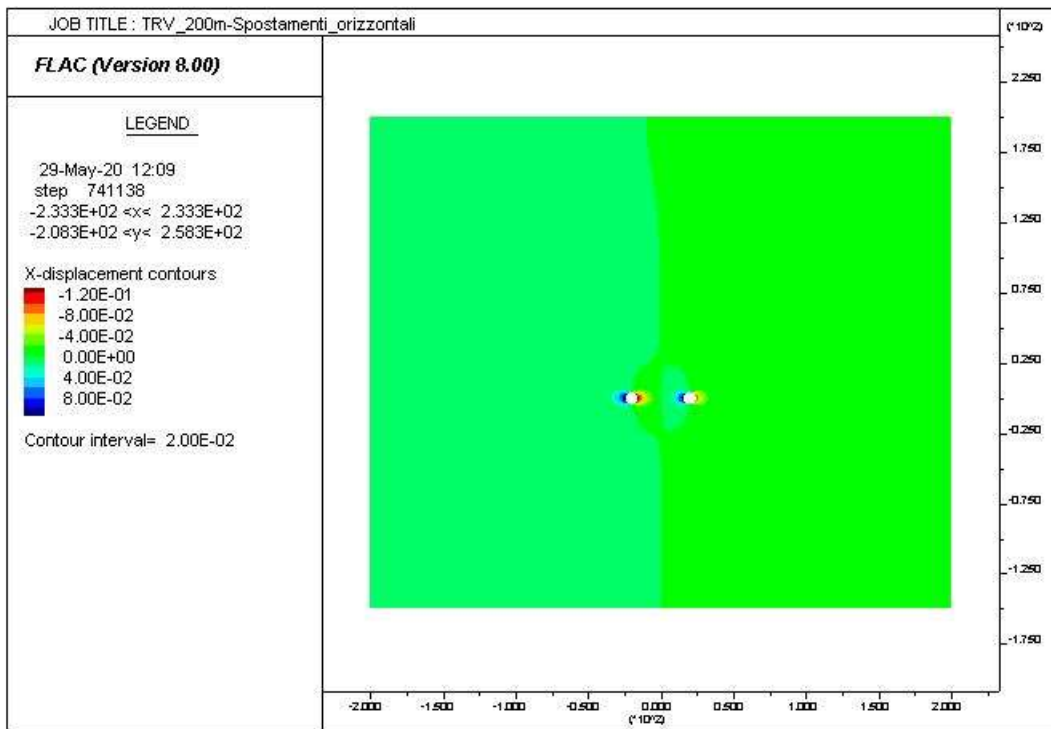


Figura 30 - Spostamenti x

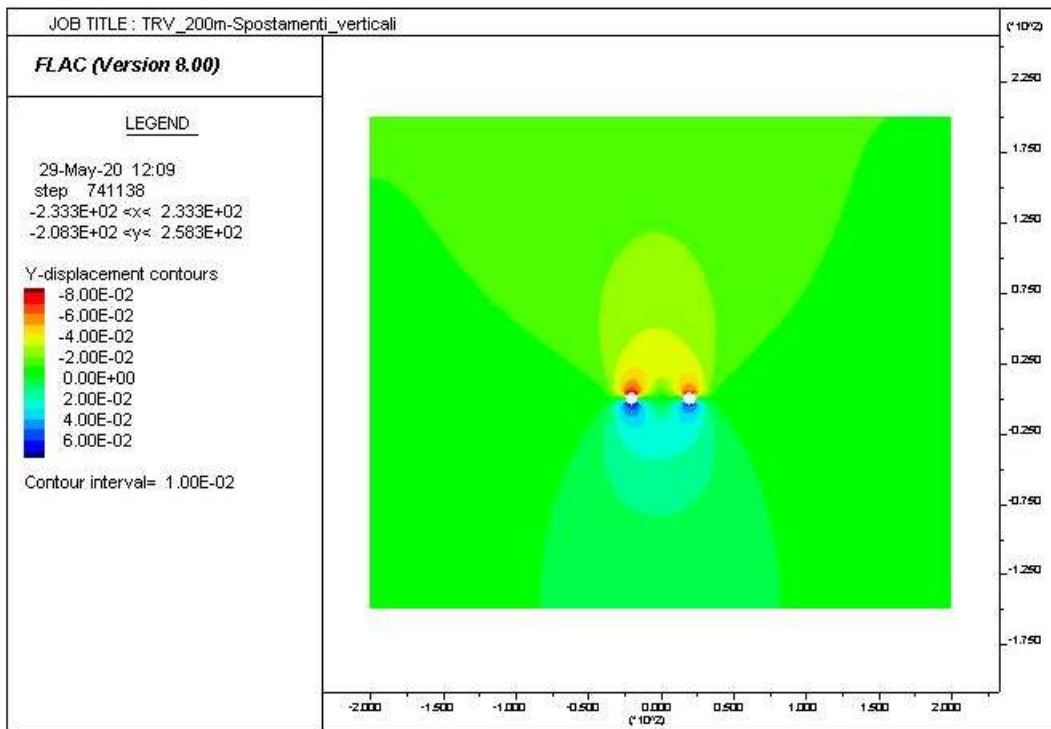


Figura 31 - Spostamenti y

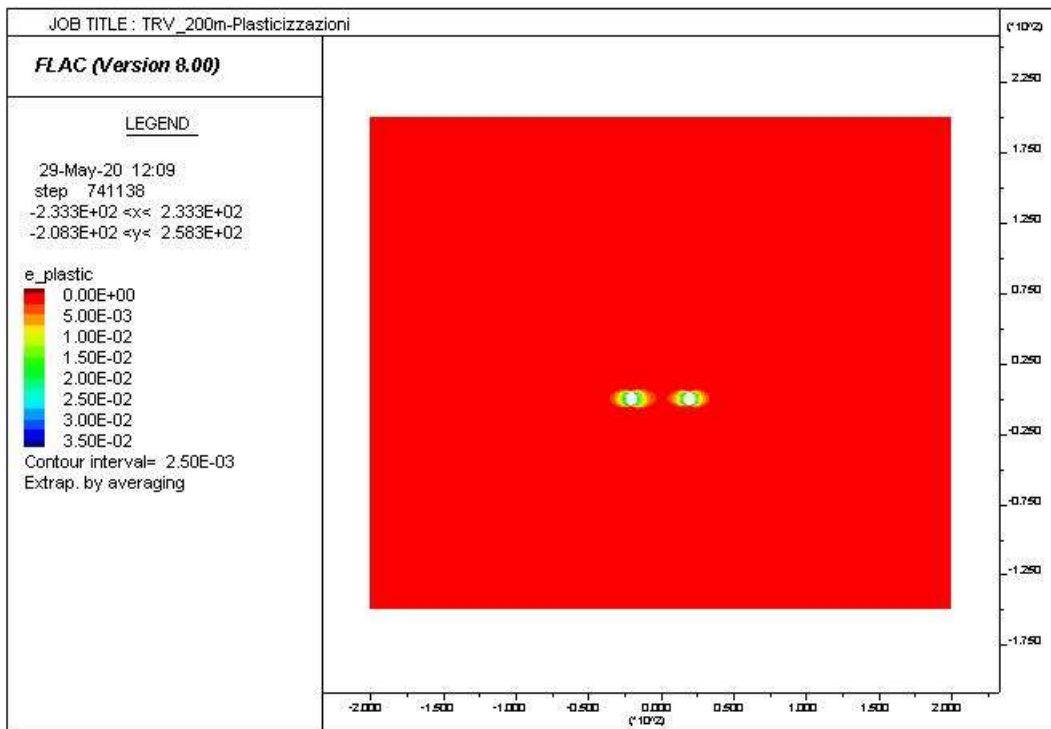


Figura 32 – Plasticizzazioni

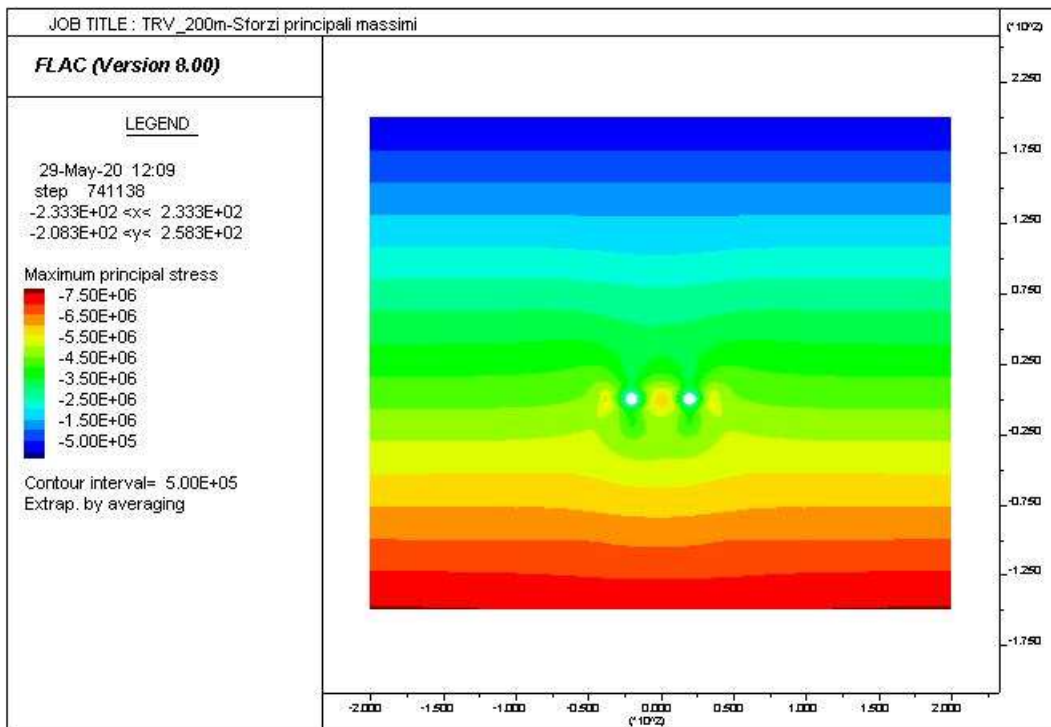


Figura 33 – Tensioni principali totali sigma1

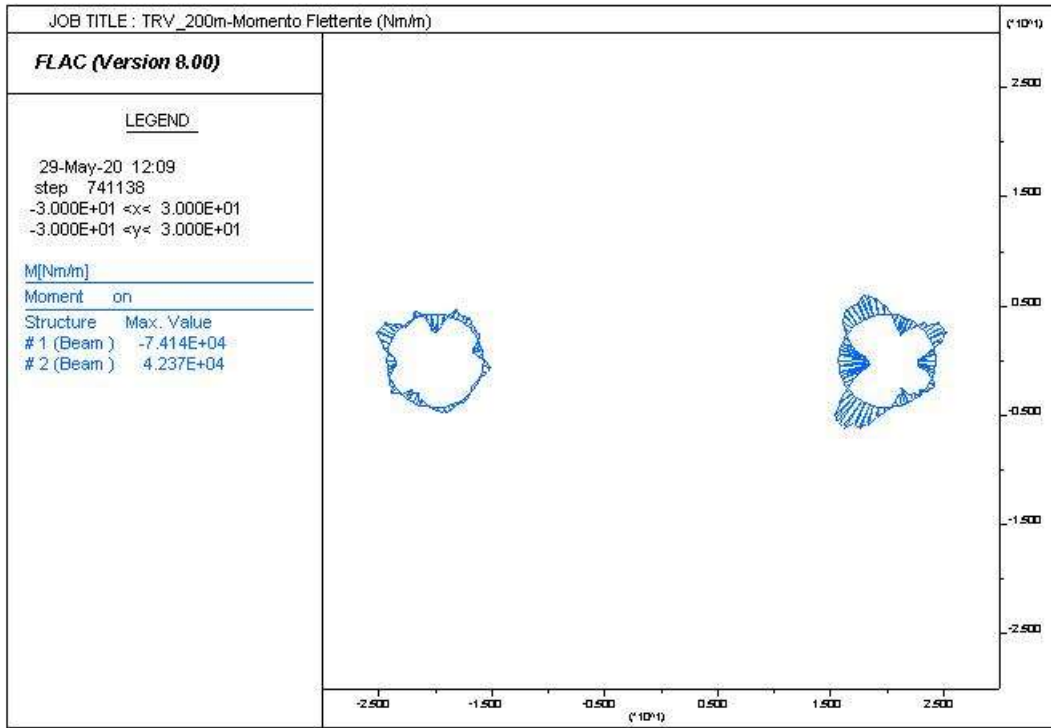


Figura 34 – Sollecitazioni M

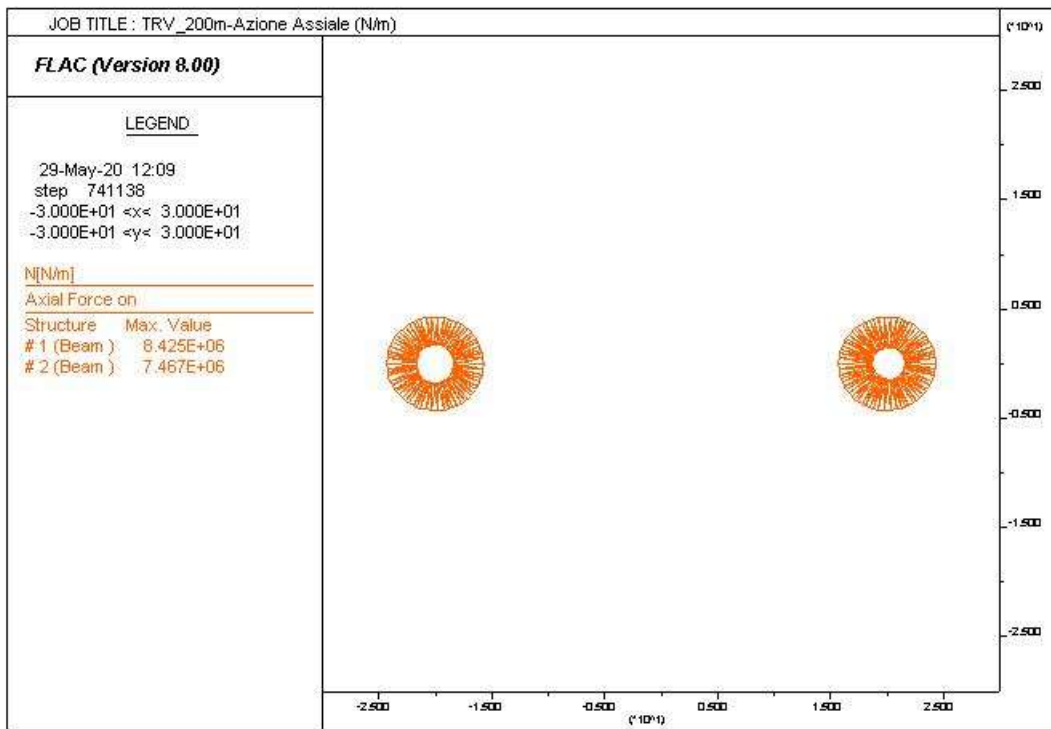


Figura 35 – Sollecitazioni N

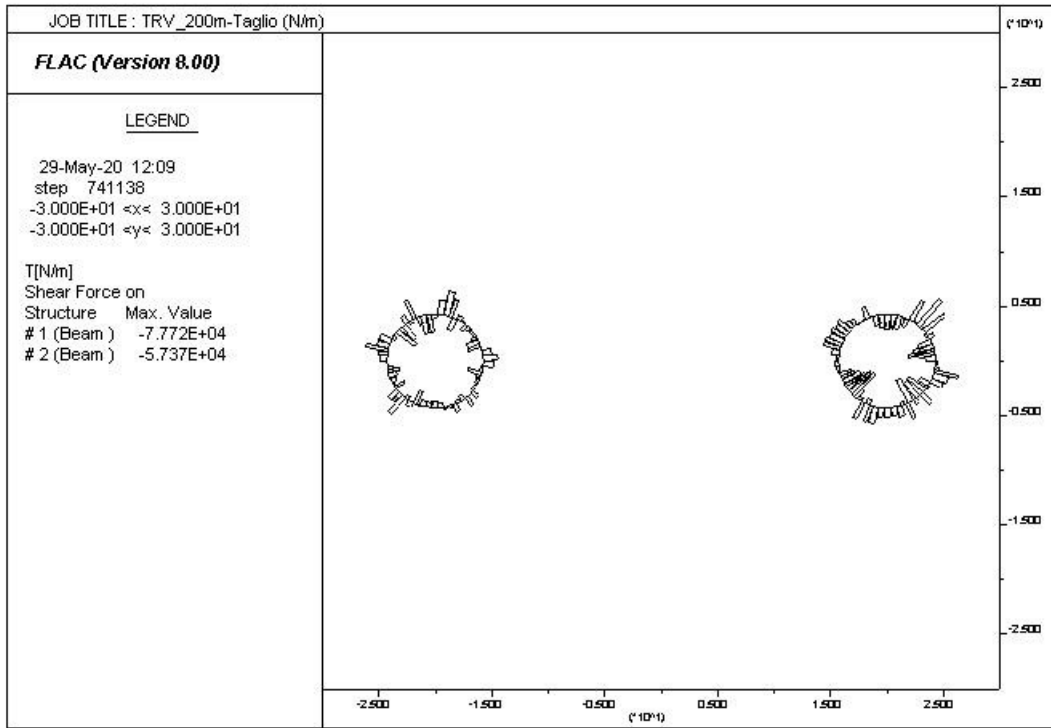


Figura 36 – Sollecitazioni T

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 132 | 2 | 132 | 67 | 1001 | beam | 3.69E+04 | 6.96E+06 | 2.16E+04 | 4.10E+04 | -4.07E-04 |
| 131 | 2 | 131 | 132 | 1001 | beam | 6.04E+04 | 6.99E+06 | 9.13E+03 | 2.14E+04 | -4.09E-04 |
| 130 | 2 | 130 | 131 | 1001 | beam | 4.28E+04 | 6.98E+06 | 2.41E+04 | 9.42E+03 | -4.08E-04 |
| 129 | 2 | 129 | 130 | 1001 | beam | 3.34E+04 | 6.99E+06 | 1.23E+04 | 2.38E+04 | -4.09E-04 |
| 128 | 2 | 128 | 129 | 1001 | beam | 5.82E+03 | 7.02E+06 | 1.50E+04 | 1.23E+04 | -4.10E-04 |
| 127 | 2 | 127 | 128 | 1001 | beam | 1.39E+03 | 7.10E+06 | 1.44E+04 | 1.49E+04 | -4.15E-04 |
| 126 | 2 | 126 | 127 | 1001 | beam | 1.67E+04 | 7.07E+06 | 8.79E+03 | 1.49E+04 | -4.14E-04 |
| 125 | 2 | 125 | 126 | 1001 | beam | 5.40E+03 | 7.11E+06 | 6.52E+03 | 8.53E+03 | -4.16E-04 |
| 124 | 2 | 124 | 125 | 1001 | beam | 3.81E+03 | 7.16E+06 | 5.29E+03 | 6.72E+03 | -4.19E-04 |
| 123 | 2 | 123 | 124 | 1001 | beam | 3.81E+03 | 7.20E+06 | 3.57E+03 | 4.94E+03 | -4.21E-04 |
| 122 | 2 | 122 | 123 | 1001 | beam | 1.03E+04 | 7.23E+06 | 7.24E+01 | 3.78E+03 | -4.23E-04 |
| 121 | 2 | 121 | 122 | 1001 | beam | 2.27E+04 | 7.28E+06 | 1.11E+04 | 3.52E+02 | -4.25E-04 |
| 120 | 2 | 120 | 121 | 1001 | beam | 2.53E+04 | 7.29E+06 | 1.93E+04 | 1.11E+04 | -4.26E-04 |
| 119 | 2 | 119 | 120 | 1001 | beam | 4.43E+02 | 7.32E+06 | 1.99E+04 | 1.97E+04 | -4.28E-04 |
| 118 | 2 | 118 | 119 | 1001 | beam | 1.84E+04 | 7.38E+06 | 1.10E+04 | 2.00E+04 | -4.32E-04 |
| 117 | 2 | 117 | 118 | 1001 | beam | 3.03E+04 | 7.44E+06 | 4.54E+03 | 1.08E+04 | -4.35E-04 |
| 116 | 2 | 116 | 117 | 1001 | beam | 2.08E+04 | 7.46E+06 | 1.51E+04 | 4.58E+03 | -4.36E-04 |
| 115 | 2 | 115 | 116 | 1001 | beam | 6.64E+03 | 7.41E+06 | 1.20E+04 | 1.53E+04 | -4.33E-04 |
| 114 | 2 | 114 | 115 | 1001 | beam | 3.53E+04 | 7.34E+06 | - | 1.26E+04 | -4.29E- |

| | | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|------|------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | | | | | | | 1.17E+03 | | 04 |
| 113 | 2 | 113 | 114 | 1001 | beam | 1.32E+04 | 7.31E+06 | 2.95E+03 | 1.31E+03 | -4.28E-04 |
| 112 | 2 | 112 | 113 | 1001 | beam | 6.19E+03 | 7.29E+06 | 5.73E+03 | - | -4.26E-04 |
| 111 | 2 | 111 | 112 | 1001 | beam | - | 7.25E+06 | 4.60E+03 | - | -4.24E-04 |
| 110 | 2 | 110 | 111 | 1001 | beam | 4.48E+03 | 7.23E+06 | 6.43E+03 | - | -4.23E-04 |
| 109 | 2 | 109 | 110 | 1001 | beam | - | 7.19E+06 | 1.17E+03 | - | -4.20E-04 |
| 108 | 2 | 108 | 109 | 1001 | beam | 2.49E+03 | 7.11E+06 | 5.00E+02 | - | -4.16E-04 |
| 107 | 2 | 107 | 108 | 1001 | beam | - | 7.07E+06 | - | - | -4.13E-04 |
| 106 | 2 | 106 | 107 | 1001 | beam | 2.55E+04 | 7.05E+06 | 8.59E+03 | 7.60E+02 | -4.12E-04 |
| 105 | 2 | 105 | 106 | 1001 | beam | 9.73E+03 | 7.05E+06 | 5.05E+03 | 8.62E+03 | -4.11E-04 |
| 104 | 2 | 104 | 105 | 1001 | beam | 4.81E+03 | 7.03E+06 | 2.83E+03 | 5.07E+03 | -4.10E-04 |
| 103 | 2 | 103 | 104 | 1001 | beam | - | 7.01E+06 | - | 2.80E+03 | -4.10E-04 |
| 102 | 2 | 102 | 103 | 1001 | beam | 2.33E+04 | 7.00E+06 | 1.08E+04 | 2.80E+03 | -4.09E-04 |
| 101 | 2 | 101 | 102 | 1001 | beam | - | 7.00E+06 | - | 1.09E+04 | -4.10E-04 |
| 100 | 2 | 100 | 101 | 1001 | beam | 7.08E+03 | 7.01E+06 | 1.33E+04 | 1.09E+04 | -4.10E-04 |
| 99 | 2 | 99 | 100 | 1001 | beam | - | 7.01E+06 | - | 1.34E+04 | -4.11E-04 |
| 98 | 2 | 98 | 99 | 1001 | beam | 4.36E+03 | 7.02E+06 | 1.56E+04 | 1.34E+04 | -4.11E-04 |
| 97 | 2 | 97 | 98 | 1001 | beam | 1.07E+04 | 7.02E+06 | 1.01E+04 | 1.58E+04 | -4.12E-04 |
| 96 | 2 | 96 | 97 | 1001 | beam | 1.59E+04 | 7.05E+06 | 1.21E+03 | 9.71E+03 | -4.10E-04 |
| 95 | 2 | 95 | 96 | 1001 | beam | 1.15E+04 | 7.01E+06 | 5.32E+03 | 7.16E+02 | -4.10E-04 |
| 94 | 2 | 94 | 95 | 1001 | beam | 1.15E+04 | 7.01E+06 | 1.14E+04 | 5.63E+03 | -4.10E-04 |
| 93 | 2 | 93 | 94 | 1001 | beam | - | 6.99E+06 | 1.11E+04 | 1.16E+04 | -4.09E-04 |
| 92 | 2 | 92 | 93 | 1001 | beam | 1.32E+03 | 6.99E+06 | 1.11E+04 | 1.16E+04 | -4.08E-04 |
| 91 | 2 | 91 | 92 | 1001 | beam | 3.37E+04 | 6.97E+06 | 2.25E+04 | 1.09E+04 | -4.09E-04 |
| 90 | 2 | 90 | 91 | 1001 | beam | - | 6.99E+06 | 1.73E+04 | 2.20E+04 | -4.09E-04 |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1001 | beam | 1.02E+04 | 6.99E+06 | 1.73E+04 | 2.20E+04 | -4.11E-04 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1001 | beam | 9.43E+03 | 7.03E+06 | 2.07E+04 | 1.73E+04 | -4.13E-04 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1001 | beam | - | 7.06E+06 | 2.16E+03 | 2.05E+04 | -4.17E-04 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1001 | beam | 5.05E+04 | 7.06E+06 | 2.16E+03 | 2.05E+04 | -4.19E-04 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1001 | beam | - | 7.14E+06 | - | - | -4.19E-04 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1001 | beam | 2.12E+04 | 7.14E+06 | 6.18E+03 | 1.57E+03 | -4.19E-04 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1001 | beam | - | 7.17E+06 | - | 6.36E+03 | -4.21E-04 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1001 | beam | 2.34E+04 | 7.17E+06 | 1.49E+04 | 6.36E+03 | -4.22E-04 |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | 2.70E+04 | 7.17E+06 | 5.58E+03 | 1.50E+04 | -4.26E-04 |
| | | | | | | | | | | |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1001 | beam | 2.90E+03 | 7.19E+06 | 4.84E+03 | 5.86E+03 | -4.21E-04 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1001 | beam | - | 7.21E+06 | - | 4.88E+03 | -4.22E-04 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1001 | beam | 1.05E+04 | 7.21E+06 | 3.76E+00 | 4.88E+03 | -4.26E-04 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1001 | beam | 1.47E+04 | 7.28E+06 | 7.66E+03 | 1.97E+02 | -4.27E-04 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1001 | beam | 1.47E+04 | 7.28E+06 | 7.66E+03 | 1.97E+02 | -4.27E-04 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1001 | beam | 2.45E+04 | 7.30E+06 | 1.54E+04 | 7.94E+03 | -4.27E-04 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1001 | beam | 1.31E+04 | 7.31E+06 | 1.94E+04 | 1.55E+04 | -4.26E-04 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1001 | beam | - | 7.28E+06 | - | - | -4.24E-04 |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | 3.79E+01 | 7.28E+06 | 1.96E+04 | 1.96E+04 | -4.24E-04 |
| | | | | | | | | | | |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1001 | beam | - | 7.25E+06 | - | - | -4.24E-04 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1001 | beam | 1.75E+04 | 7.25E+06 | 1.08E+04 | 1.95E+04 | -4.24E-04 |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | - | 7.24E+06 | - | - | -4.22E-04 |
| | | | | | | | | | | |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | 1.97E+04 | 7.24E+06 | 4.86E+03 | 1.08E+04 | -4.22E-04 |
| | | | | | | | | | | |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1001 | beam | - | 7.22E+06 | - | - | -4.22E-04 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|---|----------|----------|---|----------|----------|-----------|
| 80 | 2 | 80 | 81 | 1001 | beam | - | 2.46E+04 | 7.24E+06 | - | 2.21E+04 | 9.63E+03 | -4.23E-04 |
| 79 | 2 | 79 | 80 | 1001 | beam | - | 2.68E+04 | 7.12E+06 | - | 3.47E+04 | 2.23E+04 | -4.17E-04 |
| 78 | 2 | 78 | 79 | 1001 | beam | - | 5.68E+03 | 7.14E+06 | - | 3.30E+04 | 3.50E+04 | -4.18E-04 |
| 77 | 2 | 77 | 78 | 1001 | beam | - | 6.60E+03 | 7.12E+06 | - | 3.53E+04 | 3.30E+04 | -4.17E-04 |
| 76 | 2 | 76 | 77 | 1001 | beam | - | 5.00E+04 | 7.10E+06 | - | 1.68E+04 | 3.51E+04 | -4.15E-04 |
| 75 | 2 | 75 | 76 | 1001 | beam | - | 2.20E+04 | 7.08E+06 | - | 8.42E+03 | 1.65E+04 | -4.14E-04 |
| 74 | 2 | 74 | 75 | 1001 | beam | - | 4.31E+04 | 7.01E+06 | - | 8.03E+03 | 7.60E+03 | -4.10E-04 |
| 73 | 2 | 73 | 74 | 1001 | beam | - | 1.81E+04 | 6.99E+06 | - | 1.37E+03 | 7.93E+03 | -4.09E-04 |
| 72 | 2 | 72 | 73 | 1001 | beam | - | 4.29E+03 | 6.95E+06 | - | 3.33E+03 | 1.38E+03 | -4.07E-04 |
| 71 | 2 | 71 | 72 | 1001 | beam | - | 4.95E+04 | 6.94E+06 | - | 1.39E+04 | 3.07E+03 | -4.06E-04 |
| 70 | 2 | 70 | 71 | 1001 | beam | - | 2.14E+04 | 6.96E+06 | - | 6.04E+03 | 1.34E+04 | -4.07E-04 |
| 69 | 2 | 69 | 70 | 1001 | beam | - | 4.20E+04 | 7.01E+06 | - | 1.49E+04 | 6.04E+03 | -4.10E-04 |
| 68 | 2 | 68 | 69 | 1001 | beam | - | 4.07E+04 | 6.98E+06 | - | 3.62E+04 | 1.49E+04 | -4.08E-04 |
| 67 | 2 | 67 | 68 | 1001 | beam | - | 8.63E+03 | 7.01E+06 | - | 4.09E+04 | 3.63E+04 | -4.10E-04 |
| 66 | 1 | 66 | 1 | 1001 | beam | - | 3.57E+04 | 7.73E+06 | - | 5.95E+02 | 1.96E+04 | -4.52E-04 |
| 65 | 1 | 65 | 66 | 1001 | beam | - | 3.30E+04 | 7.64E+06 | - | 1.65E+04 | 7.93E+02 | -4.47E-04 |
| 64 | 1 | 64 | 65 | 1001 | beam | - | 3.08E+04 | 7.58E+06 | - | 3.19E+04 | 1.65E+04 | -4.43E-04 |
| 63 | 1 | 63 | 64 | 1001 | beam | - | 4.54E+03 | 7.46E+06 | - | 3.34E+04 | 3.19E+04 | -4.36E-04 |
| 62 | 1 | 62 | 63 | 1001 | beam | - | 2.18E+04 | 7.39E+06 | - | 4.09E+04 | 3.34E+04 | -4.32E-04 |
| 61 | 1 | 61 | 62 | 1001 | beam | - | 5.40E+04 | 7.37E+06 | - | 1.63E+04 | 4.09E+04 | -4.31E-04 |
| 60 | 1 | 60 | 61 | 1001 | beam | - | 4.99E+03 | 7.39E+06 | - | 1.46E+04 | 1.64E+04 | -4.32E-04 |
| 59 | 1 | 59 | 60 | 1001 | beam | - | 7.87E+04 | 7.40E+06 | - | 1.39E+04 | 1.46E+04 | -4.32E-04 |
| 58 | 1 | 58 | 59 | 1001 | beam | - | 6.39E+03 | 7.43E+06 | - | 1.61E+04 | 1.37E+04 | -4.34E-04 |
| 57 | 1 | 57 | 58 | 1001 | beam | - | 6.10E+04 | 7.46E+06 | - | 3.82E+04 | 1.59E+04 | -4.36E-04 |
| 56 | 1 | 56 | 57 | 1001 | beam | - | 4.07E+03 | 7.51E+06 | - | 3.68E+04 | 3.82E+04 | -4.39E-04 |
| 55 | 1 | 55 | 56 | 1001 | beam | - | 1.28E+04 | 7.53E+06 | - | 4.13E+04 | 3.68E+04 | -4.41E-04 |
| 54 | 1 | 54 | 55 | 1001 | beam | - | 3.28E+04 | 7.53E+06 | - | 2.60E+04 | 4.12E+04 | -4.40E-04 |
| 53 | 1 | 53 | 54 | 1001 | beam | - | 5.07E+04 | 7.58E+06 | - | 3.18E+02 | 2.60E+04 | -4.43E-04 |
| 52 | 1 | 52 | 53 | 1001 | beam | - | 6.60E+04 | 7.56E+06 | - | 2.01E+04 | 6.75E+01 | -4.42E-04 |
| 51 | 1 | 51 | 52 | 1001 | beam | - | 3.67E+04 | 7.55E+06 | - | 3.13E+04 | 2.01E+04 | -4.42E-04 |
| 50 | 1 | 50 | 51 | 1001 | beam | - | 1.97E+04 | 7.53E+06 | - | 4.12E+04 | 3.15E+04 | -4.40E-04 |
| 49 | 1 | 49 | 50 | 1001 | beam | - | 9.35E+03 | 7.52E+06 | - | 3.67E+04 | 4.13E+04 | -4.40E-04 |
| 48 | 1 | 48 | 49 | 1001 | beam | - | 1.42E+04 | 7.53E+06 | - | 3.25E+04 | 3.68E+04 | -4.40E-04 |
| 47 | 1 | 47 | 48 | 1001 | beam | - | - | 7.53E+06 | - | 1.42E+04 | - | -4.41E- |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | | | | | 6.04E+04 | | | 3.24E+04 | 04 |
| 46 | 1 | 46 | 47 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.43E-04 |
| | | | | | | 3.79E+04 | 7.57E+06 | 5.10E+03 | 1.41E+04 | |
| 45 | 1 | 45 | 46 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.40E-04 |
| | | | | | | 2.83E+04 | 7.52E+06 | 1.83E+04 | 5.15E+03 | |
| 44 | 1 | 44 | 45 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.42E-04 |
| | | | | | | 2.46E+04 | 7.56E+06 | 9.70E+03 | 1.83E+04 | |
| 43 | 1 | 43 | 44 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.42E-04 |
| | | | | | | 2.30E+03 | 7.56E+06 | 1.07E+04 | 9.87E+03 | |
| 42 | 1 | 42 | 43 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.41E-04 |
| | | | | | | 4.88E+04 | 7.53E+06 | 7.21E+03 | 1.07E+04 | |
| 41 | 1 | 41 | 42 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.40E-04 |
| | | | | | | 2.75E+04 | 7.52E+06 | 2.86E+03 | 7.23E+03 | |
| 40 | 1 | 40 | 41 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.39E-04 |
| | | | | | | 4.57E+04 | 7.50E+06 | 1.36E+04 | 2.97E+03 | |
| 39 | 1 | 39 | 40 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.39E-04 |
| | | | | | | 1.21E+04 | 7.50E+06 | 8.80E+03 | 1.32E+04 | |
| 38 | 1 | 38 | 39 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.36E-04 |
| | | | | | | 5.92E+04 | 7.45E+06 | 3.55E+04 | 8.61E+03 | |
| 37 | 1 | 37 | 38 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.37E-04 |
| | | | | | | 3.89E+04 | 7.48E+06 | 2.19E+04 | 3.52E+04 | |
| 36 | 1 | 36 | 37 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.39E-04 |
| | | | | | | 7.64E+03 | 7.50E+06 | 2.45E+04 | 2.19E+04 | |
| 35 | 1 | 35 | 36 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.50E-04 |
| | | | | | | 2.51E+04 | 7.70E+06 | 1.20E+04 | 2.46E+04 | |
| 34 | 1 | 34 | 35 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.53E-04 |
| | | | | | | 2.00E+04 | 7.75E+06 | 1.57E+03 | 1.20E+04 | |
| 33 | 1 | 33 | 34 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.64E-04 |
| | | | | | | 2.10E+04 | 7.94E+06 | 9.62E+03 | 1.59E+03 | |
| 32 | 1 | 32 | 33 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.64E-04 |
| | | | | | | 2.50E+04 | 7.93E+06 | 2.28E+04 | 9.67E+03 | |
| 31 | 1 | 31 | 32 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.72E-04 |
| | | | | | | 4.22E+04 | 8.08E+06 | 4.42E+04 | 2.29E+04 | |
| 30 | 1 | 30 | 31 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.71E-04 |
| | | | | | | 4.02E+04 | 8.05E+06 | 5.83E+04 | 4.45E+04 | |
| 29 | 1 | 29 | 30 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.77E-04 |
| | | | | | | 1.42E+04 | 8.16E+06 | 5.36E+04 | 5.85E+04 | |
| 28 | 1 | 28 | 29 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.81E-04 |
| | | | | | | 4.25E+04 | 8.23E+06 | 7.34E+04 | 5.37E+04 | |
| 27 | 1 | 27 | 28 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.91E-04 |
| | | | | | | 7.93E+03 | 8.40E+06 | 7.05E+04 | 7.34E+04 | |
| 26 | 1 | 26 | 27 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.90E-04 |
| | | | | | | 2.52E+04 | 8.39E+06 | 6.12E+04 | 7.04E+04 | |
| 25 | 1 | 25 | 26 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.93E-04 |
| | | | | | | 7.02E+04 | 8.42E+06 | 3.47E+04 | 6.09E+04 | |
| 24 | 1 | 24 | 25 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.91E-04 |
| | | | | | | 5.93E+04 | 8.39E+06 | 1.23E+04 | 3.45E+04 | |
| 23 | 1 | 23 | 24 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.91E-04 |
| | | | | | | 6.22E+04 | 8.39E+06 | 9.90E+03 | 1.24E+04 | |
| 22 | 1 | 22 | 23 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.91E-04 |
| | | | | | | 5.14E+04 | 8.39E+06 | 2.83E+04 | 9.93E+03 | |
| 21 | 1 | 21 | 22 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.89E-04 |
| | | | | | | 4.16E+04 | 8.35E+06 | 4.80E+04 | 2.84E+04 | |
| 20 | 1 | 20 | 21 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.88E-04 |
| | | | | | | 3.12E+04 | 8.35E+06 | 5.81E+04 | 4.81E+04 | |
| 19 | 1 | 19 | 20 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.87E-04 |
| | | | | | | 2.58E+04 | 8.32E+06 | 6.65E+04 | 5.82E+04 | |
| 18 | 1 | 18 | 19 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.86E-04 |
| | | | | | | 5.08E+03 | 8.32E+06 | 6.43E+04 | 6.68E+04 | |
| 17 | 1 | 17 | 18 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.84E-04 |
| | | | | | | 7.65E+03 | 8.28E+06 | 6.05E+04 | 6.43E+04 | |
| 16 | 1 | 16 | 17 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.84E-04 |
| | | | | | | 4.38E+03 | 8.28E+06 | 5.82E+04 | 6.04E+04 | |
| 15 | 1 | 15 | 16 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.83E-04 |
| | | | | | | 1.60E+04 | 8.25E+06 | 5.05E+04 | 5.84E+04 | |
| 14 | 1 | 14 | 15 | 1001 | beam | - | - | - | - | -4.83E-04 |
| | | | | | | 3.70E+04 | 8.26E+06 | 3.85E+04 | 5.05E+04 | |

| | | | | | | | | | | |
|----|---|----|----|------|------|---------------|----------|----------|---------------|-----------|
| 13 | 1 | 13 | 14 | 1001 | beam | - 3.98E+04 | 8.25E+06 | 2.56E+04 | - 3.85E+04 | -4.83E-04 |
| 12 | 1 | 12 | 13 | 1001 | beam | - 3.36E+04 | 8.24E+06 | 9.66E+03 | - 2.55E+04 | -4.82E-04 |
| 11 | 1 | 11 | 12 | 1001 | beam | - 3.85E+04 | 8.22E+06 | 4.12E+03 | - 9.65E+03 | -4.81E-04 |
| 10 | 1 | 10 | 11 | 1001 | beam | - 3.00E+04 | 8.20E+06 | 1.49E+04 | - 4.13E+03 | -4.80E-04 |
| 9 | 1 | 9 | 10 | 1001 | beam | - 3.54E+04 | 8.18E+06 | 2.81E+04 | - 1.49E+04 | -4.79E-04 |
| 8 | 1 | 8 | 9 | 1001 | beam | - 1.98E+04 | 8.16E+06 | 3.54E+04 | - 2.81E+04 | -4.77E-04 |
| 7 | 1 | 7 | 8 | 1001 | beam | - 1.40E+04 | 8.12E+06 | 4.05E+04 | - 3.54E+04 | -4.75E-04 |
| 6 | 1 | 6 | 7 | 1001 | beam | - 4.46E+03 | 8.11E+06 | 3.90E+04 | - 4.07E+04 | -4.74E-04 |
| 5 | 1 | 5 | 6 | 1001 | beam | - 2.97E+03 | 7.99E+06 | 3.76E+04 | - 3.90E+04 | -4.68E-04 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 1001 | beam | - 2.49E+04 | 7.94E+06 | 4.61E+04 | - 3.76E+04 | -4.64E-04 |
| 3 | 1 | 3 | 4 | 1001 | beam | - 4.75E+02 | 7.95E+06 | 4.62E+04 | - 4.60E+04 | -4.65E-04 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1001 | beam | - 2.14E+04 | 7.90E+06 | 3.54E+04 | - 4.62E+04 | -4.62E-04 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1001 | beam | - 3.02E+04 | 7.78E+06 | 1.95E+04 | - 3.54E+04 | -4.55E-04 |

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.5 m - Analisi n°17

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|----------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati | 1.0 |

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

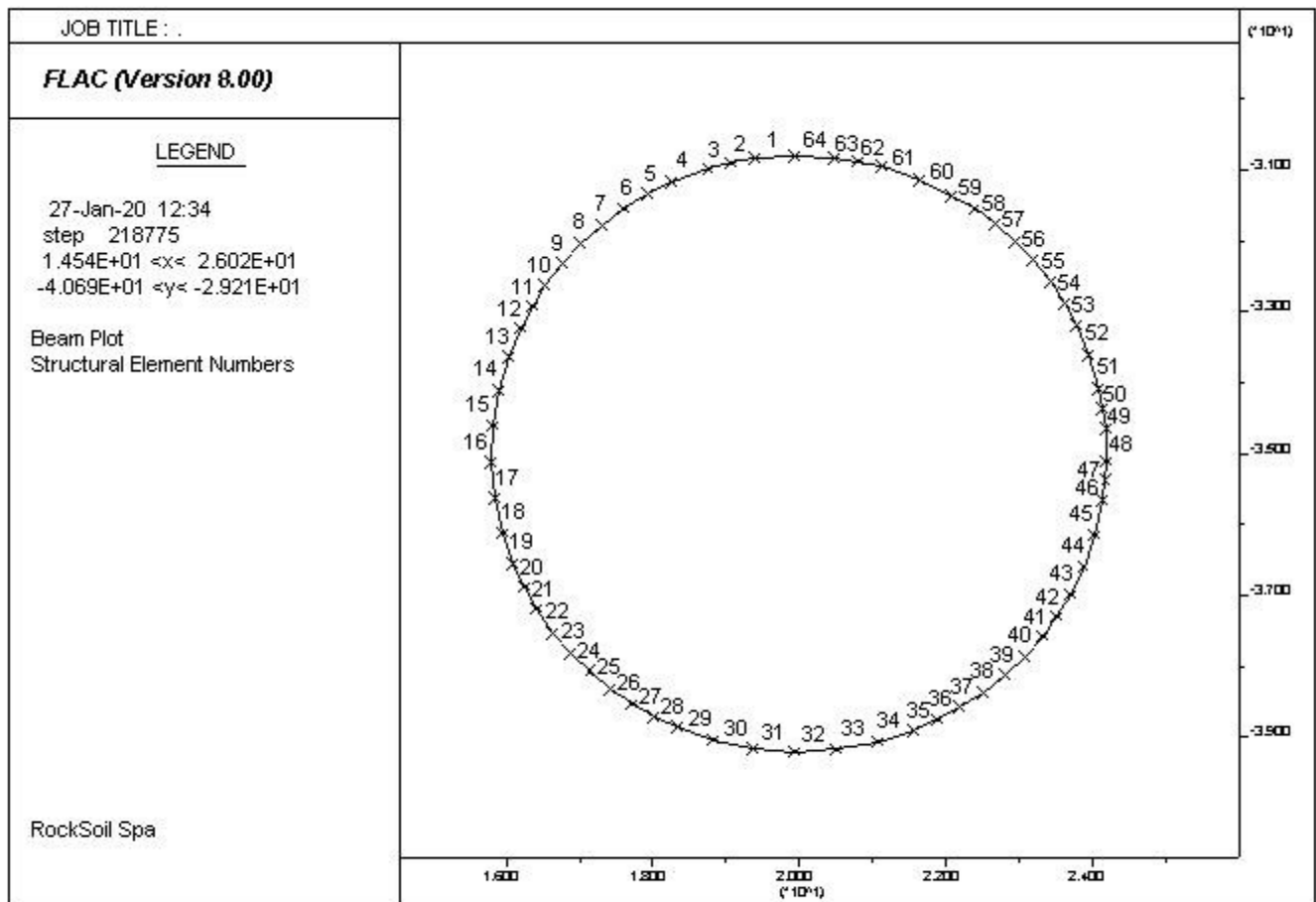


Figura 37 - Numerazione elementi beam canna Destra

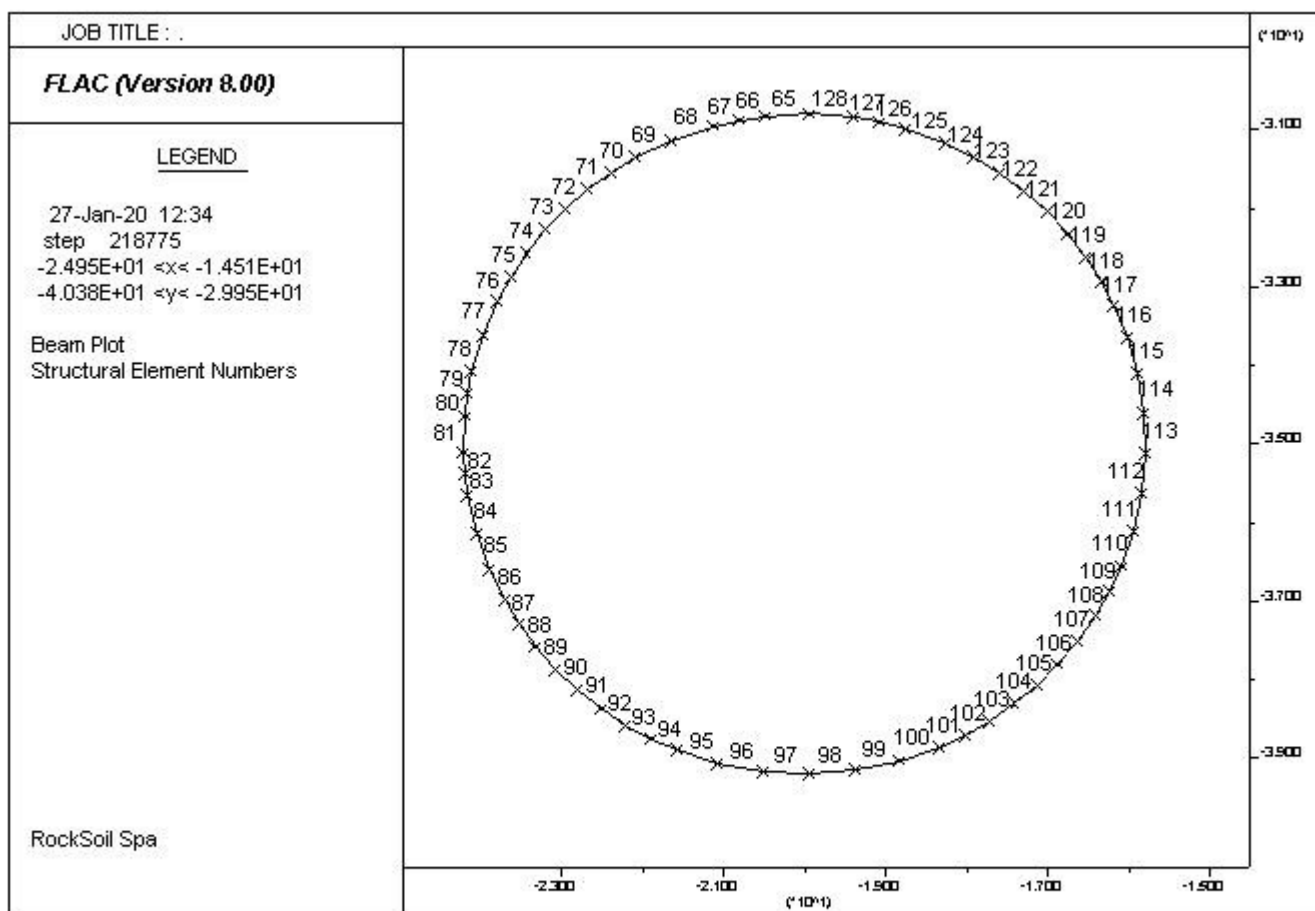


Figura 38 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

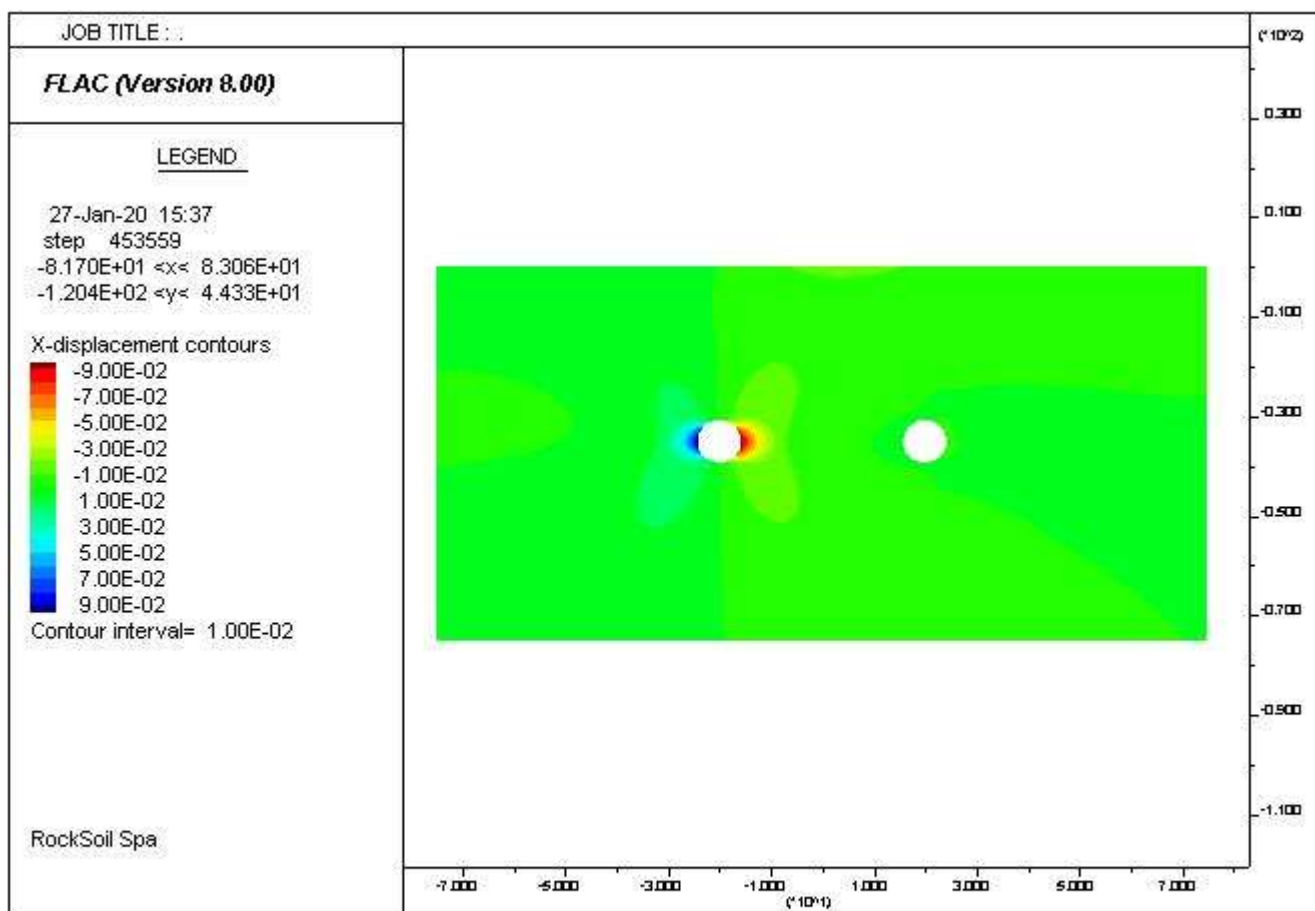


Figura 39 - Spostamenti x

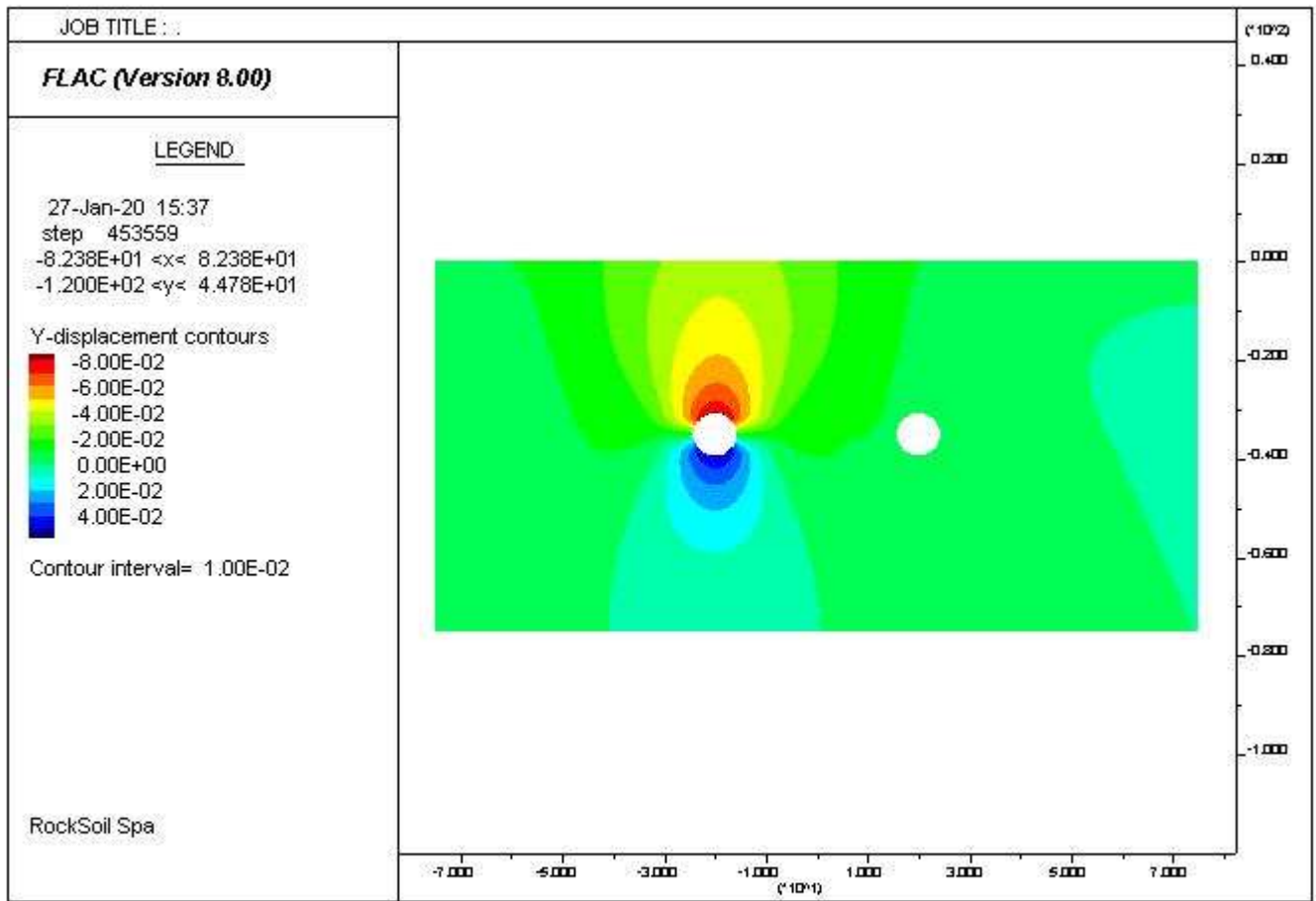


Figura 40 - Spostamenti y

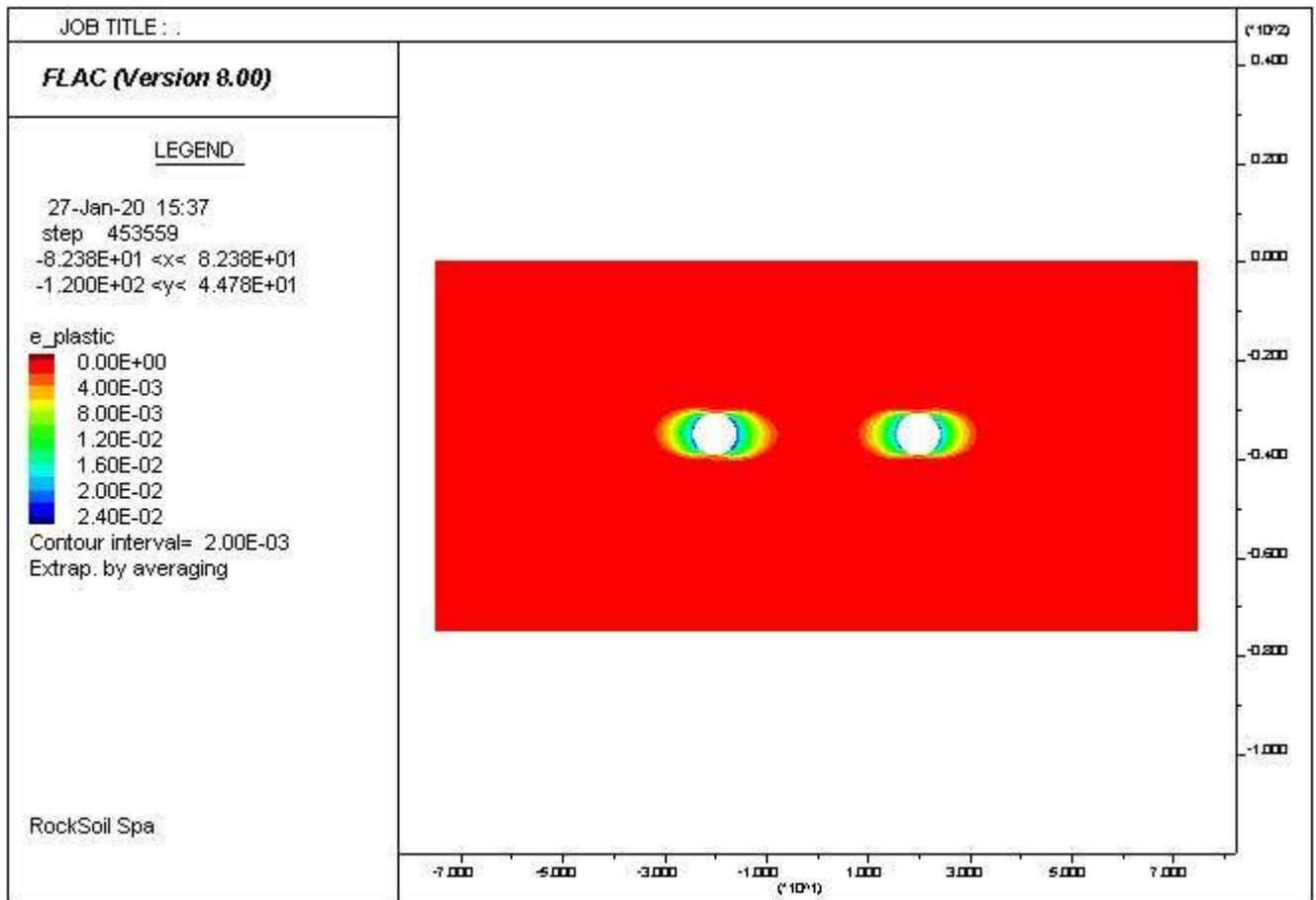


Figura 41 – Plasticizzazioni

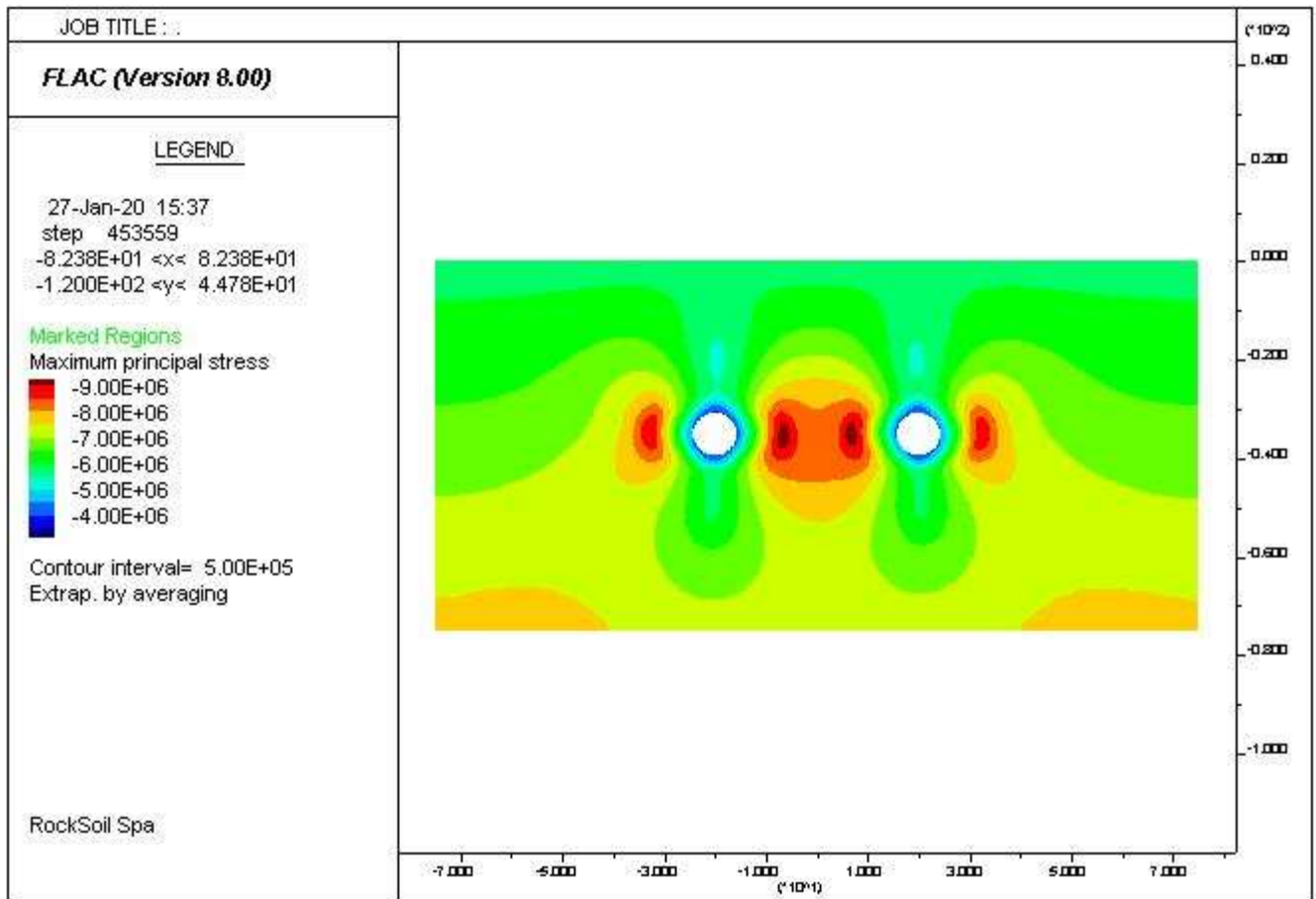


Figura 42 – Tensioni principali totali sigma1

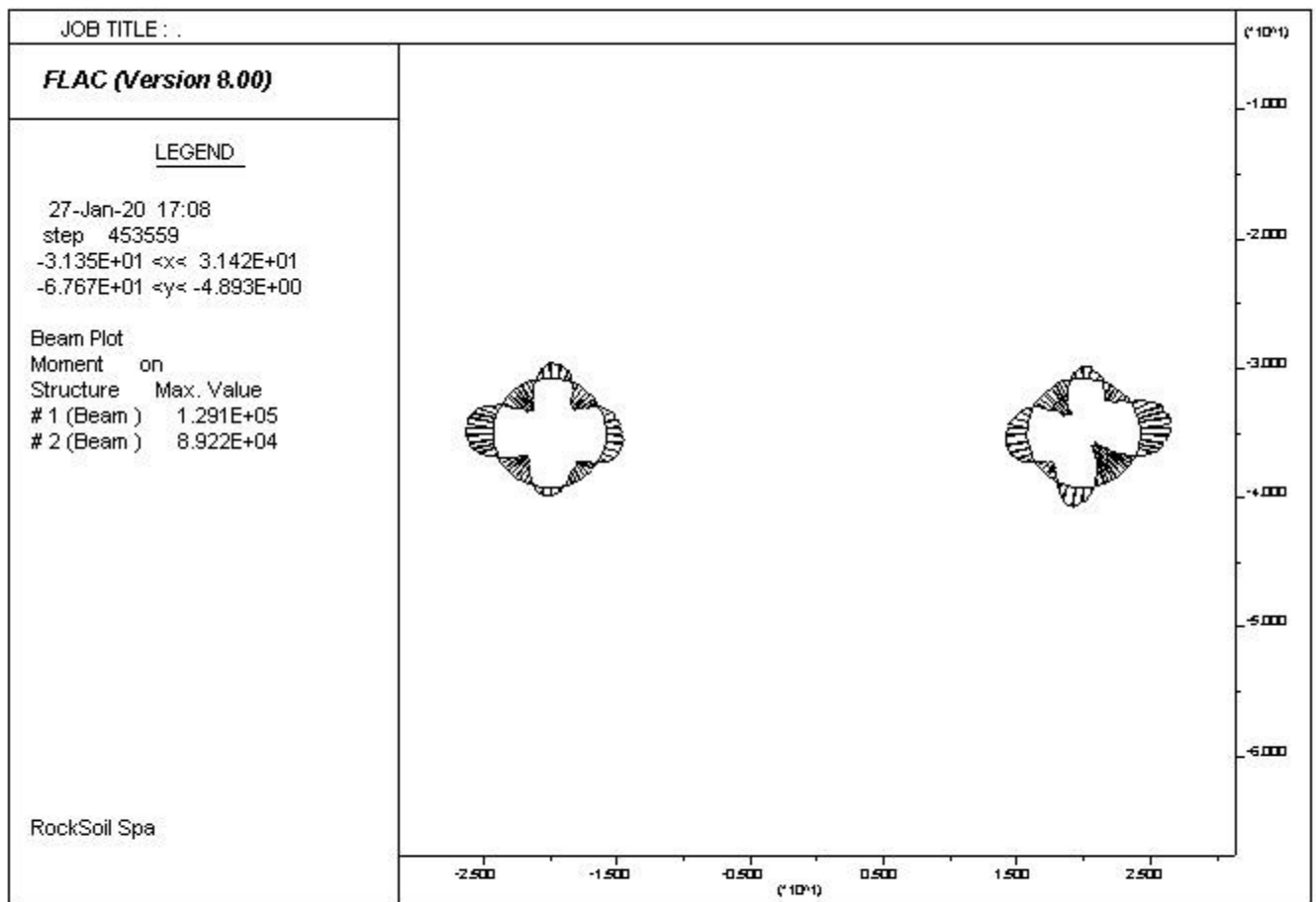


Figura 43 – Sollecitazioni M

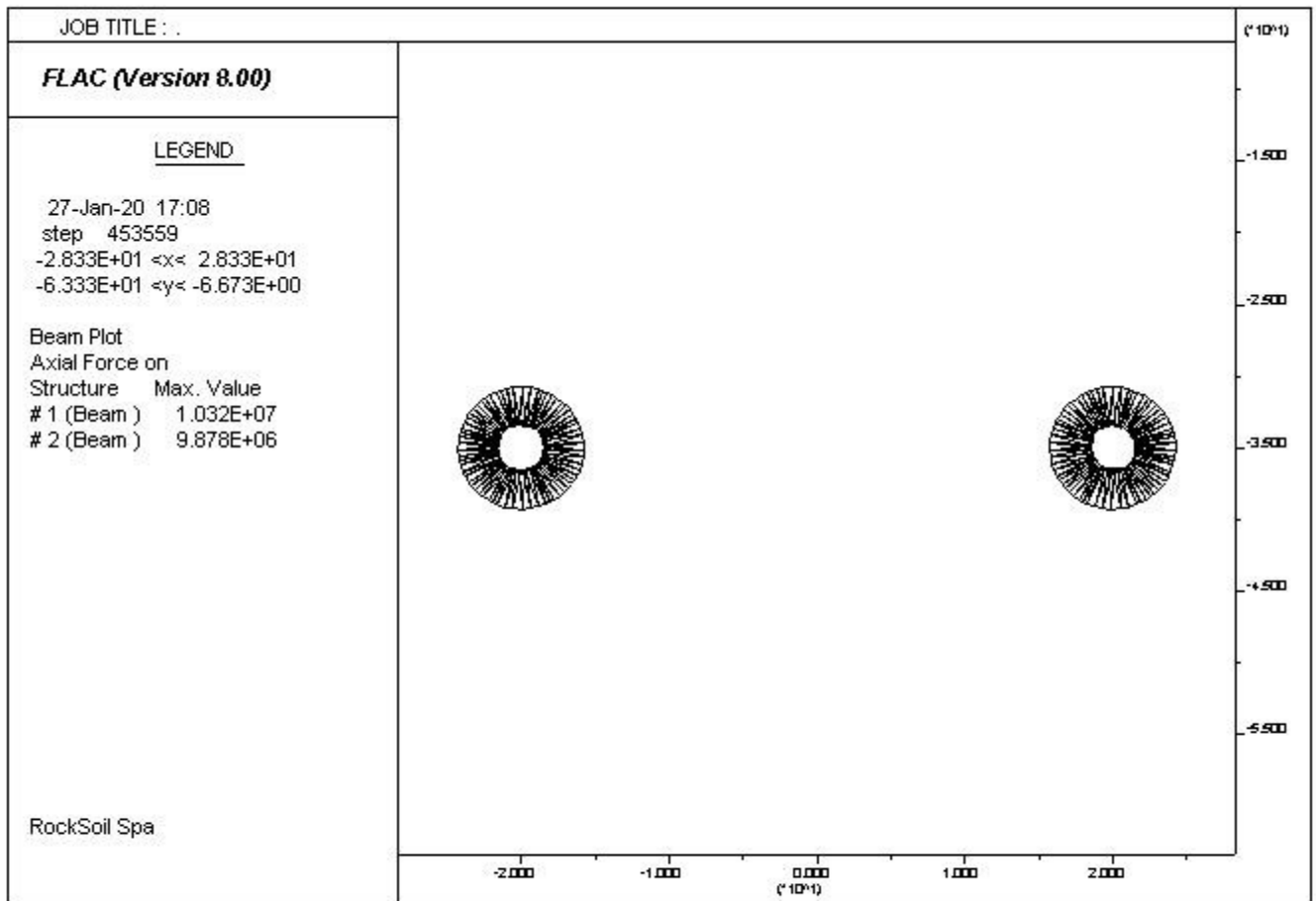


Figura 44 – Sollecitazioni N

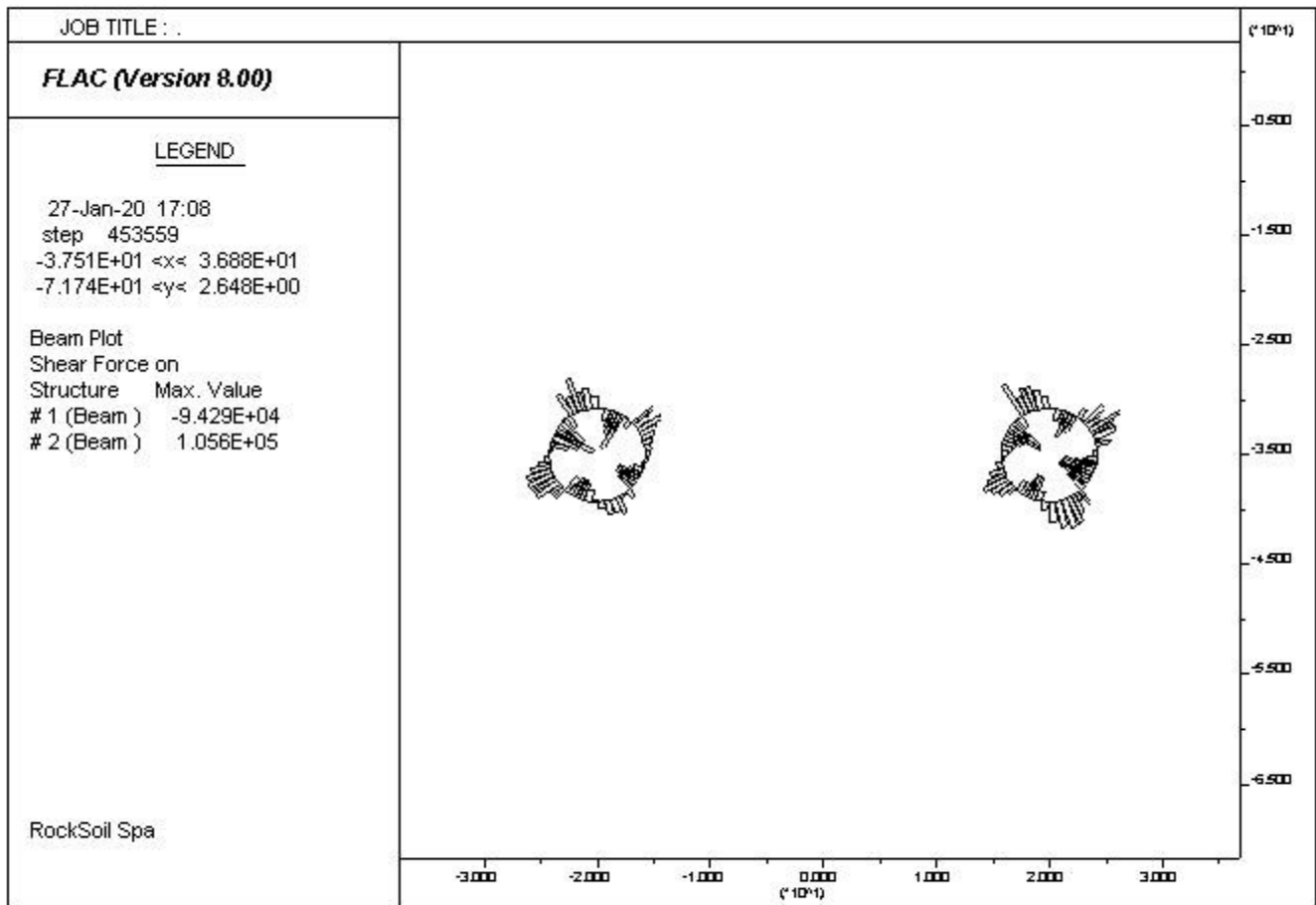


Figura 45 – Sollecitazioni T

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|---------|--------|--------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 128 | 2 | 128 | 65 | 1 | beam | 1204 | 9675000 | -47240 | 47900 | -0.0005092 |
| 127 | 2 | 127 | 128 | 1 | beam | 31750 | 9620000 | -30550 | 47380 | -0.0005063 |
| 126 | 2 | 126 | 127 | 1 | beam | 46900 | 9586000 | -14540 | 30560 | -0.0005045 |
| 125 | 2 | 125 | 126 | 1 | beam | 58890 | 9546000 | 5678 | 14440 | -0.0005024 |
| 124 | 2 | 124 | 125 | 1 | beam | 54450 | 9462000 | 26260 | -5699 | -0.000498 |
| 123 | 2 | 123 | 124 | 1 | beam | 96490 | 9357000 | 62700 | -26270 | -0.0004925 |
| 122 | 2 | 122 | 123 | 1 | beam | -2650 | 9360000 | 61530 | -62720 | -0.0004927 |
| 121 | 2 | 121 | 122 | 1 | beam | 18290 | 9387000 | 68130 | -61580 | -0.0004941 |
| 120 | 2 | 120 | 121 | 1 | beam | -64870 | 9418000 | 44950 | -68190 | -0.0004957 |
| 119 | 2 | 119 | 120 | 1 | beam | -43220 | 9478000 | 28320 | -45110 | -0.0004988 |
| 118 | 2 | 118 | 119 | 1 | beam | -65710 | 9583000 | 5384 | -28440 | -0.0005043 |
| 117 | 2 | 117 | 118 | 1 | beam | -44560 | 9633000 | -10050 | -5581 | -0.000507 |
| 116 | 2 | 116 | 117 | 1 | beam | -35090 | 9671000 | -25740 | 9928 | -0.000509 |
| 115 | 2 | 115 | 116 | 1 | beam | -24460 | 9741000 | -37420 | 25540 | -0.0005127 |
| 114 | 2 | 114 | 115 | 1 | beam | -15850 | 9816000 | -45410 | 37320 | -0.0005167 |
| 113 | 2 | 113 | 114 | 1 | beam | -9409 | 9851000 | -50250 | 45340 | -0.0005184 |
| 112 | 2 | 112 | 113 | 1 | beam | -6370 | 9878000 | -53230 | 49930 | -0.0005199 |
| 111 | 2 | 111 | 112 | 1 | beam | 5232 | 9859000 | -50500 | 53110 | -0.0005189 |
| 110 | 2 | 110 | 111 | 1 | beam | 24370 | 9842000 | -39030 | 50480 | -0.000518 |
| 109 | 2 | 109 | 110 | 1 | beam | 35410 | 9794000 | -26510 | 39040 | -0.0005155 |
| 108 | 2 | 108 | 109 | 1 | beam | 58390 | 9790000 | -5937 | 26590 | -0.0005153 |
| 107 | 2 | 107 | 108 | 1 | beam | 57680 | 9759000 | 18030 | 6022 | -0.0005136 |
| 106 | 2 | 106 | 107 | 1 | beam | 43650 | 9702000 | 34290 | -18060 | -0.0005106 |
| 105 | 2 | 105 | 106 | 1 | beam | 46160 | 9654000 | 51470 | -34310 | -0.0005081 |
| 104 | 2 | 104 | 105 | 1 | beam | -22800 | 9632000 | 42720 | -51290 | -0.000507 |
| 103 | 2 | 103 | 104 | 1 | beam | -5525 | 9685000 | 40570 | -42640 | -0.0005097 |
| 102 | 2 | 102 | 103 | 1 | beam | -7218 | 9687000 | 38010 | -40590 | -0.0005098 |
| 101 | 2 | 101 | 102 | 1 | beam | -44250 | 9697000 | 22200 | -38030 | -0.0005103 |
| 100 | 2 | 100 | 101 | 1 | beam | -35660 | 9739000 | 3599 | -22170 | -0.0005126 |
| 99 | 2 | 99 | 100 | 1 | beam | -36610 | 9838000 | -16980 | -3551 | -0.0005178 |
| 98 | 2 | 98 | 99 | 1 | beam | -16060 | 9849000 | -26330 | 16950 | -0.0005184 |
| 97 | 2 | 97 | 98 | 1 | beam | 4184 | 9864000 | -23830 | 26280 | -0.0005192 |
| 96 | 2 | 96 | 97 | 1 | beam | 26980 | 9813000 | -8550 | 23850 | -0.0005165 |
| 95 | 2 | 95 | 96 | 1 | beam | 45980 | 9764000 | 15760 | 8604 | -0.0005139 |
| 94 | 2 | 94 | 95 | 1 | beam | 50240 | 9684000 | 33860 | -15770 | -0.0005097 |
| 93 | 2 | 93 | 94 | 1 | beam | 50980 | 9652000 | 52140 | -33790 | -0.000508 |
| 92 | 2 | 92 | 93 | 1 | beam | 25300 | 9584000 | 61700 | -52050 | -0.0005044 |
| 91 | 2 | 91 | 92 | 1 | beam | 42380 | 9560000 | 77830 | -61670 | -0.0005031 |
| 90 | 2 | 90 | 91 | 1 | beam | -30950 | 9565000 | 66010 | -77760 | -0.0005034 |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1 | beam | -30130 | 9566000 | 54510 | -65960 | -0.0005035 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1 | beam | -62600 | 9619000 | 32170 | -54430 | -0.0005063 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1 | beam | -64490 | 9641000 | 9298 | -32220 | -0.0005074 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1 | beam | -69720 | 9667000 | -21540 | -9123 | -0.0005088 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1 | beam | -65140 | 9712000 | -52910 | 21620 | -0.0005112 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1 | beam | -50260 | 9740000 | -67910 | 52930 | -0.0005126 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1 | beam | -26200 | 9741000 | -75730 | 67920 | -0.0005127 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1 | beam | -14010 | 9720000 | -82070 | 75530 | -0.0005116 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|---------|--------|---------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1 | beam | -1105 | 9767000 | -82660 | 82140 | -0.0005141 |
| 80 | 2 | 80 | 81 | 1 | beam | 6101 | 9700000 | -79880 | 82690 | -0.0005106 |
| 79 | 2 | 79 | 80 | 1 | beam | 44550 | 9716000 | -66300 | 79950 | -0.0005114 |
| 78 | 2 | 78 | 79 | 1 | beam | 17080 | 9695000 | -61000 | 66230 | -0.0005103 |
| 77 | 2 | 77 | 78 | 1 | beam | 72170 | 9739000 | -27820 | 61000 | -0.0005126 |
| 76 | 2 | 76 | 77 | 1 | beam | 72910 | 9572000 | -1315 | 27610 | -0.0005038 |
| 75 | 2 | 75 | 76 | 1 | beam | 105600 | 9548000 | 36980 | 1115 | -0.0005025 |
| 74 | 2 | 74 | 75 | 1 | beam | 39010 | 9500000 | 52300 | -37020 | -0.0005 |
| 73 | 2 | 73 | 74 | 1 | beam | 72080 | 9487000 | 78420 | -52080 | -0.0004993 |
| 72 | 2 | 72 | 73 | 1 | beam | -3016 | 9453000 | 77250 | -78350 | -0.0004975 |
| 71 | 2 | 71 | 72 | 1 | beam | 33070 | 9424000 | 89090 | -77120 | -0.000496 |
| 70 | 2 | 70 | 71 | 1 | beam | -61710 | 9410000 | 66890 | -89220 | -0.0004953 |
| 69 | 2 | 69 | 70 | 1 | beam | -44650 | 9431000 | 44120 | -66440 | -0.0004964 |
| 68 | 2 | 68 | 69 | 1 | beam | -86960 | 9564000 | 14210 | -43870 | -0.0005033 |
| 67 | 2 | 67 | 68 | 1 | beam | -48210 | 9595000 | -2402 | -14050 | -0.000505 |
| 66 | 2 | 66 | 67 | 1 | beam | -54250 | 9639000 | -31460 | 2423 | -0.0005073 |
| 65 | 2 | 65 | 66 | 1 | beam | -29470 | 9655000 | -47840 | 31590 | -0.0005082 |
| 64 | 1 | 64 | 1 | 1 | beam | -2080 | 9772000 | -34780 | 33630 | -0.0005143 |
| 63 | 1 | 63 | 64 | 1 | beam | 28930 | 9784000 | -19300 | 34790 | -0.0005149 |
| 62 | 1 | 62 | 63 | 1 | beam | 31410 | 9788000 | -8589 | 19300 | -0.0005152 |
| 61 | 1 | 61 | 62 | 1 | beam | 69410 | 9777000 | 15100 | 8577 | -0.0005146 |
| 60 | 1 | 60 | 61 | 1 | beam | 37790 | 9675000 | 34190 | -15300 | -0.0005092 |
| 59 | 1 | 59 | 60 | 1 | beam | 45550 | 9658000 | 50710 | -34220 | -0.0005083 |
| 58 | 1 | 58 | 59 | 1 | beam | -28290 | 9682000 | 40500 | -50740 | -0.0005096 |
| 57 | 1 | 57 | 58 | 1 | beam | -5577 | 9719000 | 38630 | -40670 | -0.0005115 |
| 56 | 1 | 56 | 57 | 1 | beam | -62100 | 9754000 | 16060 | -38750 | -0.0005134 |
| 55 | 1 | 55 | 56 | 1 | beam | -38690 | 9756000 | 1035 | -16190 | -0.0005135 |
| 54 | 1 | 54 | 55 | 1 | beam | -88930 | 9795000 | -31080 | -997.3 | -0.0005155 |
| 53 | 1 | 53 | 54 | 1 | beam | -63890 | 9812000 | -54300 | 31260 | -0.0005164 |
| 52 | 1 | 52 | 53 | 1 | beam | -59160 | 9953000 | -81590 | 54390 | -0.0005238 |
| 51 | 1 | 51 | 52 | 1 | beam | -9262 | 9895000 | -84420 | 81580 | -0.0005208 |
| 50 | 1 | 50 | 51 | 1 | beam | -37270 | 9902000 | -95810 | 84390 | -0.0005212 |
| 49 | 1 | 49 | 50 | 1 | beam | 741.7 | 9875000 | -95450 | 95800 | -0.0005198 |
| 48 | 1 | 48 | 49 | 1 | beam | 11360 | 9913000 | -90130 | 95470 | -0.0005217 |
| 47 | 1 | 47 | 48 | 1 | beam | 25760 | 9842000 | -78120 | 90150 | -0.000518 |
| 46 | 1 | 46 | 47 | 1 | beam | 38310 | 9841000 | -66720 | 78140 | -0.0005179 |
| 45 | 1 | 45 | 46 | 1 | beam | 57940 | 9826000 | -49400 | 66670 | -0.0005171 |
| 44 | 1 | 44 | 45 | 1 | beam | 82960 | 9772000 | -9470 | 49330 | -0.0005143 |
| 43 | 1 | 43 | 44 | 1 | beam | 86300 | 9690000 | 28480 | 9477 | -0.00051 |
| 42 | 1 | 42 | 43 | 1 | beam | 87630 | 9652000 | 59570 | -28420 | -0.000508 |
| 41 | 1 | 41 | 42 | 1 | beam | 85740 | 9611000 | 89920 | -59440 | -0.0005059 |
| 40 | 1 | 40 | 41 | 1 | beam | 48650 | 9537000 | 108300 | -89840 | -0.0005019 |
| 39 | 1 | 39 | 40 | 1 | beam | 54870 | 9514000 | 129100 | -108200 | -0.0005007 |
| 38 | 1 | 38 | 39 | 1 | beam | -40870 | 9502000 | 113500 | -129100 | -0.0005001 |
| 37 | 1 | 37 | 38 | 1 | beam | -22030 | 9547000 | 105100 | -113500 | -0.0005025 |
| 36 | 1 | 36 | 37 | 1 | beam | -52000 | 9618000 | 86340 | -105100 | -0.0005062 |
| 35 | 1 | 35 | 36 | 1 | beam | -74360 | 9664000 | 59460 | -86230 | -0.0005086 |
| 34 | 1 | 34 | 35 | 1 | beam | -75530 | 9762000 | 19360 | -59380 | -0.0005138 |
| 33 | 1 | 33 | 34 | 1 | beam | -68870 | 9897000 | -19650 | -19390 | -0.0005209 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|----------|--------|---------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 32 | 1 | 32 | 33 | 1 | beam | -51810 | 10030000 | -50080 | 19700 | -0.0005277 |
| 31 | 1 | 31 | 32 | 1 | beam | -22650 | 10140000 | -63190 | 49960 | -0.0005335 |
| 30 | 1 | 30 | 31 | 1 | beam | 25390 | 10190000 | -48950 | 63190 | -0.0005363 |
| 29 | 1 | 29 | 30 | 1 | beam | 57670 | 10210000 | -18960 | 49000 | -0.0005372 |
| 28 | 1 | 28 | 29 | 1 | beam | 61250 | 10180000 | 3024 | 18880 | -0.0005358 |
| 27 | 1 | 27 | 28 | 1 | beam | 44510 | 10190000 | 18950 | -3032 | -0.0005364 |
| 26 | 1 | 26 | 27 | 1 | beam | 33290 | 10180000 | 31540 | -19030 | -0.000536 |
| 25 | 1 | 25 | 26 | 1 | beam | 28950 | 10160000 | 42380 | -31500 | -0.0005346 |
| 24 | 1 | 24 | 25 | 1 | beam | -22200 | 10180000 | 34300 | -42550 | -0.0005357 |
| 23 | 1 | 23 | 24 | 1 | beam | -38730 | 10220000 | 20140 | -34530 | -0.0005379 |
| 22 | 1 | 22 | 23 | 1 | beam | -53370 | 10250000 | -1965 | -20290 | -0.0005397 |
| 21 | 1 | 21 | 22 | 1 | beam | -65520 | 10280000 | -25340 | 2154 | -0.0005408 |
| 20 | 1 | 20 | 21 | 1 | beam | -49810 | 10280000 | -43200 | 25580 | -0.000541 |
| 19 | 1 | 19 | 20 | 1 | beam | -36770 | 10320000 | -60570 | 43300 | -0.0005431 |
| 18 | 1 | 18 | 19 | 1 | beam | -13920 | 10310000 | -67600 | 60630 | -0.0005427 |
| 17 | 1 | 17 | 18 | 1 | beam | 3906 | 10310000 | -65560 | 67590 | -0.0005425 |
| 16 | 1 | 16 | 17 | 1 | beam | 13630 | 10240000 | -58500 | 65620 | -0.0005389 |
| 15 | 1 | 15 | 16 | 1 | beam | 23810 | 10180000 | -46280 | 58430 | -0.0005356 |
| 14 | 1 | 14 | 15 | 1 | beam | 32040 | 10050000 | -30890 | 46450 | -0.000529 |
| 13 | 1 | 13 | 14 | 1 | beam | 44760 | 9956000 | -10830 | 30990 | -0.000524 |
| 12 | 1 | 12 | 13 | 1 | beam | 53030 | 9890000 | 7736 | 10870 | -0.0005205 |
| 11 | 1 | 11 | 12 | 1 | beam | 92000 | 9815000 | 40030 | -7750 | -0.0005166 |
| 10 | 1 | 10 | 11 | 1 | beam | 57760 | 9662000 | 62350 | -39910 | -0.0005085 |
| 9 | 1 | 9 | 10 | 1 | beam | 90870 | 9580000 | 94690 | -62130 | -0.0005042 |
| 8 | 1 | 8 | 9 | 1 | beam | -2496 | 9520000 | 93700 | -94600 | -0.000501 |
| 7 | 1 | 7 | 8 | 1 | beam | 29120 | 9456000 | 106700 | -93660 | -0.0004977 |
| 6 | 1 | 6 | 7 | 1 | beam | -94290 | 9422000 | 71130 | -106700 | -0.0004959 |
| 5 | 1 | 5 | 6 | 1 | beam | -47920 | 9498000 | 53060 | -71150 | -0.0004999 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 1 | beam | -65530 | 9579000 | 30800 | -53190 | -0.0005042 |
| 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | beam | -61960 | 9613000 | 9592 | -30760 | -0.0005059 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | beam | -50560 | 9669000 | -17130 | -9668 | -0.0005089 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | beam | -30210 | 9733000 | -33650 | 17040 | -0.0005123 |

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.5 m - Analisi n°18

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|----------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Ipotesi di drenaggio totale della falda al contorno del cavo – parateri drenati | 1.0 |

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

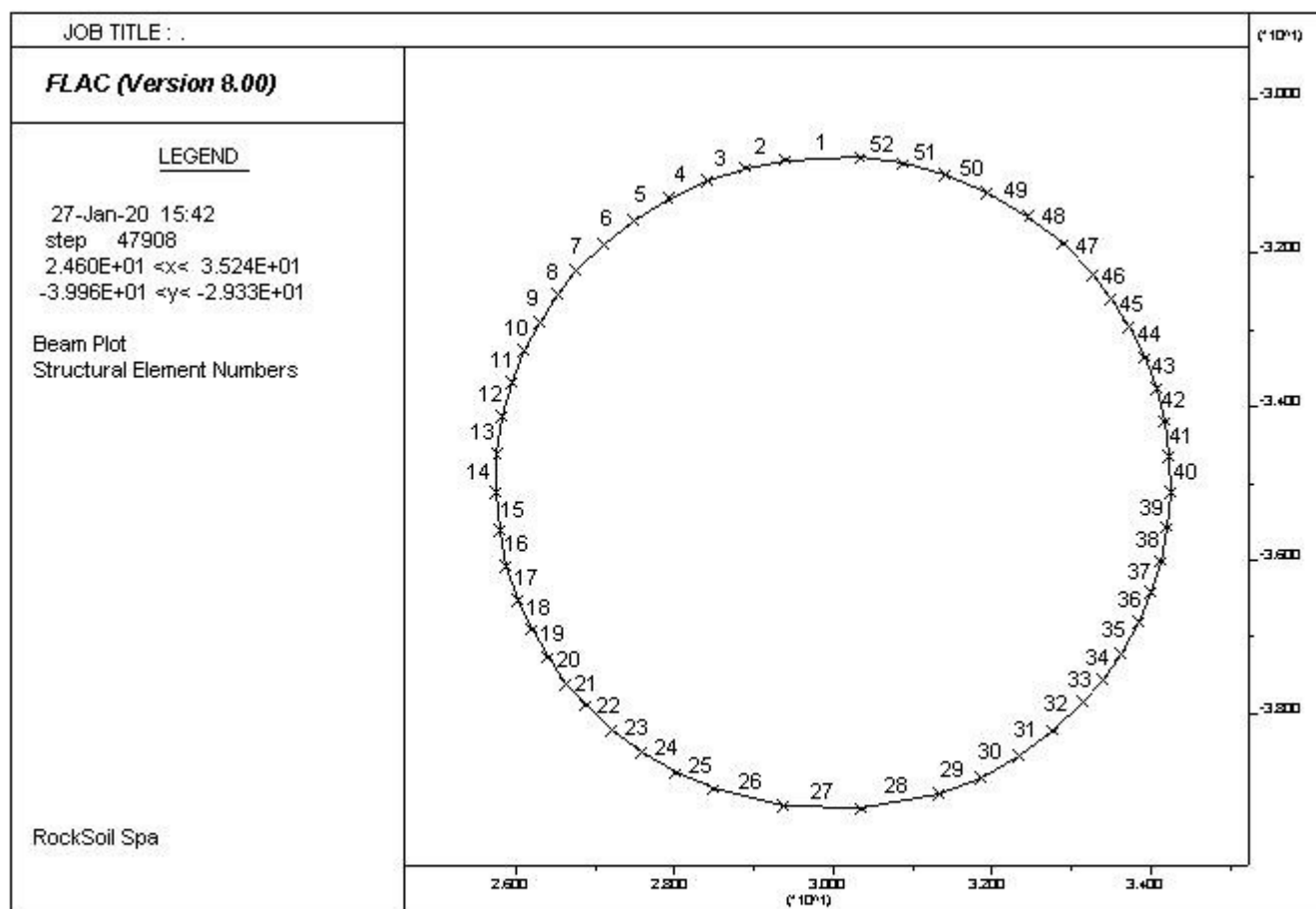


Figura 46 - Numerazione elementi beam canna Destra

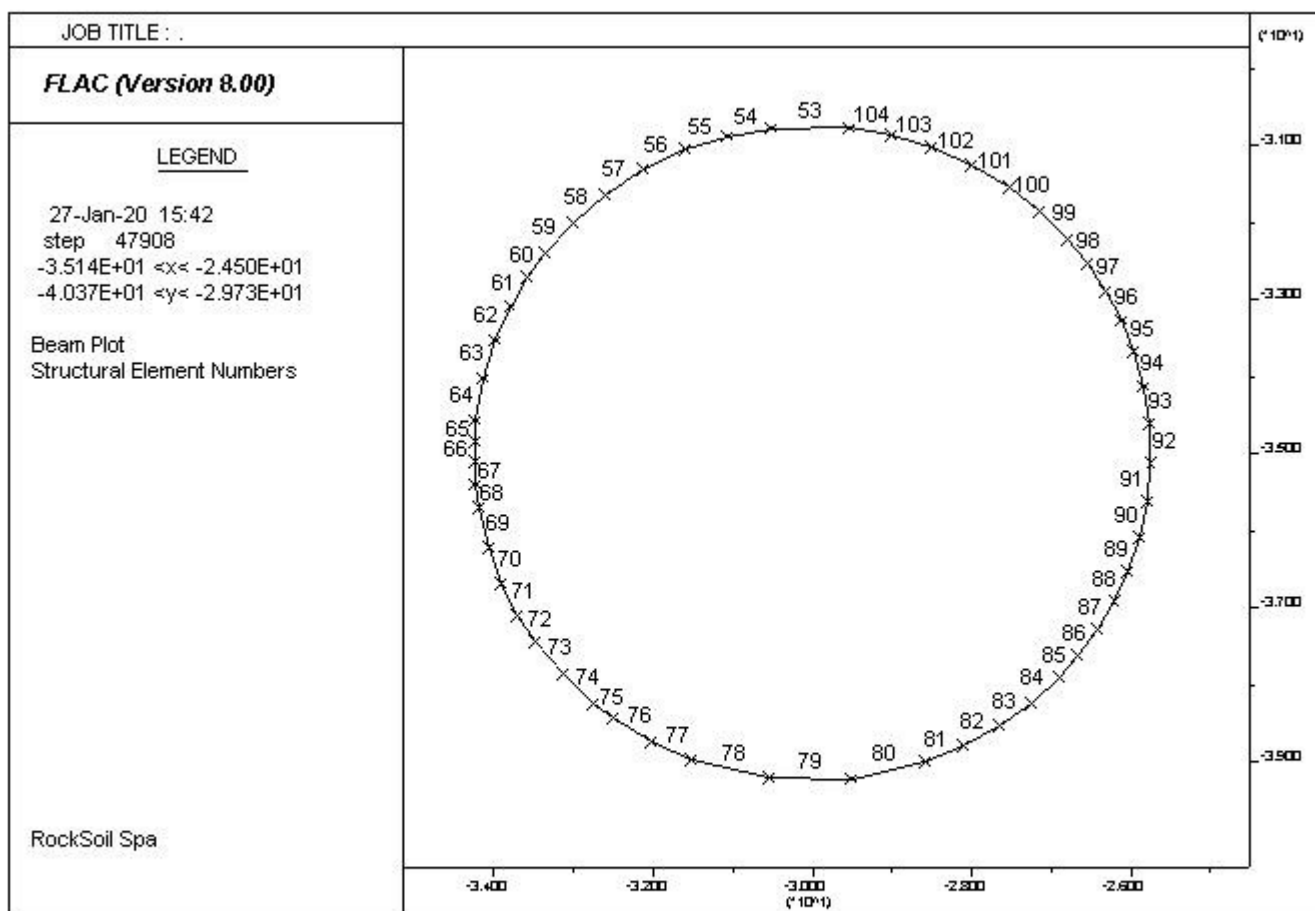


Figura 47 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

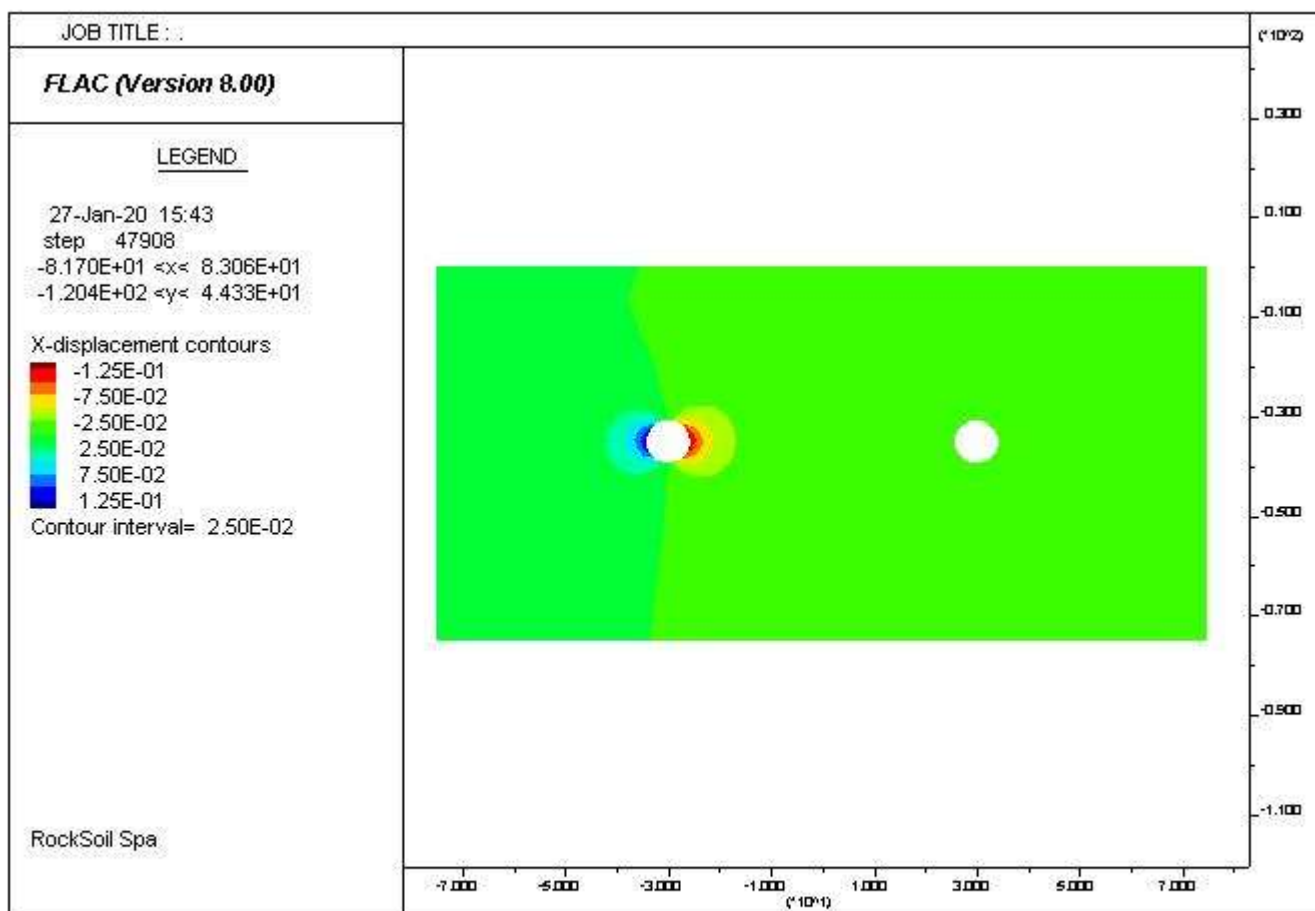


Figura 48 - Spostamenti x

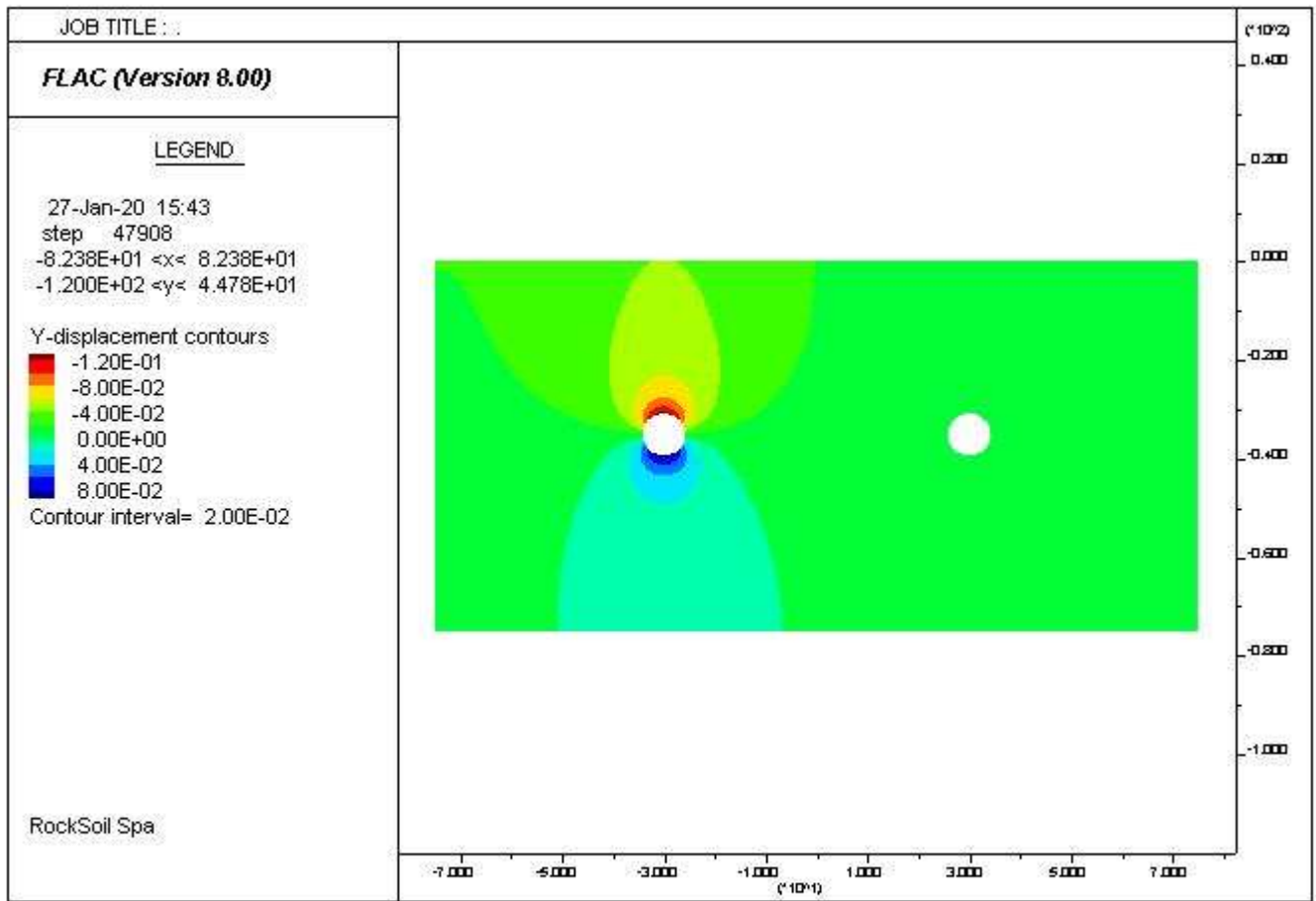


Figura 49 - Spostamenti y

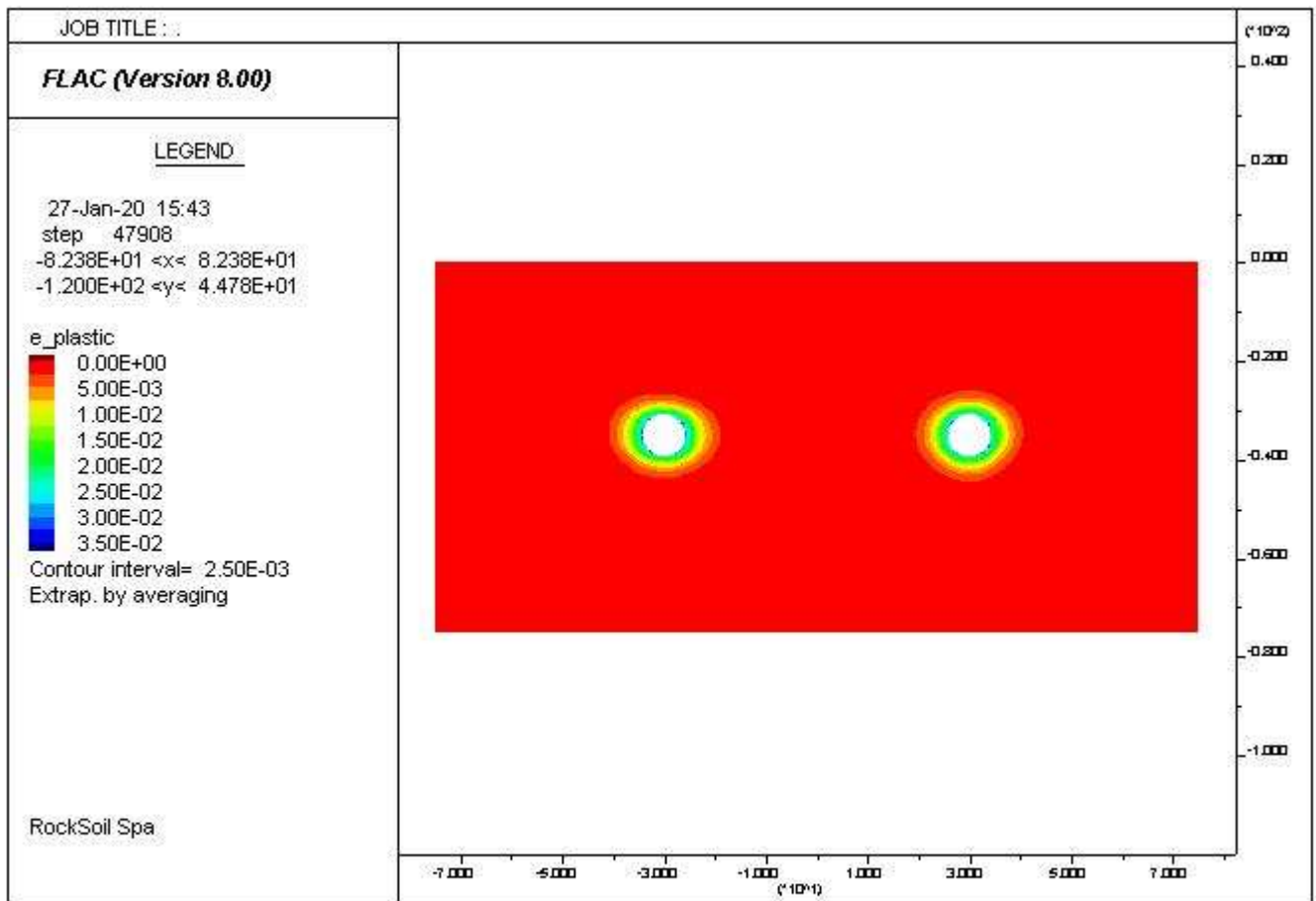


Figura 50 – Plasticizzazioni

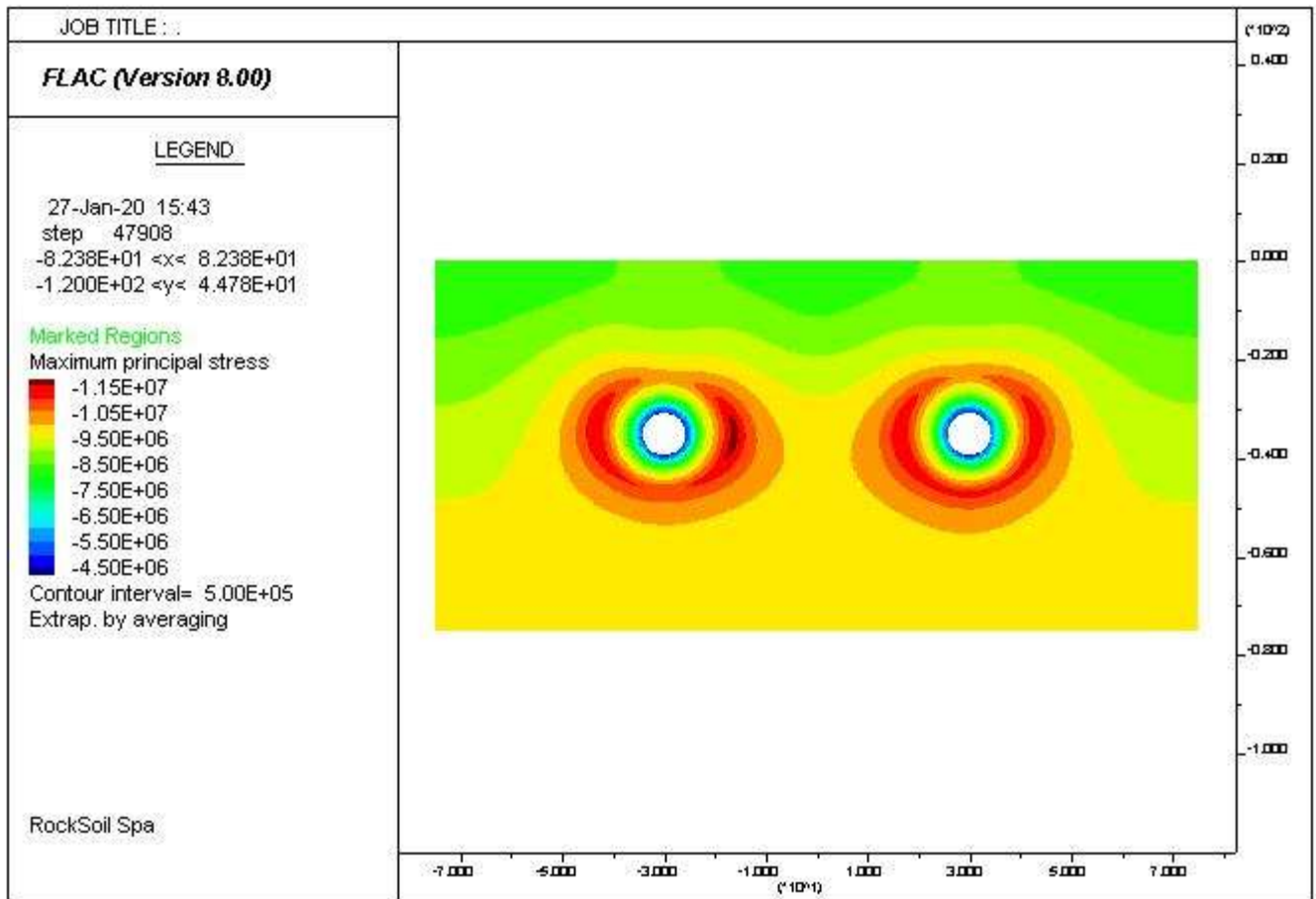


Figura 51 – Tensioni principali totali sigma1

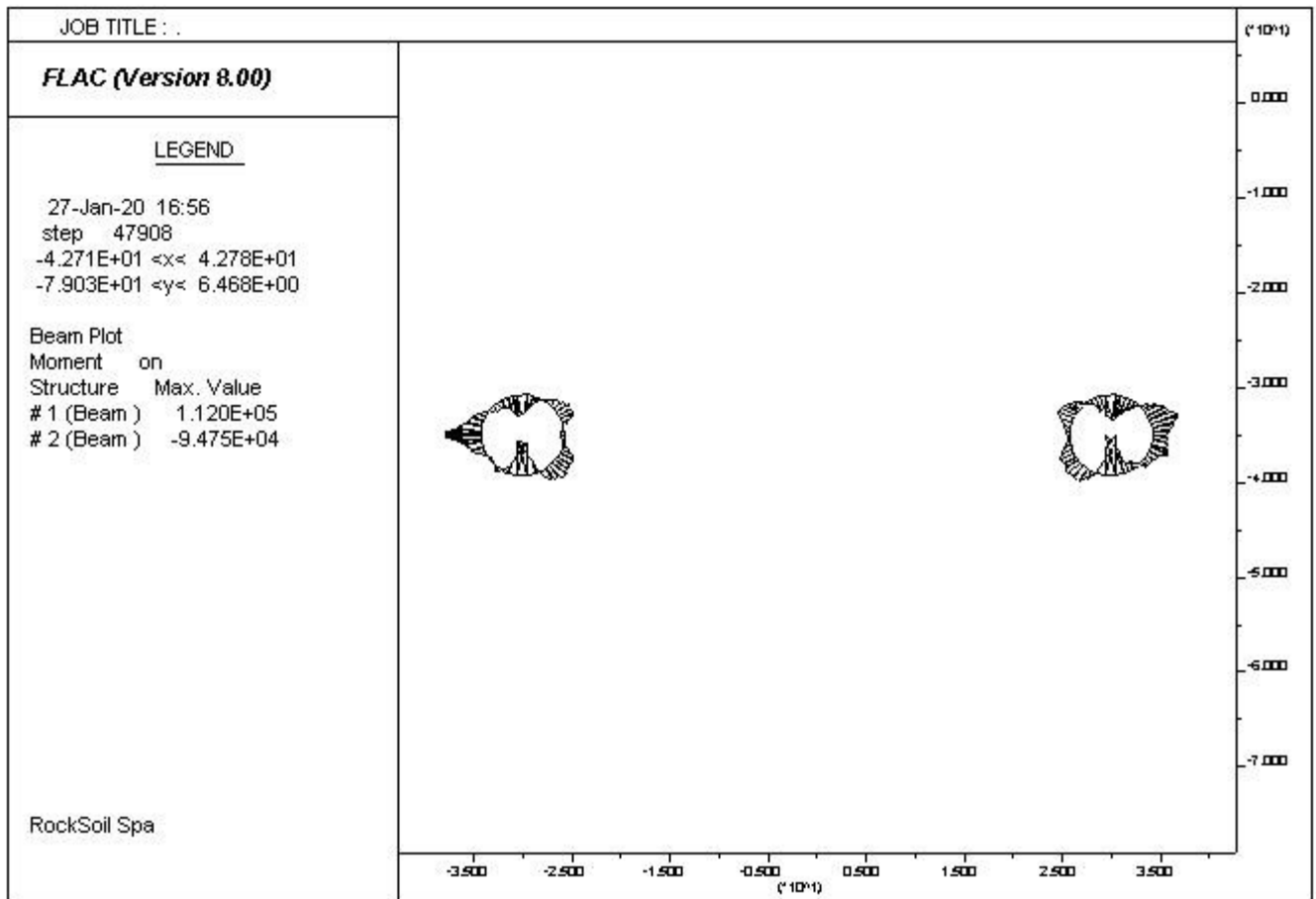


Figura 52 – Sollecitazioni M

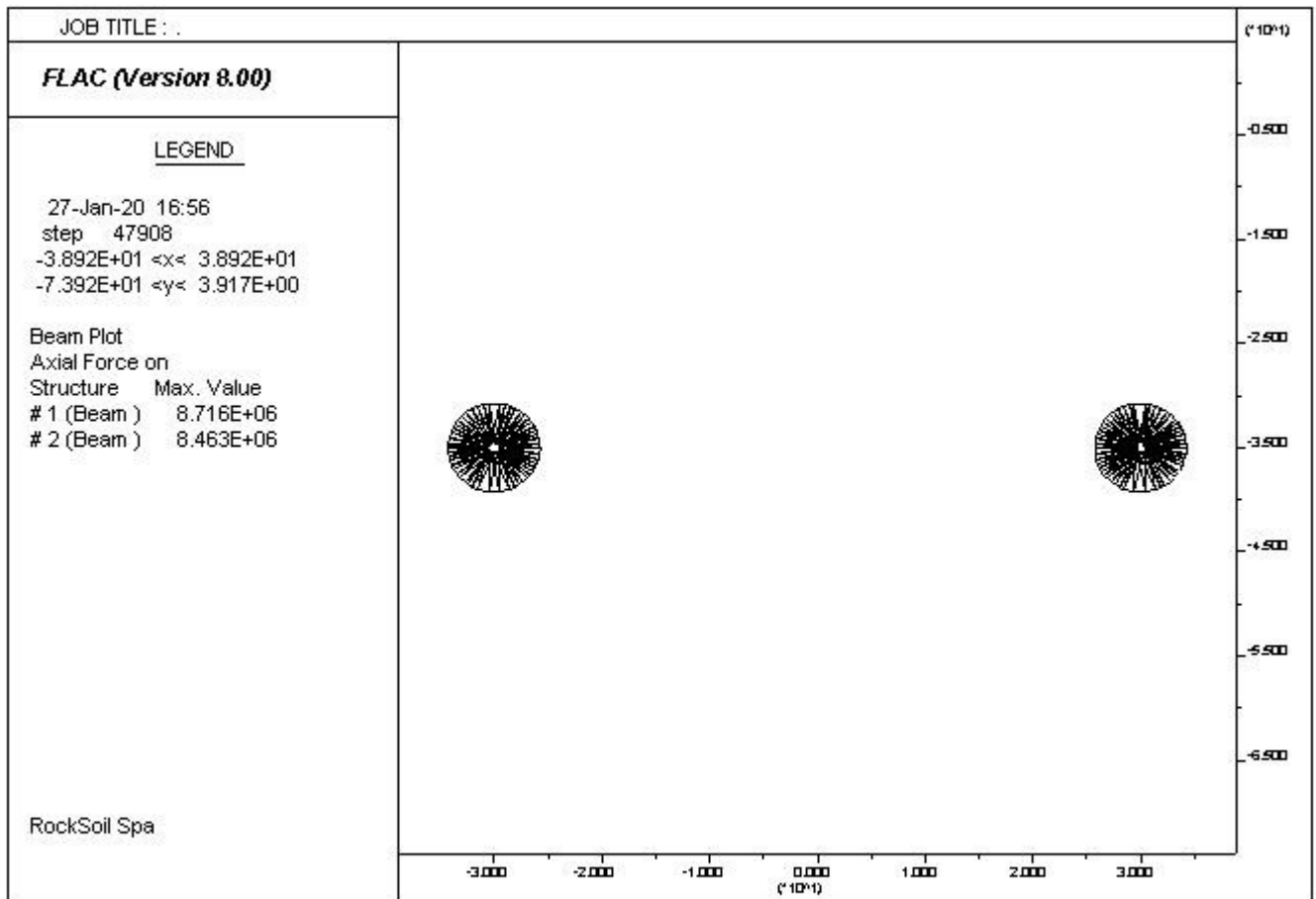


Figura 53 – Sollecitazioni N

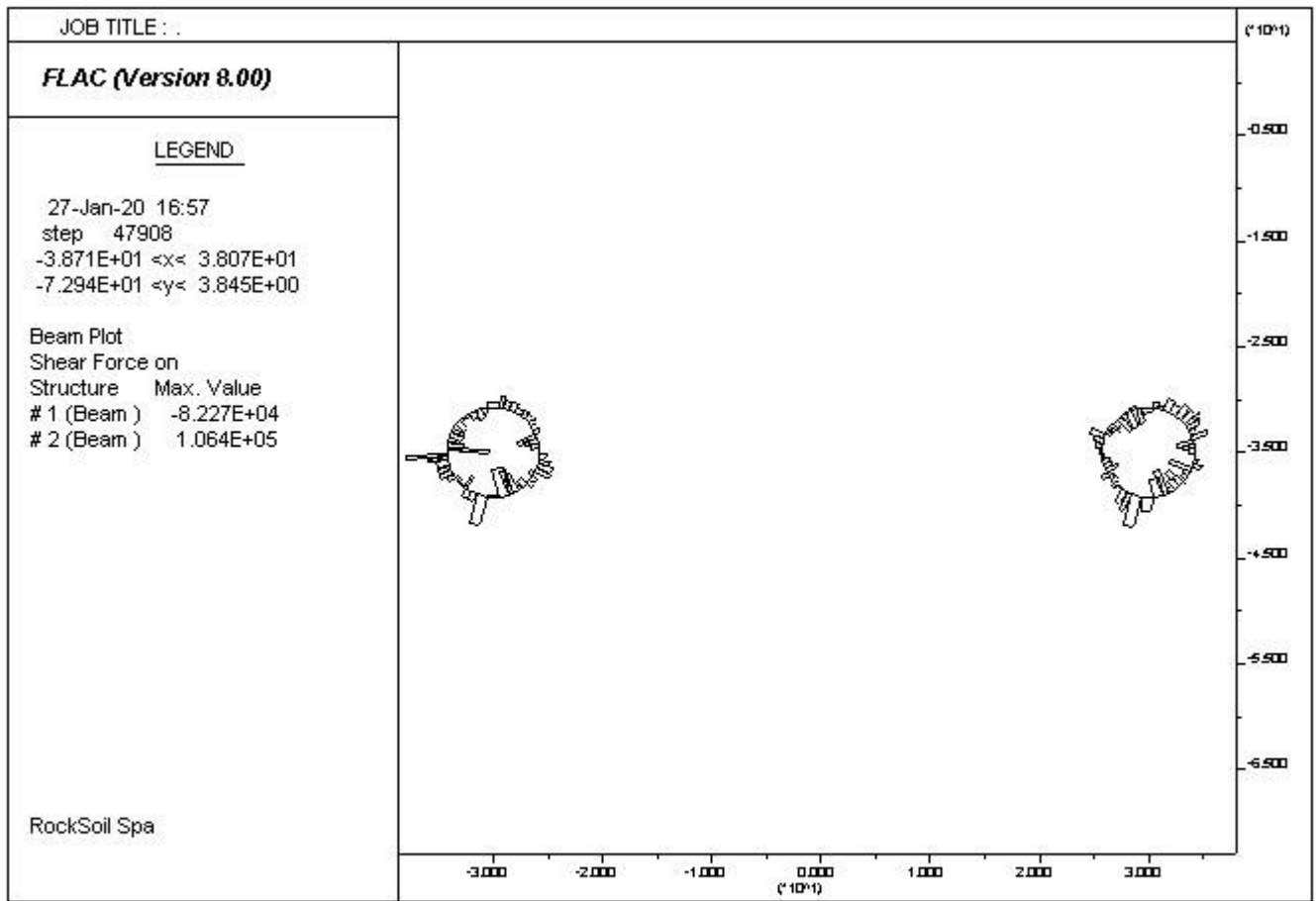


Figura 54 – Sollecitazioni T

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|---------|--------|--------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 104 | 2 | 104 | 53 | 1 | beam | -30780 | 8426000 | 27950 | -44310 | -0.0004435 |
| 103 | 2 | 103 | 104 | 1 | beam | -21100 | 8396000 | 16210 | -27420 | -0.0004419 |
| 102 | 2 | 102 | 103 | 1 | beam | -25580 | 8404000 | 1621 | -15700 | -0.0004423 |
| 101 | 2 | 101 | 102 | 1 | beam | -14260 | 8351000 | -6218 | -1631 | -0.0004395 |
| 100 | 2 | 100 | 101 | 1 | beam | -21940 | 8354000 | -17350 | 6244 | -0.0004397 |
| 99 | 2 | 99 | 100 | 1 | beam | -16260 | 8303000 | -25830 | 17590 | -0.000437 |
| 98 | 2 | 98 | 99 | 1 | beam | -19030 | 8365000 | -33640 | 26160 | -0.0004403 |
| 97 | 2 | 97 | 98 | 1 | beam | 420 | 8329000 | -34430 | 34610 | -0.0004384 |
| 96 | 2 | 96 | 97 | 1 | beam | -12650 | 8306000 | -39850 | 34430 | -0.0004372 |
| 95 | 2 | 95 | 96 | 1 | beam | 50320 | 8219000 | -18240 | 40270 | -0.0004326 |
| 94 | 2 | 94 | 95 | 1 | beam | 36770 | 8245000 | -2016 | 19270 | -0.000434 |
| 93 | 2 | 93 | 94 | 1 | beam | 22980 | 8264000 | 9698 | 1606 | -0.000435 |
| 92 | 2 | 92 | 93 | 1 | beam | 1305 | 8270000 | 10930 | -10270 | -0.0004353 |
| 91 | 2 | 91 | 92 | 1 | beam | -16140 | 8266000 | 3473 | -11530 | -0.000435 |
| 90 | 2 | 90 | 91 | 1 | beam | -29990 | 8257000 | -10590 | -3878 | -0.0004346 |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1 | beam | -37140 | 8235000 | -26900 | 9990 | -0.0004334 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1 | beam | -40620 | 8206000 | -43560 | 26240 | -0.0004319 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1 | beam | 12680 | 8258000 | -37400 | 42800 | -0.0004346 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1 | beam | -15340 | 8268000 | -43590 | 37090 | -0.0004352 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1 | beam | -14680 | 8295000 | -49020 | 43640 | -0.0004366 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1 | beam | 19740 | 8315000 | -39940 | 49610 | -0.0004376 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1 | beam | 6760 | 8310000 | -37180 | 40490 | -0.0004374 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1 | beam | 49220 | 8353000 | -11610 | 37380 | -0.0004396 |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1 | beam | 63050 | 8341000 | 21250 | 11770 | -0.000439 |
| 80 | 2 | 80 | 81 | 1 | beam | 72730 | 8339000 | 90090 | -20950 | -0.0004389 |
| 79 | 2 | 79 | 80 | 1 | beam | 1658 | 8398000 | 91520 | -89810 | -0.000442 |
| 78 | 2 | 78 | 79 | 1 | beam | -78170 | 8308000 | 13210 | -91470 | -0.0004373 |
| 77 | 2 | 77 | 78 | 1 | beam | -20310 | 8259000 | 2161 | -13650 | -0.0004347 |
| 76 | 2 | 76 | 77 | 1 | beam | -21420 | 8276000 | -10030 | -2087 | -0.0004356 |
| 75 | 2 | 75 | 76 | 1 | beam | 33790 | 8167000 | -152.2 | 10510 | -0.0004298 |
| 74 | 2 | 74 | 75 | 1 | beam | 3225 | 8149000 | 1584 | 184 | -0.0004289 |
| 73 | 2 | 73 | 74 | 1 | beam | 10040 | 8089000 | 6377 | -870.5 | -0.0004257 |
| 72 | 2 | 72 | 73 | 1 | beam | -16260 | 8146000 | -1272 | -5318 | -0.0004287 |
| 71 | 2 | 71 | 72 | 1 | beam | -30010 | 8186000 | -15610 | 1977 | -0.0004308 |
| 70 | 2 | 70 | 71 | 1 | beam | -31280 | 8195000 | -31190 | 15540 | -0.0004313 |
| 69 | 2 | 69 | 70 | 1 | beam | -29680 | 8170000 | -46760 | 30800 | -0.00043 |
| 68 | 2 | 68 | 69 | 1 | beam | -48800 | 8083000 | -62520 | 48050 | -0.0004254 |
| 67 | 2 | 67 | 68 | 1 | beam | -102700 | 8078000 | -93500 | 63040 | -0.0004252 |
| 66 | 2 | 66 | 67 | 1 | beam | 235.9 | 8059000 | -94680 | 94750 | -0.0004241 |
| 65 | 2 | 65 | 66 | 1 | beam | 106400 | 8134000 | -66080 | 94520 | -0.0004281 |
| 64 | 2 | 64 | 65 | 1 | beam | 41760 | 8165000 | -43470 | 66480 | -0.0004297 |
| 63 | 2 | 63 | 64 | 1 | beam | 21080 | 8282000 | -32300 | 43250 | -0.0004359 |
| 62 | 2 | 62 | 63 | 1 | beam | 30470 | 8316000 | -17120 | 31650 | -0.0004377 |
| 61 | 2 | 61 | 62 | 1 | beam | 26690 | 8313000 | -5711 | 17150 | -0.0004375 |
| 60 | 2 | 60 | 61 | 1 | beam | 11640 | 8310000 | 902.6 | 3519 | -0.0004373 |
| 59 | 2 | 59 | 60 | 1 | beam | 25540 | 8358000 | 15880 | -2203 | -0.0004399 |
| 58 | 2 | 58 | 59 | 1 | beam | 4704 | 8374000 | 18590 | -16070 | -0.0004408 |
| 57 | 2 | 57 | 58 | 1 | beam | 6583 | 8417000 | 22530 | -18640 | -0.000443 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|---------|--------|---------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 56 | 2 | 56 | 57 | 1 | beam | 17810 | 8458000 | 33750 | -23200 | -0.0004451 |
| 55 | 2 | 55 | 56 | 1 | beam | 27590 | 8463000 | 49990 | -34530 | -0.0004454 |
| 54 | 2 | 54 | 55 | 1 | beam | 13190 | 8457000 | 57300 | -49920 | -0.0004451 |
| 53 | 2 | 53 | 54 | 1 | beam | -12890 | 8397000 | 44940 | -57460 | -0.0004419 |
| 52 | 1 | 52 | 1 | 1 | beam | -14230 | 8262000 | 60600 | -68340 | -0.0004349 |
| 51 | 1 | 51 | 52 | 1 | beam | -8606 | 8291000 | 55830 | -60510 | -0.0004363 |
| 50 | 1 | 50 | 51 | 1 | beam | -31580 | 8374000 | 37380 | -56100 | -0.0004407 |
| 49 | 1 | 49 | 50 | 1 | beam | -25290 | 8365000 | 22390 | -37380 | -0.0004402 |
| 48 | 1 | 48 | 49 | 1 | beam | -38230 | 8442000 | 1052 | -22180 | -0.0004443 |
| 47 | 1 | 47 | 48 | 1 | beam | -34800 | 8406000 | -18230 | -1001 | -0.0004424 |
| 46 | 1 | 46 | 47 | 1 | beam | -47450 | 8494000 | -36730 | 18260 | -0.000447 |
| 45 | 1 | 45 | 46 | 1 | beam | -36490 | 8565000 | -53230 | 36990 | -0.0004508 |
| 44 | 1 | 44 | 45 | 1 | beam | -13030 | 8501000 | -59020 | 53380 | -0.0004474 |
| 43 | 1 | 43 | 44 | 1 | beam | -43250 | 8492000 | -77710 | 58990 | -0.000447 |
| 42 | 1 | 42 | 43 | 1 | beam | 42510 | 8395000 | -58970 | 77630 | -0.0004418 |
| 41 | 1 | 41 | 42 | 1 | beam | 29940 | 8387000 | -45300 | 58980 | -0.0004414 |
| 40 | 1 | 40 | 41 | 1 | beam | 15950 | 8374000 | -37490 | 44910 | -0.0004408 |
| 39 | 1 | 39 | 40 | 1 | beam | 1039 | 8342000 | -37030 | 37510 | -0.0004391 |
| 38 | 1 | 38 | 39 | 1 | beam | -10580 | 8301000 | -41690 | 36940 | -0.0004369 |
| 37 | 1 | 37 | 38 | 1 | beam | -25050 | 8264000 | -52070 | 41580 | -0.0004349 |
| 36 | 1 | 36 | 37 | 1 | beam | 57970 | 8315000 | -27980 | 52230 | -0.0004376 |
| 35 | 1 | 35 | 36 | 1 | beam | 13680 | 8268000 | -21200 | 27700 | -0.0004352 |
| 34 | 1 | 34 | 35 | 1 | beam | 13880 | 8284000 | -15380 | 21180 | -0.000436 |
| 33 | 1 | 33 | 34 | 1 | beam | -6314 | 8163000 | -17570 | 15270 | -0.0004296 |
| 32 | 1 | 32 | 33 | 1 | beam | 47110 | 8226000 | 7501 | 17780 | -0.0004329 |
| 31 | 1 | 31 | 32 | 1 | beam | 25770 | 8153000 | 21190 | -7361 | -0.0004291 |
| 30 | 1 | 30 | 31 | 1 | beam | 11410 | 8090000 | 27060 | -20620 | -0.0004258 |
| 29 | 1 | 29 | 30 | 1 | beam | 66680 | 8115000 | 64040 | -26430 | -0.0004271 |
| 28 | 1 | 28 | 29 | 1 | beam | 48360 | 8170000 | 111700 | -64000 | -0.00043 |
| 27 | 1 | 27 | 28 | 1 | beam | -37310 | 8324000 | 74760 | -112000 | -0.0004381 |
| 26 | 1 | 26 | 27 | 1 | beam | -82270 | 8410000 | 283.3 | -74980 | -0.0004426 |
| 25 | 1 | 25 | 26 | 1 | beam | -46850 | 8520000 | -23470 | -252.4 | -0.0004484 |
| 24 | 1 | 24 | 25 | 1 | beam | -36080 | 8610000 | -41920 | 23660 | -0.0004531 |
| 23 | 1 | 23 | 24 | 1 | beam | 2607 | 8606000 | -40720 | 41960 | -0.0004529 |
| 22 | 1 | 22 | 23 | 1 | beam | -9891 | 8652000 | -45140 | 40450 | -0.0004554 |
| 21 | 1 | 21 | 22 | 1 | beam | 14780 | 8660000 | -39790 | 45190 | -0.0004558 |
| 20 | 1 | 20 | 21 | 1 | beam | 11410 | 8659000 | -34870 | 39690 | -0.0004557 |
| 19 | 1 | 19 | 20 | 1 | beam | -13220 | 8671000 | -40890 | 35390 | -0.0004564 |
| 18 | 1 | 18 | 19 | 1 | beam | 31890 | 8637000 | -27580 | 40850 | -0.0004546 |
| 17 | 1 | 17 | 18 | 1 | beam | 23350 | 8676000 | -16840 | 27420 | -0.0004566 |
| 16 | 1 | 16 | 17 | 1 | beam | 18190 | 8706000 | -8135 | 16860 | -0.0004582 |
| 15 | 1 | 15 | 16 | 1 | beam | 5967 | 8716000 | -4963 | 7924 | -0.0004588 |
| 14 | 1 | 14 | 15 | 1 | beam | -7553 | 8711000 | -8758 | 4986 | -0.0004585 |
| 13 | 1 | 13 | 14 | 1 | beam | -18220 | 8689000 | -17270 | 8356 | -0.0004573 |
| 12 | 1 | 12 | 13 | 1 | beam | -25390 | 8639000 | -29240 | 17390 | -0.0004547 |
| 11 | 1 | 11 | 12 | 1 | beam | -37920 | 8570000 | -45630 | 29110 | -0.0004511 |
| 10 | 1 | 10 | 11 | 1 | beam | 15430 | 8605000 | -39010 | 45460 | -0.0004529 |
| 9 | 1 | 9 | 10 | 1 | beam | 10420 | 8567000 | -34610 | 38960 | -0.0004509 |
| 8 | 1 | 8 | 9 | 1 | beam | 27030 | 8542000 | -23940 | 34520 | -0.0004496 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|---------|--------|--------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 7 | 1 | 7 | 8 | 1 | beam | 17040 | 8400000 | -15540 | 23880 | -0.0004421 |
| 6 | 1 | 6 | 7 | 1 | beam | 45940 | 8378000 | 6854 | 15650 | -0.000441 |
| 5 | 1 | 5 | 6 | 1 | beam | 13880 | 8279000 | 14320 | -6948 | -0.0004358 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 1 | beam | 45070 | 8276000 | 38490 | -14540 | -0.0004356 |
| 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | beam | -9567 | 8171000 | 33690 | -38630 | -0.0004301 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | beam | 40070 | 8187000 | 54530 | -33850 | -0.0004309 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | beam | 14200 | 8155000 | 67810 | -54480 | -0.0004292 |

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.5 m - Analisi n°19

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

| Fase | Descrizione | Rilascio forze di scavo |
|----------------------|--|--------------------------------|
| 0 | Creazione della geometria del modello | - |
| 1 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche | - |
| 2 | Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb) | - |
| SCAVO CANNA DESTRA | | |
| 3 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu) | varie |
| 4 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| SCAVO CANNA SINISTRA | | |
| 5 | Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra) | varie |
| 6 | Installazione dell'anello universale | 1.0 |
| LUNGO TERMINE | | |
| 7 | Ipotesi di drenaggio totale della falda al contorno del cavo – parateri drenati | 1.0 |

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

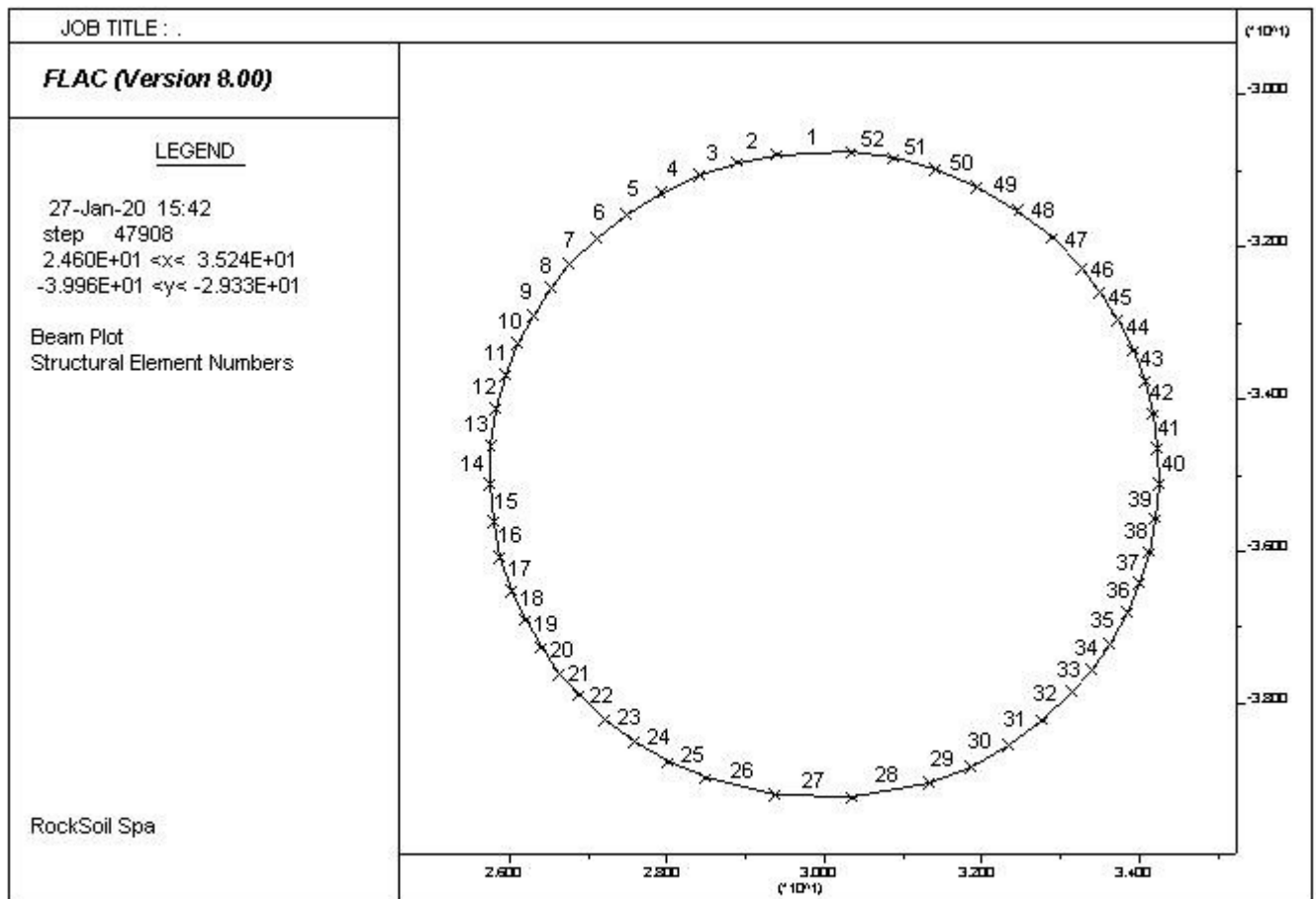


Figura 55 - Numerazione elementi beam canna Destra

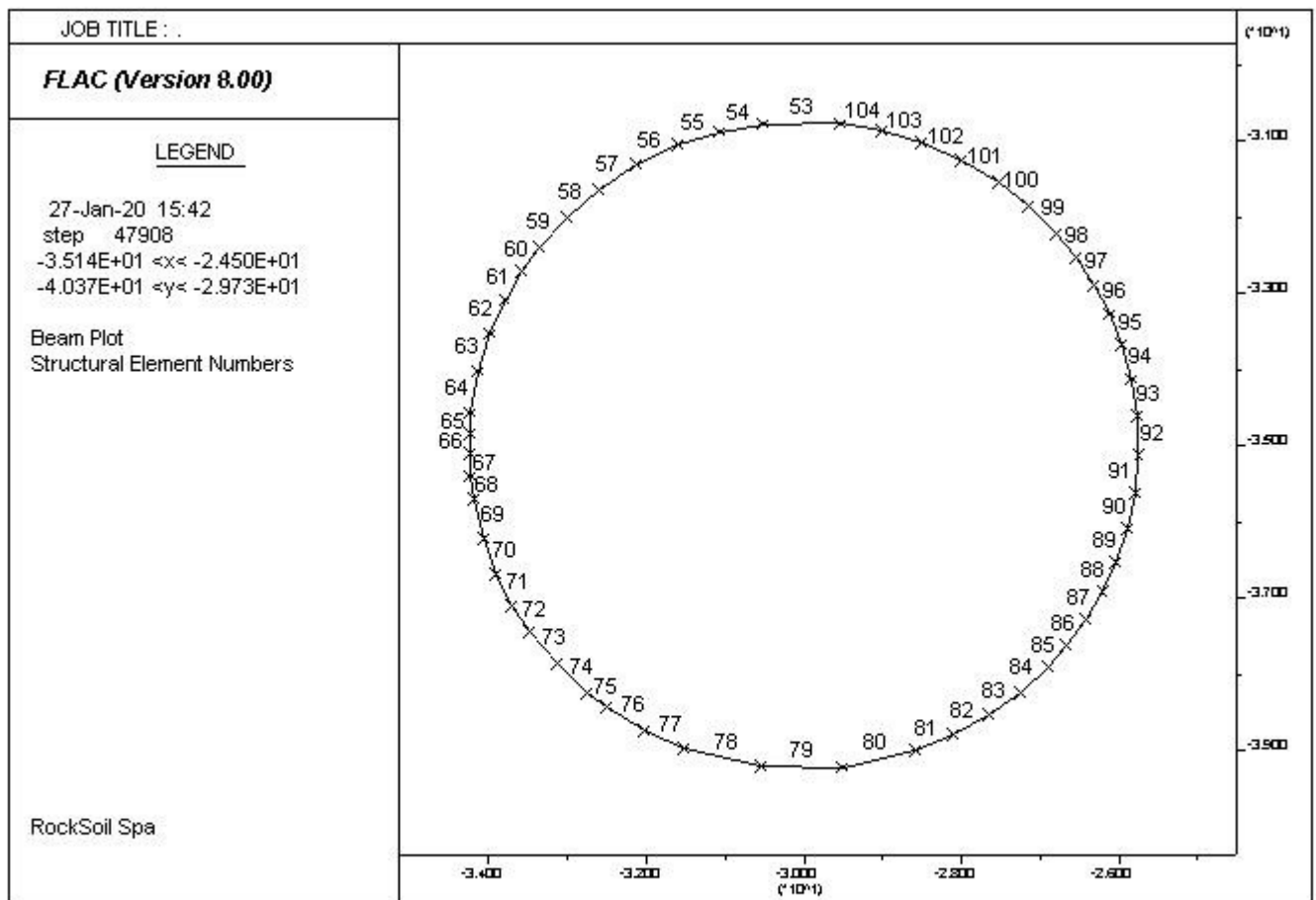


Figura 56 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

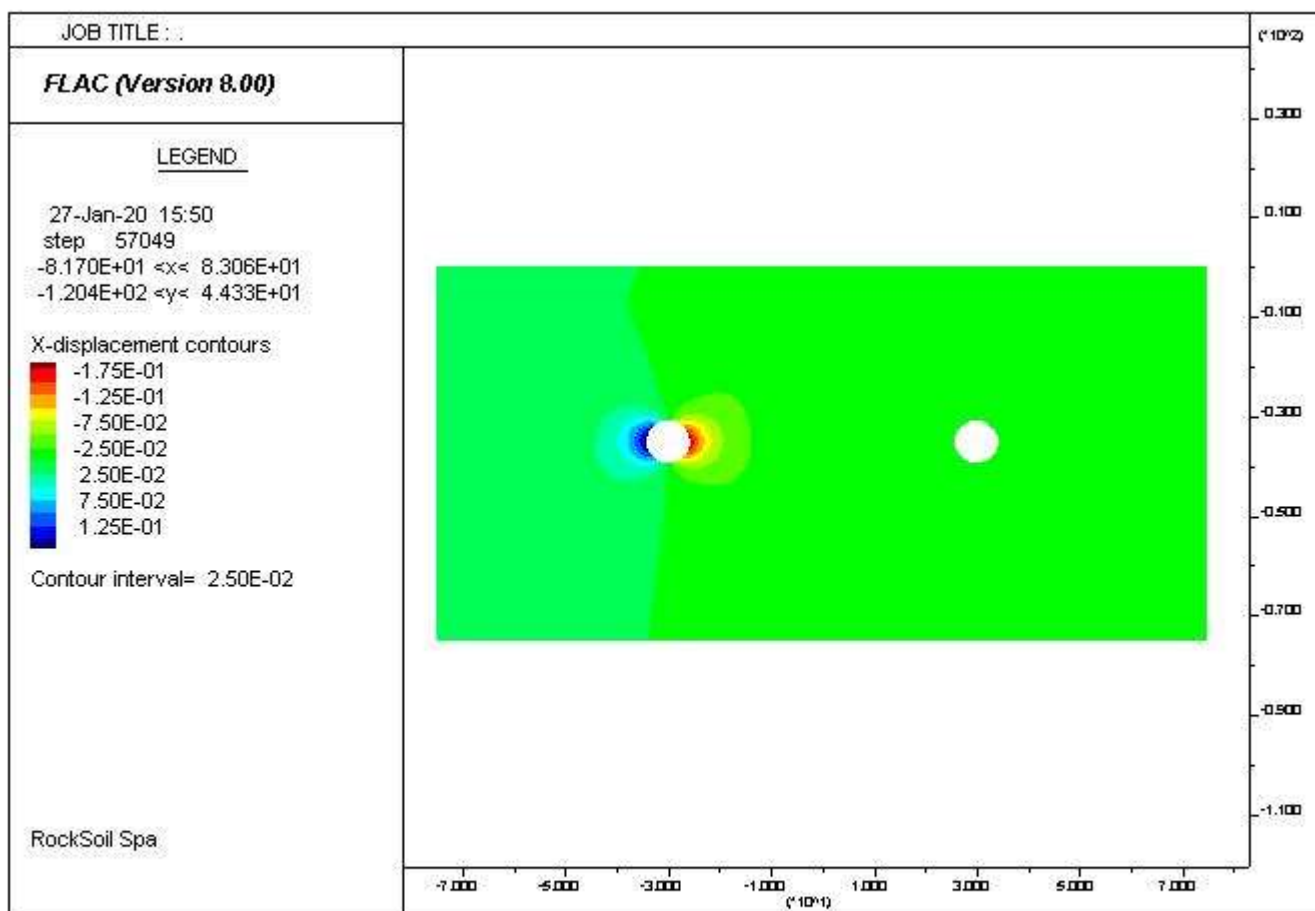


Figura 57 - Spostamenti x

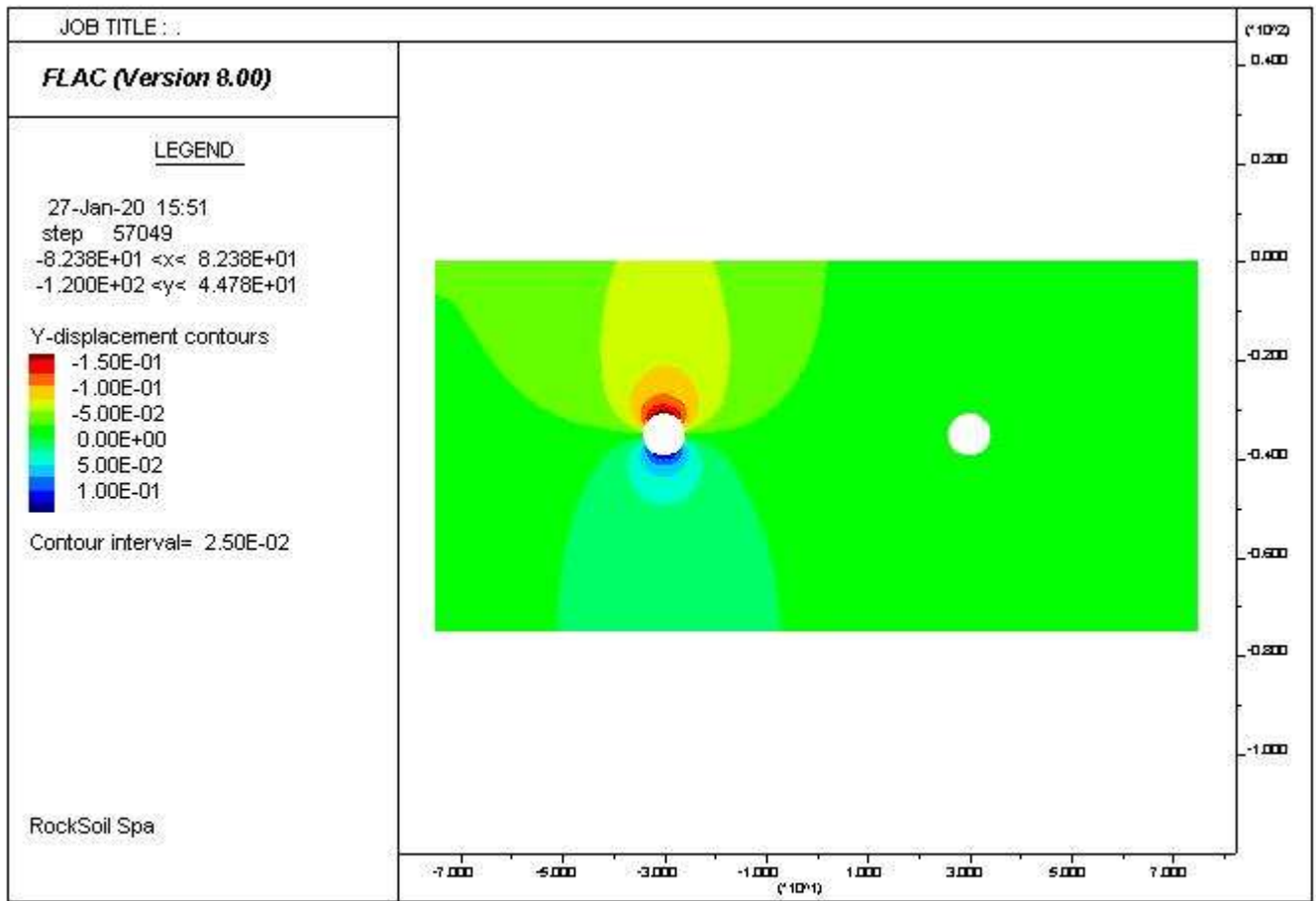


Figura 58 - Spostamenti y

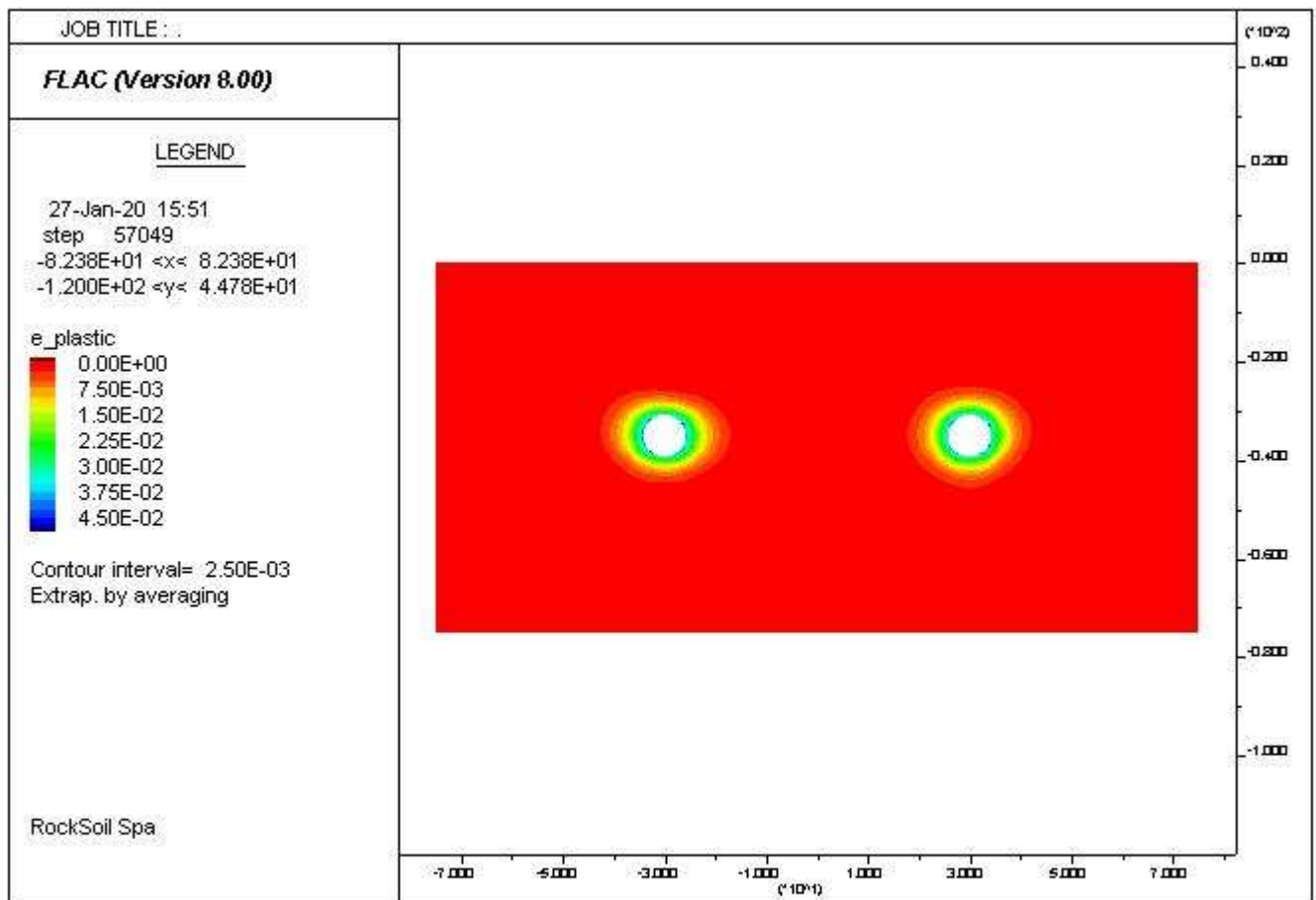


Figura 59 – Plasticizzazioni

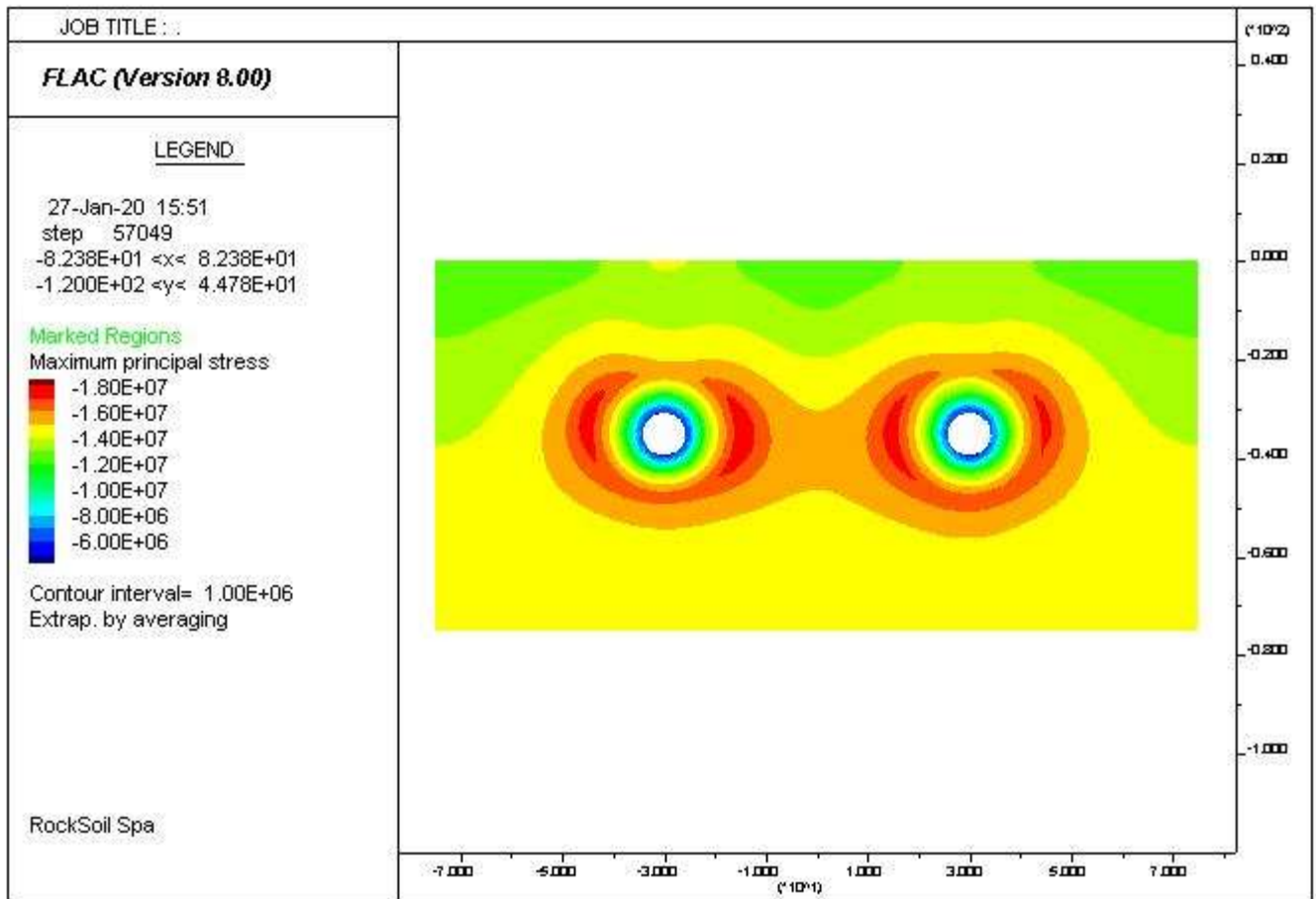


Figura 60 – Tensioni principali totali sigma1

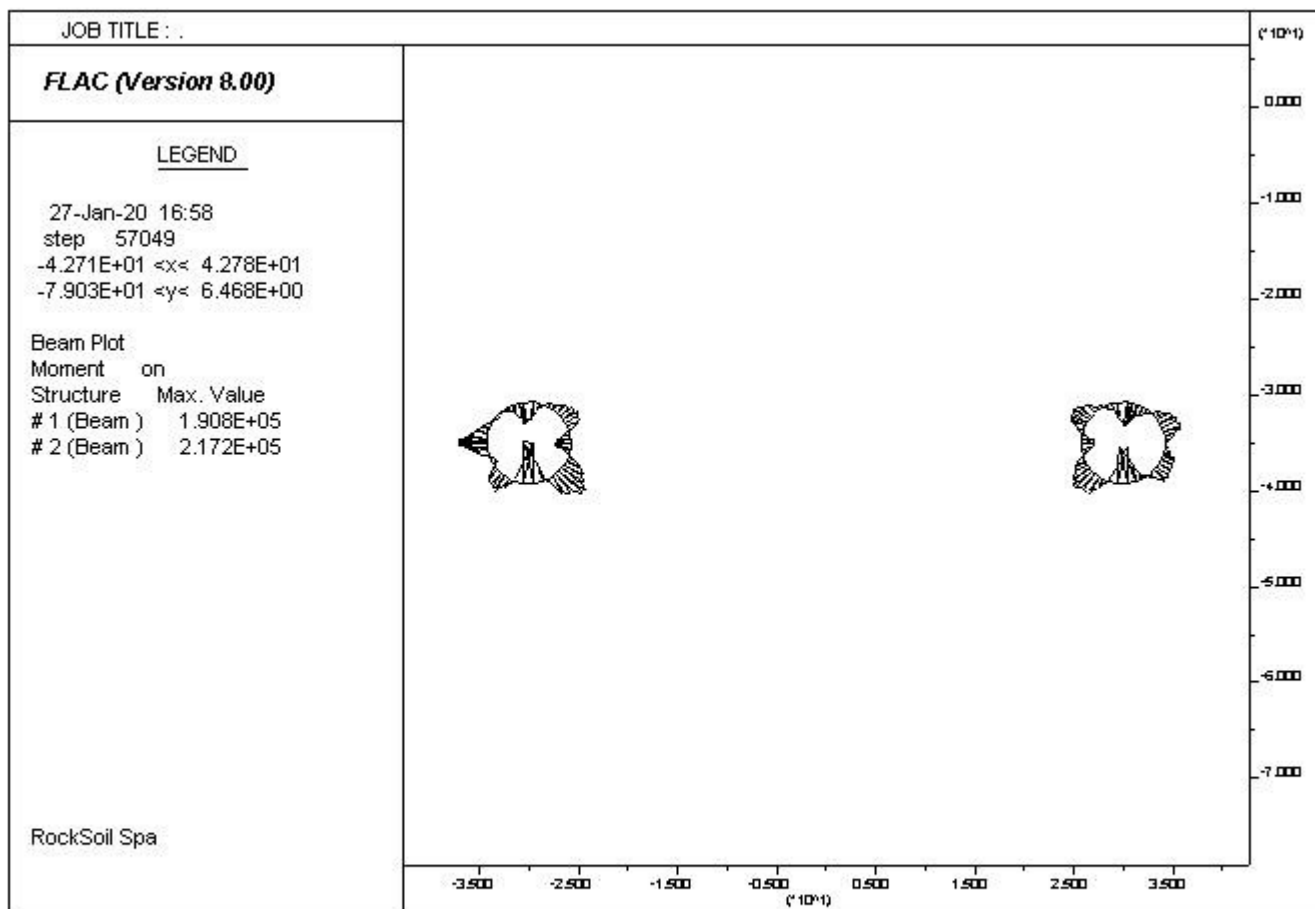


Figura 61 – Sollecitazioni M

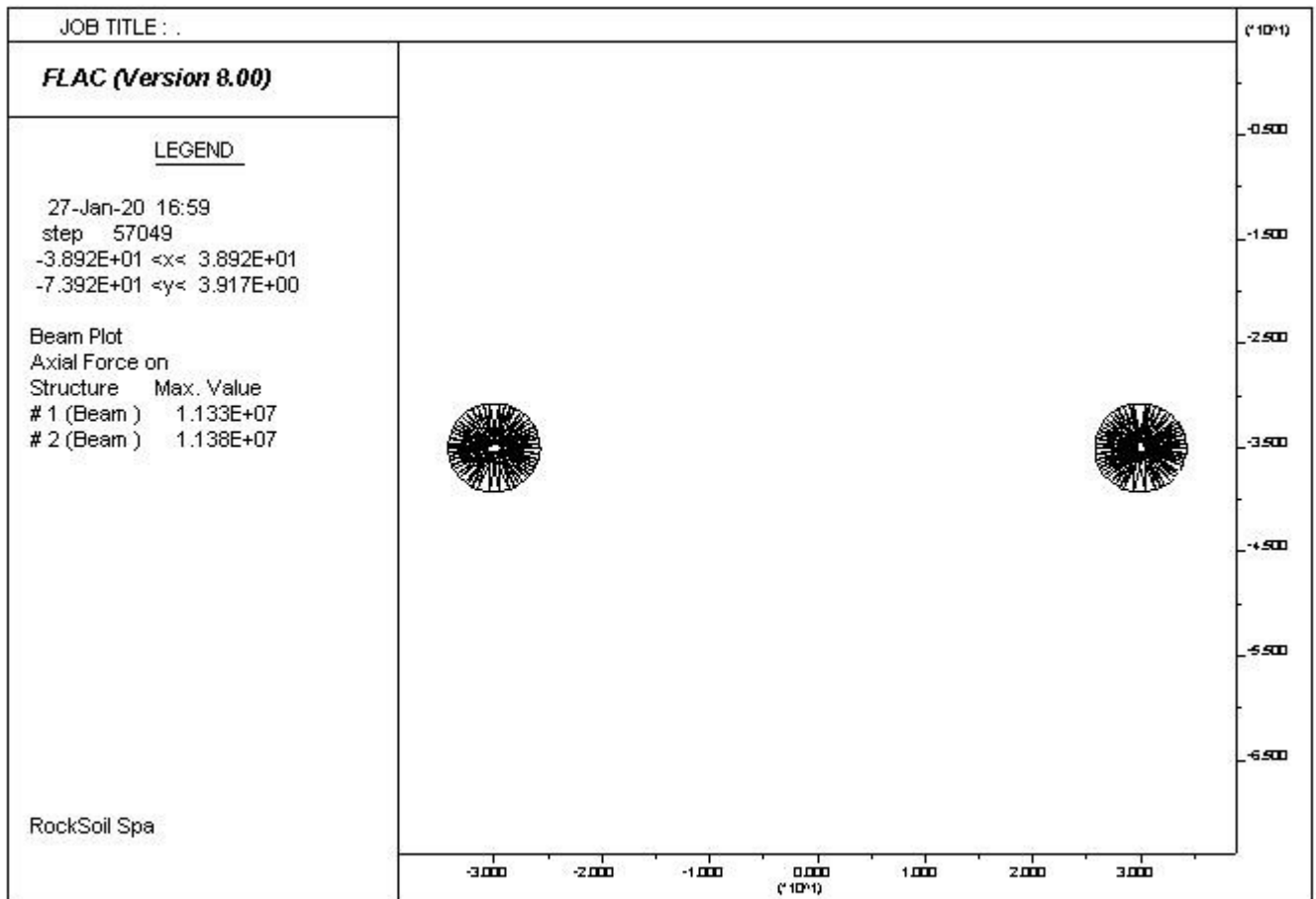


Figura 62 – Sollecitazioni N

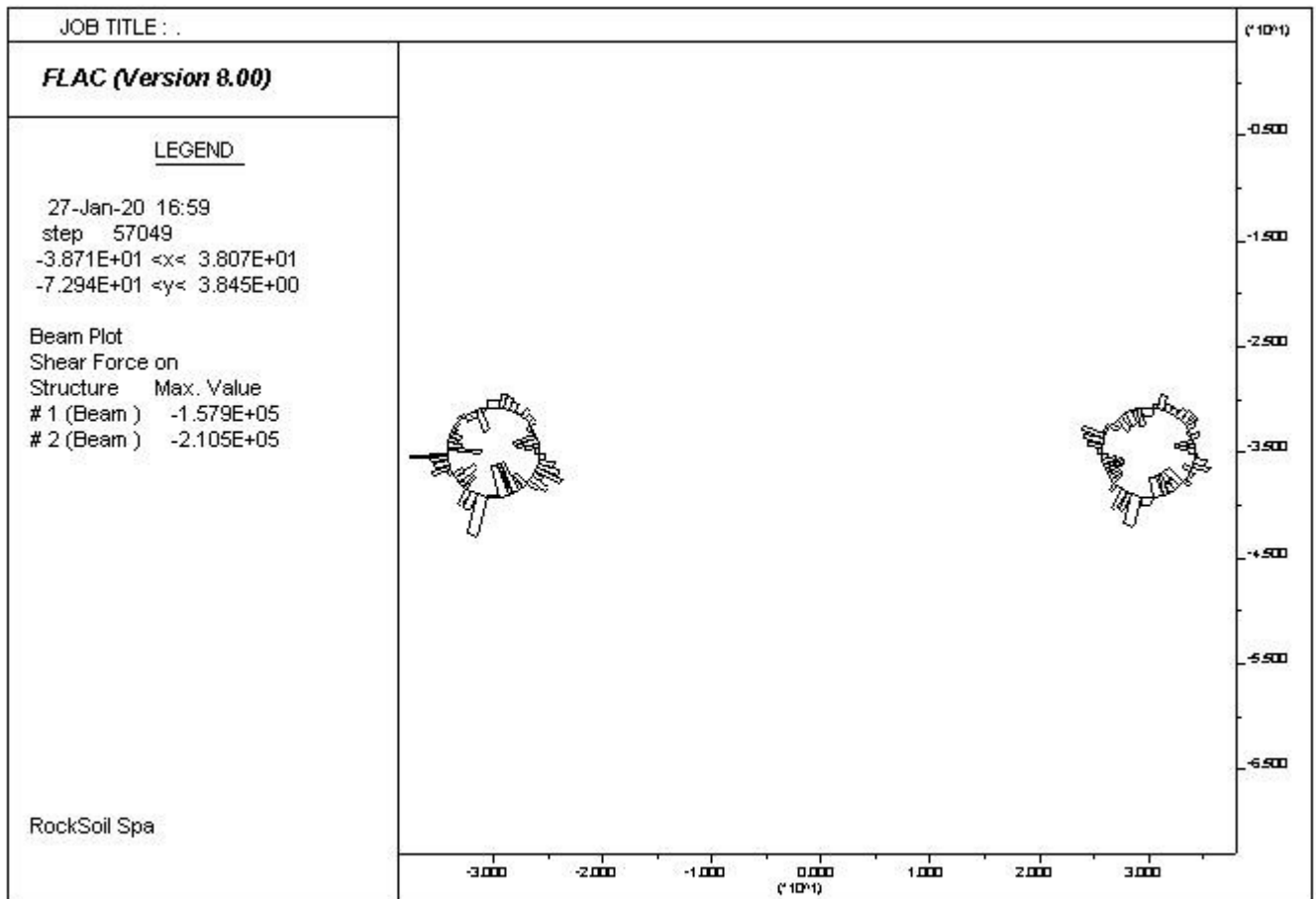


Figura 63 – Sollecitazioni T

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|----------|---------|---------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 104 | 2 | 104 | 53 | 1 | beam | -72100 | 11270000 | 38860 | -77160 | -0.0005932 |
| 103 | 2 | 103 | 104 | 1 | beam | -63920 | 11230000 | 5105 | -39060 | -0.0005908 |
| 102 | 2 | 102 | 103 | 1 | beam | -48100 | 11200000 | -21420 | -5048 | -0.0005895 |
| 101 | 2 | 101 | 102 | 1 | beam | -4492 | 11080000 | -24120 | 21650 | -0.0005833 |
| 100 | 2 | 100 | 101 | 1 | beam | -49900 | 11060000 | -49710 | 24440 | -0.0005819 |
| 99 | 2 | 99 | 100 | 1 | beam | -33670 | 10950000 | -66700 | 49650 | -0.0005763 |
| 98 | 2 | 98 | 99 | 1 | beam | -33900 | 11030000 | -80690 | 67370 | -0.0005806 |
| 97 | 2 | 97 | 98 | 1 | beam | 22450 | 10920000 | -71820 | 81440 | -0.0005749 |
| 96 | 2 | 96 | 97 | 1 | beam | 11280 | 10850000 | -68070 | 72910 | -0.000571 |
| 95 | 2 | 95 | 96 | 1 | beam | 121900 | 10690000 | -14760 | 68130 | -0.0005625 |
| 94 | 2 | 94 | 95 | 1 | beam | 107300 | 10710000 | 35550 | 14810 | -0.0005634 |
| 93 | 2 | 93 | 94 | 1 | beam | 69540 | 10710000 | 69140 | -34940 | -0.0005638 |
| 92 | 2 | 92 | 93 | 1 | beam | 22410 | 10700000 | 79600 | -68340 | -0.000563 |
| 91 | 2 | 91 | 92 | 1 | beam | -29650 | 10680000 | 64480 | -79270 | -0.0005619 |
| 90 | 2 | 90 | 91 | 1 | beam | -78020 | 10650000 | 26830 | -64470 | -0.0005605 |
| 89 | 2 | 89 | 90 | 1 | beam | -113400 | 10600000 | -24640 | -26990 | -0.0005579 |
| 88 | 2 | 88 | 89 | 1 | beam | -141700 | 10550000 | -84550 | 24110 | -0.0005554 |
| 87 | 2 | 87 | 88 | 1 | beam | -52540 | 10590000 | -106800 | 84380 | -0.0005575 |
| 86 | 2 | 86 | 87 | 1 | beam | -95670 | 10600000 | -147000 | 106500 | -0.0005579 |
| 85 | 2 | 85 | 86 | 1 | beam | -61250 | 10620000 | -168600 | 146200 | -0.0005592 |
| 84 | 2 | 84 | 85 | 1 | beam | 73610 | 10660000 | -132600 | 168600 | -0.0005612 |
| 83 | 2 | 83 | 84 | 1 | beam | 38150 | 10650000 | -113400 | 132100 | -0.0005607 |
| 82 | 2 | 82 | 83 | 1 | beam | 164900 | 10780000 | -25910 | 112300 | -0.0005675 |
| 81 | 2 | 81 | 82 | 1 | beam | 158100 | 10830000 | 57330 | 25460 | -0.0005699 |
| 80 | 2 | 80 | 81 | 1 | beam | 162300 | 10990000 | 211700 | -57430 | -0.0005785 |
| 79 | 2 | 79 | 80 | 1 | beam | 4857 | 11200000 | 217100 | -212100 | -0.0005893 |
| 78 | 2 | 78 | 79 | 1 | beam | -210500 | 10910000 | 6390 | -217200 | -0.0005741 |
| 77 | 2 | 77 | 78 | 1 | beam | -92920 | 10670000 | -46620 | -5952 | -0.0005614 |
| 76 | 2 | 76 | 77 | 1 | beam | -87200 | 10640000 | -96060 | 46720 | -0.0005601 |
| 75 | 2 | 75 | 76 | 1 | beam | 79420 | 10410000 | -72200 | 96550 | -0.0005478 |
| 74 | 2 | 74 | 75 | 1 | beam | 20570 | 10390000 | -61520 | 72800 | -0.0005466 |
| 73 | 2 | 73 | 74 | 1 | beam | 117600 | 10340000 | 2854 | 61650 | -0.0005443 |
| 72 | 2 | 72 | 73 | 1 | beam | 57270 | 10440000 | 24660 | -1446 | -0.0005493 |
| 71 | 2 | 71 | 72 | 1 | beam | -21590 | 10450000 | 14440 | -24250 | -0.00055 |
| 70 | 2 | 70 | 71 | 1 | beam | -85860 | 10390000 | -28210 | -14740 | -0.0005469 |
| 69 | 2 | 69 | 70 | 1 | beam | -70440 | 10330000 | -66000 | 28120 | -0.0005435 |
| 68 | 2 | 68 | 69 | 1 | beam | -82340 | 10140000 | -90610 | 66200 | -0.0005335 |
| 67 | 2 | 67 | 68 | 1 | beam | -182200 | 10120000 | -145100 | 91090 | -0.0005325 |
| 66 | 2 | 66 | 67 | 1 | beam | 3111 | 10130000 | -144200 | 145000 | -0.0005333 |
| 65 | 2 | 65 | 66 | 1 | beam | 177600 | 10200000 | -96070 | 143600 | -0.0005371 |
| 64 | 2 | 64 | 65 | 1 | beam | 63880 | 10320000 | -60900 | 96100 | -0.000543 |
| 63 | 2 | 63 | 64 | 1 | beam | 48340 | 10600000 | -35570 | 60690 | -0.0005577 |
| 62 | 2 | 62 | 63 | 1 | beam | 58690 | 10710000 | -7153 | 35130 | -0.0005638 |
| 61 | 2 | 61 | 62 | 1 | beam | 25080 | 10800000 | 3332 | 7419 | -0.0005682 |
| 60 | 2 | 60 | 61 | 1 | beam | 7218 | 10850000 | 6294 | -3551 | -0.0005709 |
| 59 | 2 | 59 | 60 | 1 | beam | 10860 | 10960000 | 12040 | -6228 | -0.0005766 |
| 58 | 2 | 58 | 59 | 1 | beam | -13470 | 11040000 | 4423 | -11630 | -0.000581 |
| 57 | 2 | 57 | 58 | 1 | beam | 32210 | 11140000 | 23910 | -4839 | -0.0005864 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|----------|---------|---------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 56 | 2 | 56 | 57 | 1 | beam | 32250 | 11300000 | 43010 | -23920 | -0.0005948 |
| 55 | 2 | 55 | 56 | 1 | beam | 112300 | 11380000 | 105900 | -43010 | -0.0005987 |
| 54 | 2 | 54 | 55 | 1 | beam | 15500 | 11320000 | 114900 | -106200 | -0.000596 |
| 53 | 2 | 53 | 54 | 1 | beam | -38870 | 11230000 | 77100 | -114900 | -0.0005913 |
| 52 | 1 | 52 | 1 | 1 | beam | -19570 | 10910000 | 108600 | -119300 | -0.000574 |
| 51 | 1 | 51 | 52 | 1 | beam | -70660 | 10980000 | 70410 | -108800 | -0.0005778 |
| 50 | 1 | 50 | 51 | 1 | beam | -36990 | 11040000 | 48490 | -70410 | -0.000581 |
| 49 | 1 | 49 | 50 | 1 | beam | -31320 | 10950000 | 29910 | -48480 | -0.0005763 |
| 48 | 1 | 48 | 49 | 1 | beam | -53600 | 11010000 | 483.8 | -30110 | -0.0005796 |
| 47 | 1 | 47 | 48 | 1 | beam | -64110 | 10920000 | -34640 | -789.9 | -0.0005748 |
| 46 | 1 | 46 | 47 | 1 | beam | -70300 | 11020000 | -61820 | 34460 | -0.0005799 |
| 45 | 1 | 45 | 46 | 1 | beam | -48360 | 11110000 | -83000 | 61470 | -0.0005848 |
| 44 | 1 | 44 | 45 | 1 | beam | 12660 | 10980000 | -77310 | 82790 | -0.000578 |
| 43 | 1 | 43 | 44 | 1 | beam | -37970 | 10950000 | -93590 | 77150 | -0.0005765 |
| 42 | 1 | 42 | 43 | 1 | beam | 93740 | 10830000 | -52440 | 93570 | -0.0005698 |
| 41 | 1 | 41 | 42 | 1 | beam | 72900 | 10800000 | -19220 | 52530 | -0.0005686 |
| 40 | 1 | 40 | 41 | 1 | beam | 34760 | 10770000 | -3307 | 19480 | -0.0005667 |
| 39 | 1 | 39 | 40 | 1 | beam | -9738 | 10700000 | -8329 | 3823 | -0.000563 |
| 38 | 1 | 38 | 39 | 1 | beam | -58200 | 10590000 | -34300 | 8140 | -0.0005576 |
| 37 | 1 | 37 | 38 | 1 | beam | -90380 | 10530000 | -72180 | 34380 | -0.000554 |
| 36 | 1 | 36 | 37 | 1 | beam | 42930 | 10550000 | -54090 | 72050 | -0.0005555 |
| 35 | 1 | 35 | 36 | 1 | beam | -28550 | 10490000 | -67440 | 53870 | -0.0005523 |
| 34 | 1 | 34 | 35 | 1 | beam | -9883 | 10530000 | -71570 | 67440 | -0.0005544 |
| 33 | 1 | 33 | 34 | 1 | beam | -34530 | 10350000 | -84140 | 71570 | -0.0005446 |
| 32 | 1 | 32 | 33 | 1 | beam | 106100 | 10500000 | -26880 | 83810 | -0.0005525 |
| 31 | 1 | 31 | 32 | 1 | beam | 59010 | 10420000 | 4892 | 26770 | -0.0005485 |
| 30 | 1 | 30 | 31 | 1 | beam | 46290 | 10410000 | 30650 | -4547 | -0.0005477 |
| 29 | 1 | 29 | 30 | 1 | beam | 104500 | 10570000 | 89630 | -30700 | -0.0005565 |
| 28 | 1 | 28 | 29 | 1 | beam | 102600 | 10770000 | 190800 | -89540 | -0.0005669 |
| 27 | 1 | 27 | 28 | 1 | beam | -47580 | 11060000 | 143200 | -190700 | -0.0005823 |
| 26 | 1 | 26 | 27 | 1 | beam | -157900 | 11000000 | -30.84 | -143300 | -0.0005791 |
| 25 | 1 | 25 | 26 | 1 | beam | -101800 | 11000000 | -51540 | 6.642 | -0.0005788 |
| 24 | 1 | 24 | 25 | 1 | beam | -107900 | 11060000 | -106400 | 51780 | -0.000582 |
| 23 | 1 | 23 | 24 | 1 | beam | 2758 | 10990000 | -105300 | 106600 | -0.0005783 |
| 22 | 1 | 22 | 23 | 1 | beam | -41210 | 11050000 | -124900 | 105400 | -0.0005817 |
| 21 | 1 | 21 | 22 | 1 | beam | 66220 | 11060000 | -100700 | 124900 | -0.0005821 |
| 20 | 1 | 20 | 21 | 1 | beam | 68510 | 11090000 | -72050 | 100900 | -0.0005835 |
| 19 | 1 | 19 | 20 | 1 | beam | 23950 | 11130000 | -62130 | 72090 | -0.0005856 |
| 18 | 1 | 18 | 19 | 1 | beam | 101900 | 11150000 | -19380 | 61780 | -0.000587 |
| 17 | 1 | 17 | 18 | 1 | beam | 92650 | 11240000 | 22500 | 19480 | -0.0005917 |
| 16 | 1 | 16 | 17 | 1 | beam | 67220 | 11310000 | 54710 | -22450 | -0.0005952 |
| 15 | 1 | 15 | 16 | 1 | beam | 29420 | 11330000 | 69300 | -54710 | -0.0005965 |
| 14 | 1 | 14 | 15 | 1 | beam | -22980 | 11320000 | 57790 | -69270 | -0.0005959 |
| 13 | 1 | 13 | 14 | 1 | beam | -72490 | 11280000 | 22170 | -57630 | -0.0005937 |
| 12 | 1 | 12 | 13 | 1 | beam | -102800 | 11210000 | -25460 | -22540 | -0.00059 |
| 11 | 1 | 11 | 12 | 1 | beam | -117000 | 11110000 | -76480 | 25500 | -0.0005845 |
| 10 | 1 | 10 | 11 | 1 | beam | -17110 | 11170000 | -83730 | 76580 | -0.0005879 |
| 9 | 1 | 9 | 10 | 1 | beam | -16390 | 11160000 | -90890 | 84030 | -0.0005871 |
| 8 | 1 | 8 | 9 | 1 | beam | 38480 | 11180000 | -75860 | 90930 | -0.0005886 |

| Elem | ID | Nod1 | Nod2 | Prop | | F-shear | F-axial | Mom-1 | Mom-2 | strain |
|------|----|------|------|------|------|---------|----------|--------|--------|------------|
| - | - | - | - | - | - | [N] | [N] | [N m] | [N m] | - |
| 7 | 1 | 7 | 8 | 1 | beam | 43300 | 11000000 | -54630 | 75840 | -0.000579 |
| 6 | 1 | 6 | 7 | 1 | beam | 88200 | 11020000 | -11870 | 55080 | -0.0005801 |
| 5 | 1 | 5 | 6 | 1 | beam | -3507 | 10920000 | -13860 | 11990 | -0.0005749 |
| 4 | 1 | 4 | 5 | 1 | beam | 75500 | 10950000 | 26100 | 14020 | -0.0005766 |
| 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | beam | 5381 | 10810000 | 28540 | -25760 | -0.0005689 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | beam | 95380 | 10820000 | 77790 | -28560 | -0.0005696 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | beam | 43920 | 10760000 | 119100 | -77810 | -0.0005661 |