

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA (LOTTO 4A)**

Uscita laterale della Galleria Montestretto

Relazione geotecnica e di calcolo dell'uscita laterale della Galleria naturale Montestretto

SCALA:

-

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

RS3U 40 D 07 CL GN4100 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	ROCKSOIL	Gennaio 2020	S.Vagnozzi	Gennaio 2020	A.Barreca	Gennaio 2020	ITALFERR S.P.A. U.O. GALLERIE Dott. Ing. Alessandro Romiti Ordine degli Ingegneri n° 19846 A.S. Romiti
B	EMISSIONE ESECUTIVA	ROCKSOIL <i>Q. Romiti</i>	Febbraio 2020	S.Vagnozzi <i>[firma]</i>	Febbraio 2020	A.Barreca <i>[firma]</i>	Febbraio 2020	

## INDICE

1	PREMESSA .....	4
2	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	4
3	NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO .....	5
4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	5
4.1	DOCUMENTI CORRELATI .....	6
5	ALLEGATI .....	6
6	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO .....	7
7	DESCRIZIONE DELL'OPERA .....	8
7.1	USCITA LATERALE DELLA GALLERIA NATURALE MONTESTRETTO .....	8
7.2	OPERE TECNOLOGICHE .....	10
7.3	INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO .....	10
8	FASE CONOSCITIVA .....	11
8.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO .....	11
8.1.1	<i>Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato .....</i>	<i>12</i>
8.2	INDAGINI GEOTECNICHE .....	12
8.3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	13
8.3.1	<i>TRV – Formazione di Terravecchia (TRV).....</i>	<i>14</i>
8.4	REGIME IDRAULICO .....	21
8.5	RISCHI POTENZIALI.....	21
9	FASE DI DIAGNOSI.....	22
9.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO.....	22
9.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO.....	23
9.2.1	<i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche .....</i>	<i>23</i>

	<i>Analisi della stabilità del fronte</i> .....	26
10	FASE DI TERAPIA .....	30
10.1	SCELTA DEL METODO DI SCAVO.....	30
10.2	SCAVO IN TRADIZIONALE.....	30
10.3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI.....	34
10.4	ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....	37
	<i>10.4.1 Criteri di verifica</i> .....	37
	<i>Definizione dell'azione sismica di progetto</i> .....	43
	<i>Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale</i> .....	46
	<i>10.4.2 Analisi n. 1 - Sezione di calcolo pk 4+856</i> .....	48
11	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO.....	71
11.1	CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO .....	71
11.2	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA .....	72
12	CONCLUSIONI .....	73

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 1 PREMESSA

Il presente documento riguarda la caratterizzazione geotecnica ed il dimensionamento dell'uscita laterale della Galleria Naturale "Montestretto", inquadrata all'interno dei lavori di costruzione del nuovo collegamento ferroviario Palermo-Catania, specificamente del Lotto 4A di tale progetto, nella tratta Caltanissetta Xirbi – Nuova Enna.

## 2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Nel presente documento si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione dell'uscita laterale della Galleria naturale "Montestretto", ubicata fra le progressive km 4+107.50 (imbocco lato Ovest) e km 6+468.00 (imbocco lato Est), per una lunghezza comprensiva delle opere di imbocco di circa 2360.5 m.

Per la descrizione delle opere di imbocco e dei tratti di uscita laterale della Galleria artificiale si rimanda alla "Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco" (Rif. [16]).

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [18]), 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 uscita laterale della 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. 9).
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.10). Le soluzioni progettuali sono state analizzate per verificarne l'adeguatezza: nel capitolo 10 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.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

### 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] Italferr, Progetto Preliminare/Progetto di fattibilità tecnico economica [Dicembre 2018];

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] U.O. Geologia - [RS3T30D69RGGE0001001A] “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica”;

Rif. [13] U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità, “Elaborati specialistici”;

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. RS3U40D07CLGA0000001A “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco”;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

Rif. [17] U.O. Gallerie, doc RS3U40D07F5GN0100001A “Profilo geotecnico – Uscita laterale della Galleria Montestretto”.

#### 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:

“Analisi con il metodo delle linee caratteristiche”;

“Analisi con il metodo di stabilità al fronte”;

“Analisi numerica per la verifica della Sezione pk. 4+856”;

“Analisi numerica per la verifica della Sezione pk. 5+474”;



## 7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

### 7.1 Uscita laterale della Galleria Naturale Montestretto

L'uscita laterale della Galleria Montestretto, è dotata di due uscite/accessi laterali pedonali che si innestano alla uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria di linea alla pk 4+856 circa e alla pk 5+474 circa, caratterizzata da un tratto di uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria naturale di sviluppo pari a 460 m circa. La finestra dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria Montestretto è realizzata in tradizionale interamente all'interno della litologia TRV. Il cunicolo parallelo alla uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria di linea ha una lunghezza totale di 618 m.

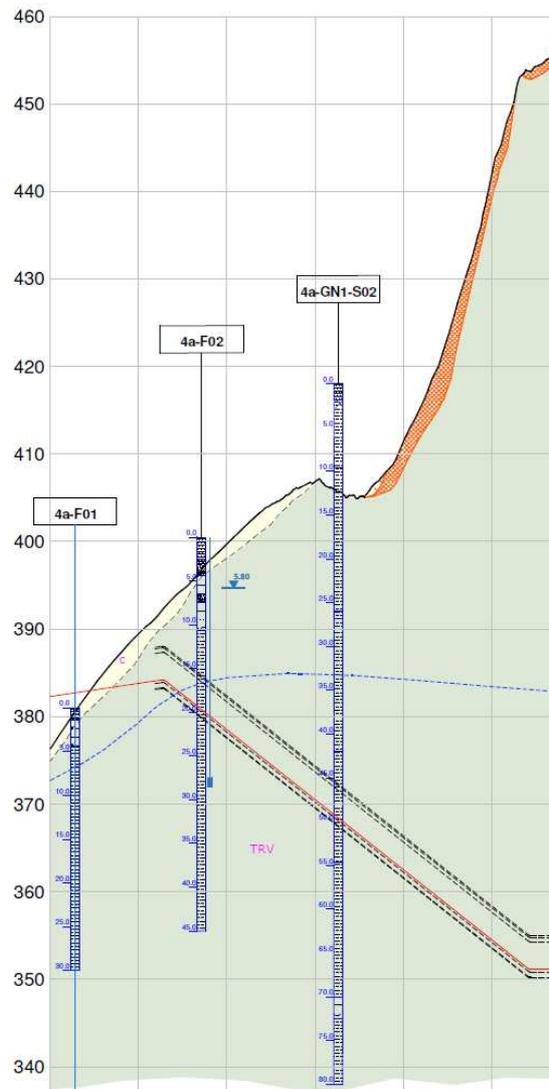


Figura 1: Profilo uscita laterale della Galleria Montestretto

In accordo a quanto previsto negli elaborati della U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità (Rif. [16]), i requisiti di sicurezza previsti per le finestre in esame 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. [8]).

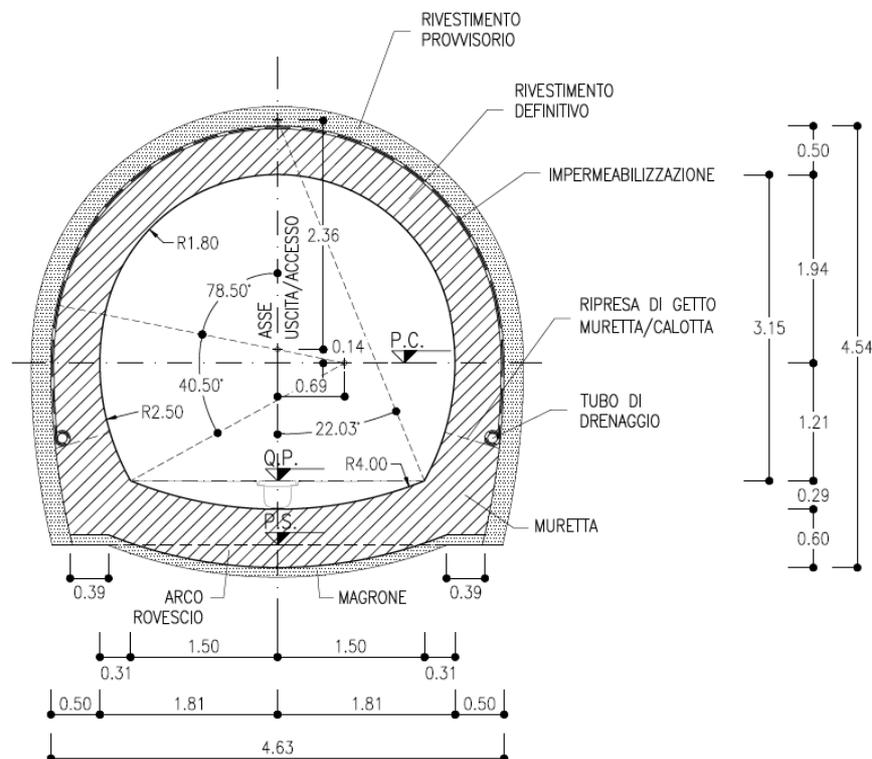


Figura 2: Sezione di intradosso uscita/accesso laterale pedonale (sezione corrente)

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 7.2 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.

## 7.3 Interferenze lungo il tracciato

Dall'analisi della cartografia di progetto è stato possibile appurare che nel tracciato dell'uscita laterale della Galleria naturale Montestretto si rilevano interferenze per la presenza di opere preesistenti. Il corpo di fabbrica identificato lungo il tracciato è 1. In dettaglio, a Pk 0+225, circa, è presente un edificio ricadente entro il bacino di subsidenza indotto dallo scavo delle gallerie; la distanza minima rispetto all'asse galleria di linea è minore di 50m. Nella zona di sottoattraversamento dei suddetti corpi di fabbrica lo scavo del tunnel interessa la formazione marnosa-argillosa (TRV) con coperture, dall'asse della calotta, di 50m circa.



**Figura 3. Planimetria posizione edifici**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 8 FASE CONOSCITIVA

Nella fase conoscitiva si acquisiscono gli elementi necessari alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito e alla caratterizzazione e modellazione geotecnica del volume significativo interessato dalle opere in sotterraneo.

### 8.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

Da un punto di vista generale 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, è costituita da sequenze mesozoiche sia di piattaforma che di bacino, con coperture flyschoidi mioceniche.

Relativamente alla Montestretto le formazioni interessate dallo scavo, procedendo da Ovest verso Est, sono i TRV di natura essenzialmente argilloso marnosa, riferibili in particolare alla Formazione di Terravecchia.

Nella carta del CARG (Foglio Caltanissetta) il membro pelitico TRV della Formazione di Terravecchia è descritto come segue:

TRV: membro pelitico argilloso. Argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marrone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, talora con lamine e con strati irregolari e lentiformi, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre; a luoghi si rinvengono passaggi di marne, marne argillose e argilliti di colore grigio e grigio-verdastro, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata.

Localmente, la formazione di Terravecchia passa gradualmente alla **formazione** nota come **Tripoli**, rappresentata da depositi di bacino euxinico del Messiniano inferiore, costituiti da diatomiti e marne diatomitiche laminate e fessili da bianche a grigio chiaro con resti di pesci, alternate a marne laminate con abbondanti foraminiferi planctonici, talora bituminose, torbaniti (sapropel) e calcari marnosi.

Lo spessore non supera di norma i 40 metri.

I depositi del Tripoli, depositatisi all'interno di bacini marini confinati o isolati, sono parzialmente equivalenti nel tempo alla formazione di Terravecchia e sono caratterizzati da una ciclicità litologica ben sviluppata. L'analisi della microfauna mostra associazioni dominate da foraminiferi planctonici, abbondanti diatomee e coccoliti, meno frequentemente da radiolari, spicole di spugna e resti di pesci (*Bregmaceros sp.*, *Myctophum sp.* e *Syngnathus sp.*; Grasso et al., 1990) e dinoflagellati.

Metodi e risultati dello studio geologico sono esposti e commentati nell'elaborato di progetto "Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica" (Rif. [12]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

### 8.1.1 Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato

L'uscita laterale della Galleria GN01 attraversa un rilievo impostato in un'ampia struttura sinclinale con asse immergente in direzione WSW, delineata in maniera evidente da una barra di sedimenti messiniani e dalla soprastante formazione dei Trubi, che appoggiano in discordanza stratigrafica sulle argille  $\pm$  marnose della formazione Terravecchia. Il tunnel attraversa il nucleo della sinclinale, costituito da litotipi argillosi della formazione TRBa per poi riattraversare in ordine inverso la sequenza fino ad incontrare nuovamente le argille di Terravecchia.

Una faglia (presunta) ad alto angolo sembrerebbe tagliare il bordo occidentale della sinclinale, con direzione subparallela al fianco della piega, tendendo a ribassare leggermente la sequenza stratigrafica verso est.

Le formazioni attraversate dalla uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria sono, da ovest a est:

- Formazione Terravecchia, membro pelitico-marnoso (TRV), pk 5+930 - 6+413

Nel complesso, viste le caratteristiche litologiche e geomeccaniche dei litotipi osservate sia in affioramento sia in sondaggio, si stimano per le diverse unità geologiche incontrate in uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria le percentuali di materiale con comportamento di tipo litoide riassunte nella tabella sottostante, per un totale di circa il 20% della lunghezza totale.

## 8.2 Indagini geotecniche

Ai fini della caratterizzazione geotecnica delle formazioni interessate dalle opere all'aperto e in sotterraneo, sono stati utilizzati i dati provenienti dalle diverse campagne di indagini geotecniche, sia pregresse (2013) che riferite all'attuale fase progettuale (2018/2019). Queste ultime, realizzate sull'ultima ipotesi di tracciato, sono state ritenute particolarmente significative. Le pregresse indagini, invece, fanno riferimento a ipotesi di tracciato differenti ma ad ogni modo ricadenti nel territorio di studio.

Nel corso della campagna di indagini eseguita nel 2019, relativamente alla uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria in esame, sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- n. 1 sondaggi a carotaggio continuo;
- n. 6 prove pressiometriche;
- n. 2 prova sismica in foro tipo down-hole.

Il numero totale dei campioni analizzati nella tratta di interesse e sottoposti a prove di laboratorio è di 78

Sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove meccaniche:

- prove di taglio diretto (TD);
- prove di compressione triassiale (CIU, CID, UU);

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

- prove di rigonfiamento impedito;
- prove di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg.

Nel corso della campagna di indagini eseguita nel 2018, complessivamente nel Lotto 3 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 3 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” (Rif. [8]).

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” (Rif. [17]). Nei paragrafi che seguono si riepilogano nel dettaglio i risultati della caratterizzazione e modellazione geotecnica eseguita per ciascuna delle formazioni interessate dallo scavo dell'uscita laterale della Galleria .

### 8.3 Caratterizzazione geotecnica

Per quanto concerne la caratterizzazione geotecnica delle Formazioni individuate in fase preliminare che interessano la uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria naturale Montestretto, sono di seguito riportati i risultati delle elaborazioni eseguite relative alle caratteristiche fisiche e meccaniche determinate.

### 8.3.1 TRV – Formazione di Terravecchia (TRV)

Si tratta di argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marrone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, talora con laminare e con strati irregolari e lentiformi, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre.

#### Caratteristiche fisiche

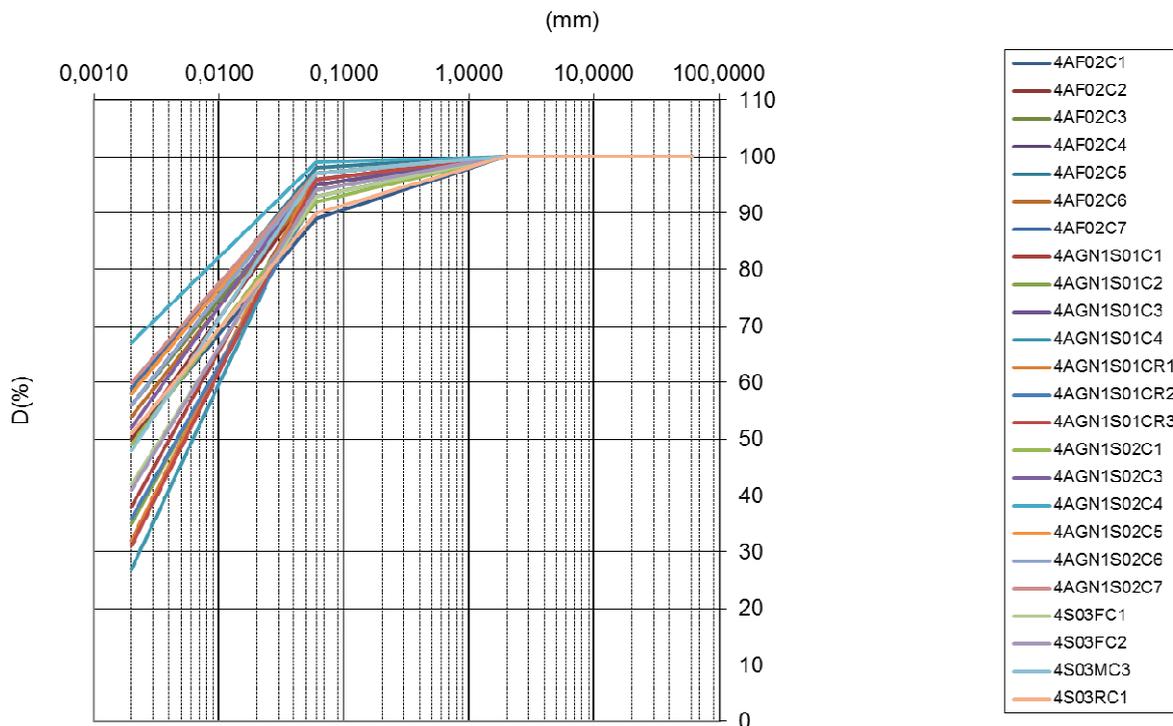
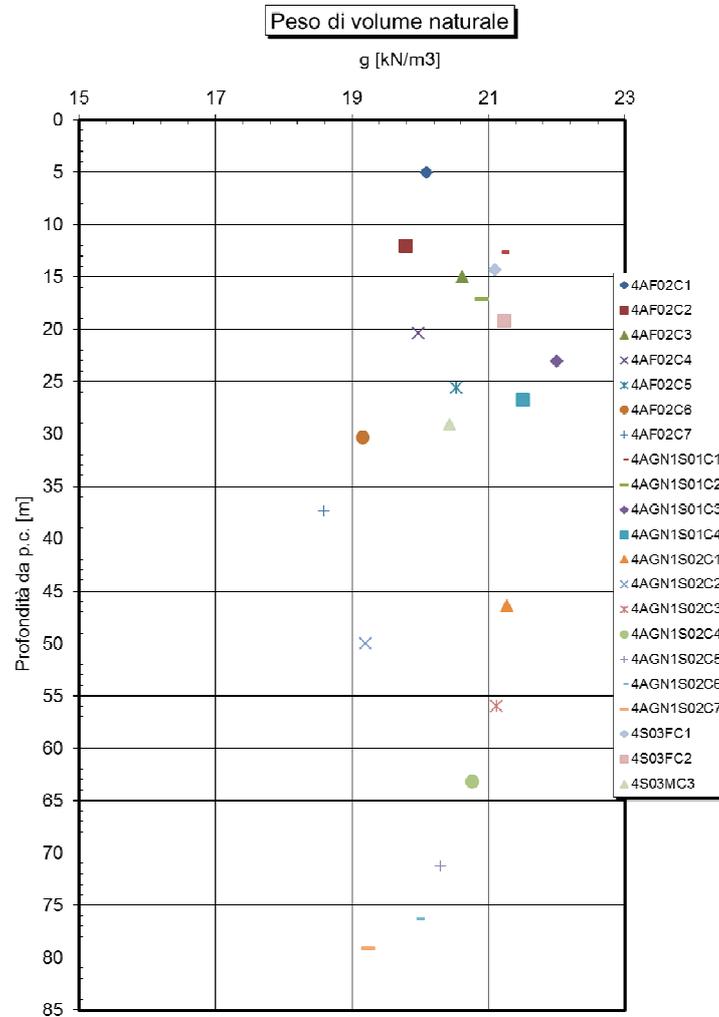


Figura 4: Uscita laterale della Galleria Montestretto - TRV – fuso granulometrico



**Figura 5: Uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – peso dell'unità di volume**

Il peso dell'unità varia da 18.50 kN/m<sup>3</sup> a 22 kN/m<sup>3</sup>.

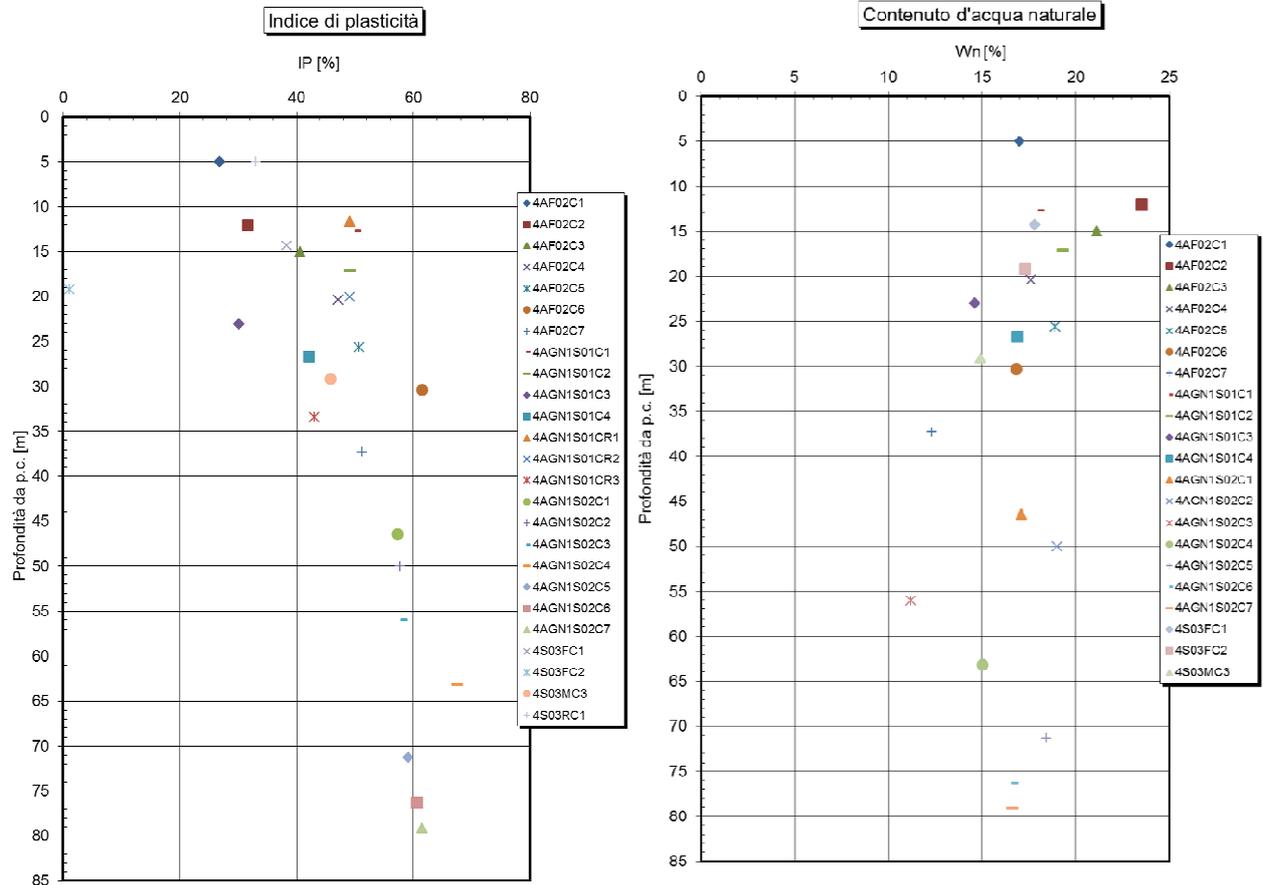


Figura 6: Uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – indice di plasticità e contenuto d'acqua naturale

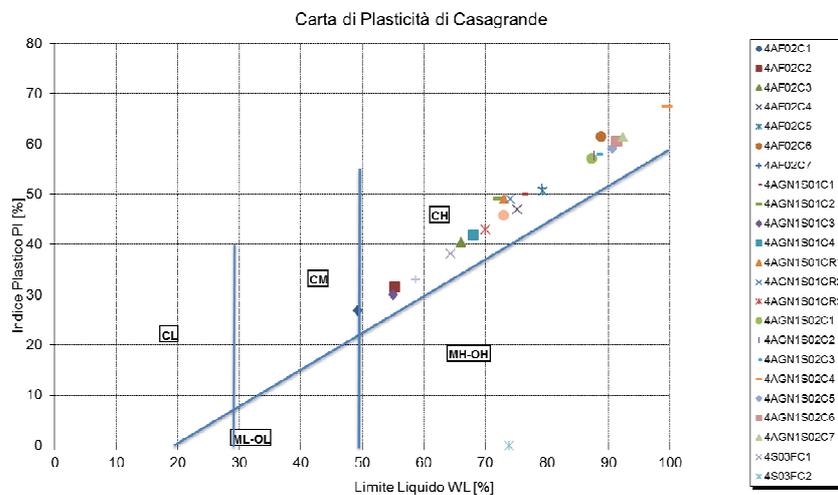
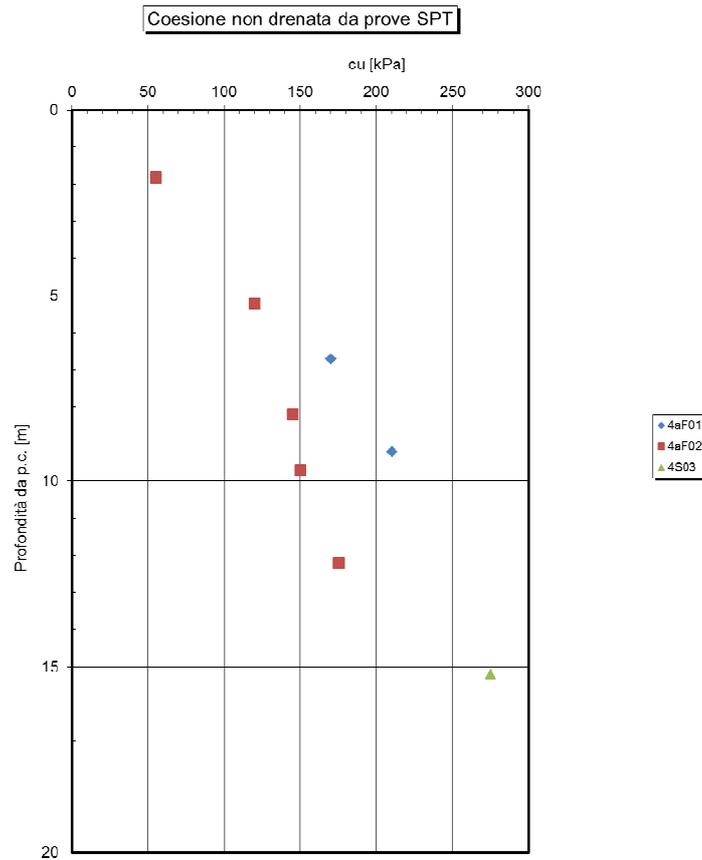


Figura 7: Uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – carta di plasticità di Casagrande

Caratteristiche meccaniche



**Figura 8: Uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – resistenza al taglio non drenata da prove SPT**

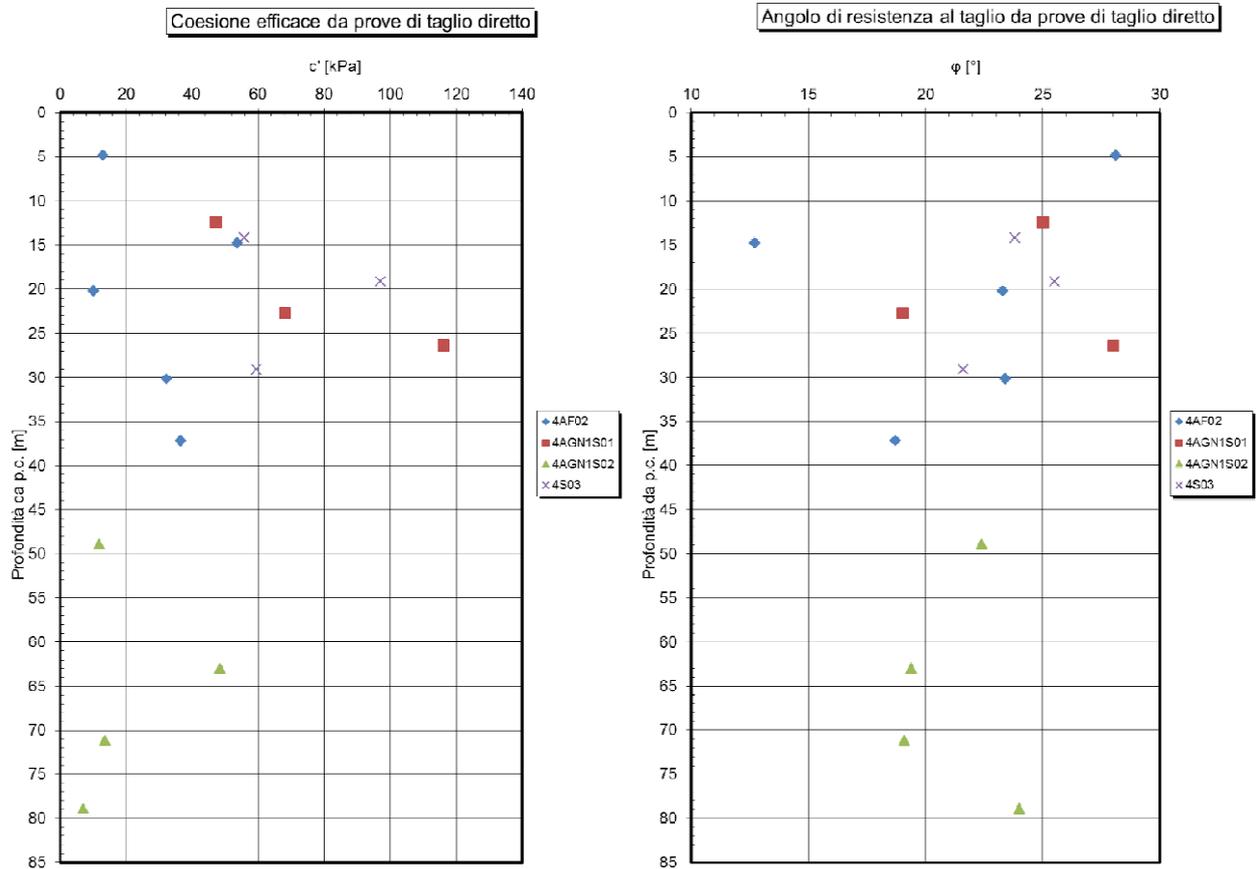
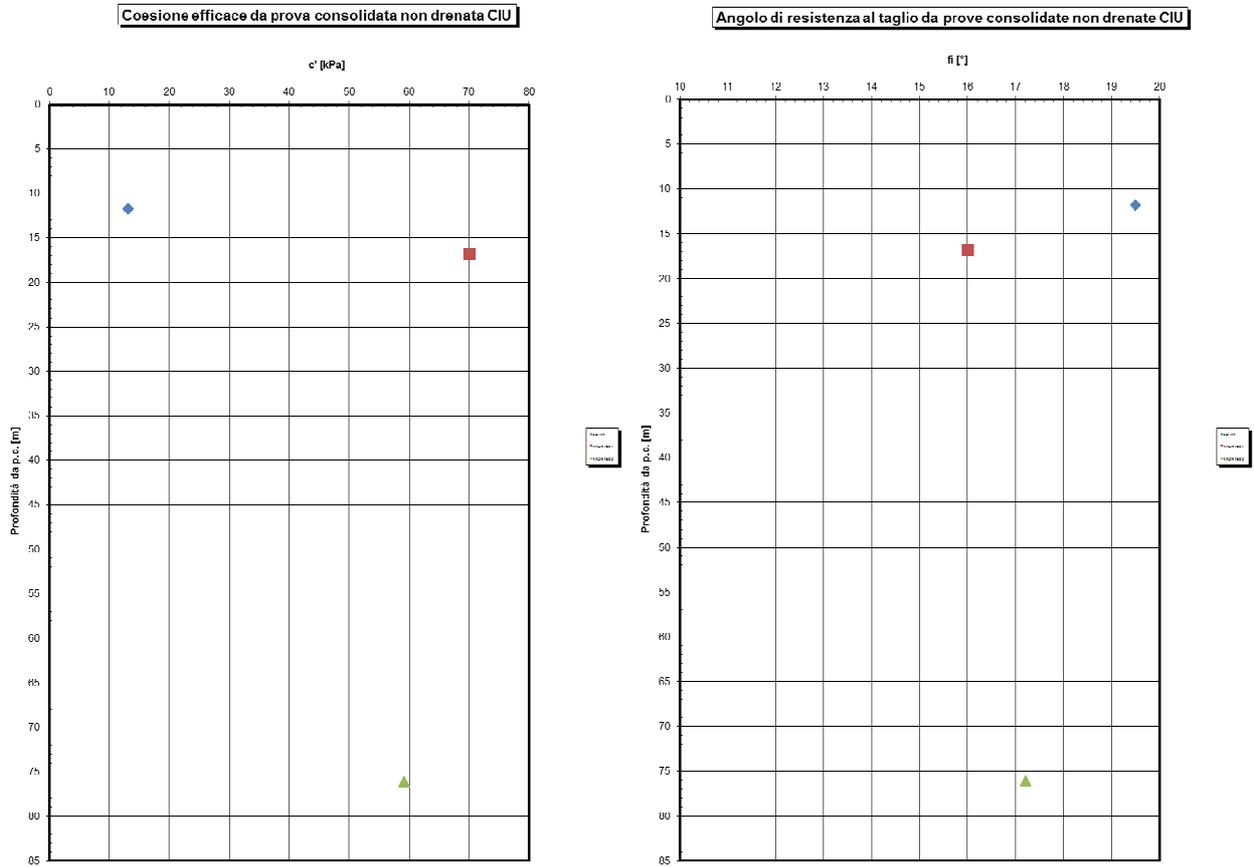


Figura 9: Uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – coesione e angolo di resistenza al taglio da prove di taglio diretto



**Figura 10: Uscita laterale dell'uscita lateraledella Galleria Montestretto – TRV – coesione e angolo di resistenza al taglio da prove triassiali CIU**

### Caratteristiche di permeabilità

Non vi sono dati a disposizione, si rimanda pertanto alla caratterizzazione geotecnica generale.

### Parametri geotecnici

**Tabella 1: Uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria Montestretto – TRV – parametri geotecnici derivanti dalla caratterizzazione geotecnica**

COPERTURA	FORMAZIONE	$\gamma$	GSI	$m_i$	$\sigma_m$	$\nu$	E	Cu	c'	$\varphi'$
--		[kN/m <sup>3</sup> ]			[MPa]		[GPa]	[kPa]	[kPa]	[°]
5-15	TRV	21	-	-	-	0.3	0.05-0.10	85.05	30	22
15-25	TRV	21	-	-	-	0.3	0.10-0.13	141.75	31	22
25-50	TRV	21	-	-	-	0.3	0.13-0.15	283.5	31	22
50-100	TRV	22	-	-	-	0.3	0.15-0.30	594	160	18
100-150	TRV	22	-	-	-	0.3	0.30-0.45	891	224	17
125-100	TRV	22	-	-	-	0.3	0.30-0.45	742.5	224	17
50-100	TRV	22	-	-	-	0.3	0.15-0.30	594	160	18
25-50	TRV	21	-	-	-	0.3	0.13-0.15	283.5	31	22
15-25	TRV	21	-	-	-	0.3	0.10-0.13	141.75	31	22
5-15	TRV	21	-	-	-	0.3	0.05-0.10	85.05	30	22

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

#### 8.4 Regime idraulico

La galleria in esame attraversa il complesso idrogeologico del substrato CAM ( $k$  variabile tra  $1E-07$  e  $1E-09$ ), al cui interno si possono verificare variazioni di permeabilità verso valori più elevati in corrispondenza di facies a componente limoso-sabbiosa non trascurabile, sempre possibili; tuttavia la permeabilità generalmente bassa del complesso nel suo insieme riduce la possibilità che questi orizzonti a permeabilità relativamente più elevata possano costituire degli acquiferi significativi.

L'andamento del carico idraulico va gradualmente crescendo fino a un massimo di circa 30 m in corrispondenza dell'innesto sull'asse di linea.

A livello di rischi potenziali di natura idrogeologica non si segnalano problemi di rilievo.

#### 8.5 Rischi potenziali

Data la ridotta estensione della galleria e il carico litostatico relativamente basso, l'unica potenziale criticità è rappresentata dalla possibile presenza di manifestazioni gassose, con un livello di rischio basso.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 9 FASE DI DIAGNOSI

Nella fase di diagnosi, sulla base del modello geotecnico scaturito dagli studi e dalle indagini effettuati nella fase conoscitiva, si procede alla previsione della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione. La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS (Rif. [18]), 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 (Rif. [18]) la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una uscita laterale dell'uscita laterale della 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 dell'uscita laterale della Galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

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

#### Categoria A: nucleo-fronte stabile

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

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

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità, a seguito delle operazioni di scavo, raggiunge la resistenza dell'ammasso. I fenomeni deformativi tensionali sono di tipo elasto-plastico, di maggiore entità rispetto al caso precedente. Nell'ammasso può prodursi una eventuale riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri residui. La risposta tensio-

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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**

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

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

Tali valutazioni sono state condotte con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni.

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 tensione radiale agente sul contorno del profilo di scavo, espressa in funzione del tasso di deconfinamento  $\lambda$  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 dell'uscita laterale 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.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

Ove necessario, per la definizione del comportamento deformativo dell'uscita laterale della Galleria in funzione della distanza dal fronte, si è utilizzato il Nuovo Metodo Implicito (NMI) (Rif. [19, 20]). 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 2 - Sezioni analizzate con il metodo delle curve caratteristiche: dati di input**

Sezione di analisi	Unità	pk	Z <sub>0</sub>	h <sub>w</sub>	σ <sub>0</sub>	p <sub>w0</sub>	p <sub>wR</sub>	R <sub>w</sub>	γ	c' <sub>k</sub>	φ' <sub>k</sub>	c <sub>u k</sub>	E <sub>k</sub>	E <sub>u k</sub>
		[km]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	TRV	4+320	113	28	2.4	0.25	-	-	22	0.177	18	0.224	450	-

Z<sub>0</sub> = copertura rispetto al piano dei centri dell'uscita laterale della Galleria  
h<sub>w</sub> = carico idraulico  
σ<sub>0</sub> = tensione totale iniziale al livello del cavo  
p<sub>w0</sub> = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
p<sub>wR</sub> = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
R<sub>w</sub> = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce p<sub>w0</sub>  
γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
c'<sub>k</sub> = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso  
φ'<sub>k</sub> = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso  
c<sub>u k</sub> = valore caratteristico della coesione non drenata  
E<sub>k</sub> = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso  
E<sub>u k</sub> = valore caratteristico del modulo elastico non drenato dell'ammasso  
Le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una uscita laterale della Galleria di raggio equivalente R<sub>eq</sub> pari a 2.69.

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

### Risultati delle analisi

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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

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

valori della preconvergenza, di circa 4.34 cm per copertura pari a 110 m. In entrambi i casi i suddetti valori indicano un comportamento elasto-plastico del fronte. Il valore di raggio plastico risulta essere pari a 6.05m, mentre la convergenza finale della cavità presenta valori di circa 18 cm alla copertura di 110metri.

**Tabella 3 - Risultati delle analisi**

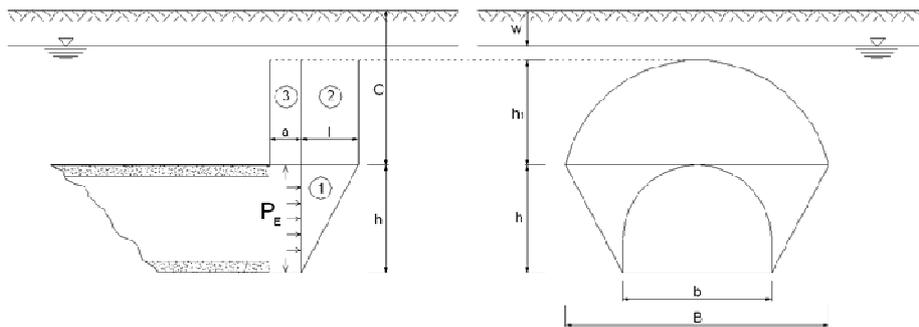
Sezione di analisi	$u_F$	$u_F / R_{eq}$	$R_{PF}$	$R_{PF} / R_{eq}$	$u_\infty$	$R_P$	Criterio $u_F / R_{eq}$	Criterio $R_{pl F} / R_{eq}$
	[m]	[%]	[m]	[-]	[m]	[m]		
1	0.043	1.6	6.05	2.25	0.18	4.70	B	C
$u_F$ = convergenza al fronte (soluzione cavità sferica) $R_{PF}$ = raggio plastico al fronte $u_\infty$ = convergenza finale del cavo $R_P$ = raggio plastico finale al contorno del cavo $R_{eq}$ = raggio di scavo equivalente dell'uscita laterale della Galleria (vedi tabella precedente)								

## 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, Rif. [21]) 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 11, 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 11 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984)**

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

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

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

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

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

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

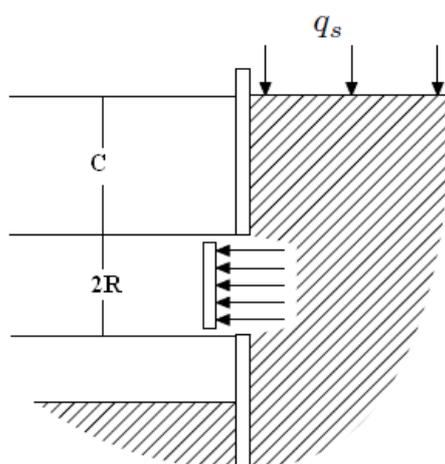
$$FS_3 = \frac{2\tau_{m3}}{(\gamma Z - P_E)} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$$

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

### Metodo di Broms e Bennermark (1967)

Broms e Bennermark (Rif. [22]) 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 12).



**Figura 12 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Broms & Bennermark (Broms et al., 1967 (Rif. [22]))**

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

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

dove:

- $\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno
- $z$  = profondità dell'asse dell'uscita laterale della Galleria
- $\sigma_s$  = sovraccarico eventualmente presente in superficie
- $\sigma_T$  = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte
- $c_u$  = resistenza al taglio, in condizioni non drenate, alla profondità dell'uscita laterale 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:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 4 - 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

I metodi all'equilibrio limite sono stati impiegati nell'analisi delle sezioni a basse coperture, ovvero a 15 metri ed a 25 metri. Dal momento che lo scavo interessa terreni di natura coesiva, si è proceduto all'analisi della stabilità del fronte considerando le due configurazioni limite di condizioni drenate e non drenate.

In Tabella 5 e

Tabella 6 sono riepilogati tutti i dati di input utilizzati nelle analisi.

**Tabella 5 - 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 <sub>1</sub>	γ <sub>1</sub>	γ <sub>2</sub>	c' <sub>1</sub>	c' <sub>2</sub>	φ' <sub>m</sub>
		[km]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[kPa]	[°]
1	TRV	4+256	110	6.1	5.3	4.5	10	21	21	30	30	22
2	TRV	3+326	110	6.1	5.3	4.5	10	21	21	30	30	22

z = copertura rispetto alla calotta dell' Uscita laterale della Galleria

b = larghezza dello scavo

h = altezza dello scavo

h<sub>1</sub> = altezza sopra la calotta dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria del meccanismo di collasso (se Z/h < 3, h<sub>1</sub> = Z)

W = profondità superficie piezometrica da piano campagna

γ<sub>1</sub> = peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h<sub>1</sub>)

γ<sub>2</sub> = peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)

c'<sub>1</sub> = valore caratteristico medio della coesione al fronte (su h)

c'<sub>2</sub> = valore caratteristico medio della coesione dalla calotta fino a h<sub>1</sub>

φ'<sub>m</sub> = valore caratteristico medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h<sub>1</sub>

L'analisi è stata svolta considerando:

K<sub>0</sub> = coefficiente di spinta a riposo = 0.62 (TRV)

K<sub>a</sub> = coefficiente di spinta attiva = 0.45 (TRV)

a = lunghezza non sostenuta = 1.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

**Tabella 6 - Sezione analizzate col metodo di Broms e Bennermark per l'analisi di stabilità del fronte di scavo**

Sezione di calcolo	Formazione	pk.	z	$\sigma_s$	$\gamma$	$\sigma_T$	$C_{uk}$
		[km]	[m]	[kPa]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[kPa]
1	TRV	4+256	15	-	21	-	85.05
2	TRV	3+326	25	-	21	-	85.05

$z$  = profondità dell'asse dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria  
 $\sigma_s$  = sovraccarico eventualmente presente in superficie  
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno  
 $\sigma_T$  = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte  
 $C_u$  = peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su  $h_1$ )

### 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  $FSF$  e  $FS_3$  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 7: Criterio per la definizione della categoria di comportamento**

$FS = \min (FSF; FS_3)$	<u>Classe di comportamento</u>
$\geq 2$	<u>A</u>
$< 2$ e $\geq 1,5$	<u>B</u>
$< 1,5$	<u>C</u>

Dai risultati ottenuti con il metodo di Tamez è stato possibile ottenere, nel TRV, per la copertura di 15 m un valore del coefficiente di sicurezza della stabilità del fronte pari a 1.33 che indica una classe di comportamento di tipo C.

Nel caso di copertura pari a 25 m dal metodo di Tamez è stato possibile ottenere un coefficiente di sicurezza pari a 1.22 che indica una classe di comportamento di tipo C.

Dalle analisi di Broms e Bennermark è stato possibile ottenere, nel TRV, per la copertura di 15 metri, un numero di stabilità pari a 2.2 che indica deformazioni attese in campo elasto-plastico, mentre, per la copertura di 25 metri, un numero di stabilità pari a 1.8 che indica deformazioni attese in campo elasto-plastico.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 10 FASE DI TERAPIA

Nel presente capitolo sono definiti gli interventi necessari per garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine, in accordo con le indicazioni provenienti dalla fase conoscitiva e dall'analisi del comportamento allo scavo in assenza di interventi (fase di diagnosi).

### 10.1 Scelta del metodo di scavo

Nella uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria in esame è stato scelto il metodo di scavo tradizionale. Tale scelta è dovuta principalmente ai costi di investimento, per quanto riguarda la lunghezza dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria naturale, che non giustificerebbero la scelta del metodo di scavo meccanizzato.

### 10.2 Scavo in tradizionale

#### Definizione delle sezioni tipo

Sono state definite diverse sezioni tipo, intese come complesso di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione e relative tecnologie esecutive.

#### Sezione FC2

La sezione tipo C2 si compone di un consolidamento al fronte dato da 19 VTR di lunghezza 18 m e quindi sovrapposizione di 8 m. Al contorno sono presenti 29 VTR cementati con miscele espansive, a passo 0.30 m e lunghezza complessiva di 15 m.

Il pririvestimento è composto da 2 centine IPN180 a passo 1.00 m e spritz beton di spessore 25 cm.

Il rivestimento definitivo, a sezione variabile, presenta rispettivamente, in calotta ed ai piedritti, uno spessore di circa 60 cm. Per quanto riguarda l'arco rovescio, lo spessore risulta pari a 70 cm.

#### Sezione FC2v

La sezione tipo C2v si compone di un consolidamento al fronte dato da 19 VTR di lunghezza 20 m e quindi sovrapposizione di 11.50 m. Al contorno sono presenti 29 VTR cementati con miscele espansive, a passo 0.30 m e lunghezza complessiva di 17 m.

Il pririvestimento è composto da 2 centine IPN180 a passo 1.00 m e spritz beton di spessore 25 cm.

Il rivestimento definitivo, a sezione variabile, presenta in calotta uno spessore di circa 115 cm. Per quanto riguarda l'arco rovescio, lo spessore risulta pari a 60 cm.

**Tabella 8: Sintesi caratteristiche sezioni di scavo e consolidamento**

Sezione Tipo	Area di scavo	Lunghezza campo	Interventi di precontenimento e presostegno		
			interventi al fronte	interventi al contorno	drenaggi
[-]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[-]	[-]	[-]
F-C2	22	10.00	19±20% elementi strutturali in VTR, L=18m sovrapposizione 8m, cementati con miscele cementizie	29±20% elementi strutturali in VTR, L=15m, sovrapposizione 5m, passo 0.30m, cementati con miscele cementizie	2+2 tubi microfessurati in PVC L=30m sovrapposizione 10m
F-C2V	22	8.50	19±20% elementi strutturali in VTR, L=20m sovrapposizione 11.50m, cementati con miscele cementizie	29±20% elementi strutturali in VTR, L=17m, sovrapposizione 8.50m, passo 0.30m, cementati con miscele espansive+ 15 tubi in acciaio cementati φ127mm sp.10mm L=14m, sovrapposizione 5.5m, passo 0.40m	2+2 tubi microfessurati in PVC L=30m sovrapposizione 13m

#### Risultati delle analisi con il metodo delle linee caratteristiche

Nelle seguenti tabelle sono riportati i parametri di progetto adottati nelle analisi (corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2 – SLU GEO) considerando gli interventi di consolidamento al fronte per la copertura di 110 m.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

**Tabella 9 – Interventi di consolidamento al fronte**

Sez.	$N_{VTR}$	$L_A$	$\phi_{perf}$	$\tau_{b,k}$	$\sigma_{3,A}^{VTR}$	$A_T$	$f_{t,k}$	$\sigma_{3,B}^{VTR}$	$\sigma_3^{VTR}$	$\Delta c'$
[-]	[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m <sup>2</sup> ]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
C2 ( $\varphi' = 18^\circ$ )	19	8	0,11	150	109,57	0,00283	800000	597,65	109,57	70,85

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

$L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR

$\phi_{perf}$  = diametro di perforazione

$\tau_{b,k}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno

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

$A_T$  = area del VTR

$f_{t,k}$  = resistenza a trazione del VTR

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

$\sigma_3^{VTR}$  = tensione minima resistente al fronte

$\Delta c$  = resistenza drenata di progetto equivalente indotta dall'intervento di consolidamento al fronte

**Tabella 10 – Risultati delle analisi in presenza di interventi**

Sezione di analisi	$u_F$	$u_F/R_{eq}$	$R_{PF}$	$R_{PF}/R_{eq}$
	[m]	[%]	[m]	[-]
SLU GEO – interventi – 110 metri	0.022	0.82	4.7	1.75
$u_F$ = convergenza al fronte $R_{PF}$ = raggio plastico al fronte $R_P$ = raggio plastico finale al contorno del cavo $R_{eq}$ = raggio di scavo equivalente dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria				

L'analisi eseguita in presenza di interventi dimostra l'effetto del consolidamento al fronte, in quanto anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2 (SLU GEO), essi consentono di contenere le convergenze al fronte e di ridurre la fascia di terreno plasticizzato al contorno del cavo.

#### Risultati delle analisi di stabilità del fronte

Per quanto riguarda i risultati derivanti dalle analisi di stabilità del fronte, è stato adoperato, in fase di terapia, l'approccio di calcolo A2+M2 abbattendo i parametri meccanici del terreno di 1.25.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>	FOGLIO <b>33 di 73</b>

Dalle analisi di Tamez, riportate in allegato, si è ottenuto ad una copertura di circa 15 metri dall'asse dell'uscita lateraledell'uscita lateraledella Galleria un valore del coefficiente di sicurezza di circa 2.63 ed una corrispondente categoria di comportamento pari ad A. Per la copertura di 25 metri si è ottenuto un valore del coefficiente di sicurezza di circa 1.56 ed una corrispondente categoria di comportamento pari a B.

Per quanto riguarda le analisi di stabilità al fronte con il metodo di Broms e Bennemark, si è ottenuto, nel TRV, per 15 metri di copertura, un numero di stabilità pari a 1.5 che indica deformazioni attese in campo elastico, mentre, per 25 metri di copertura, un numero di stabilità pari a 3 che indica deformazioni attese in campo elasto-plastico.

Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle sezioni tipo si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico" (Rif. [17]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

### 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.

#### Interventi di precontenimento

<b>Elementi in vetroresina</b>	
Resistenza a trazione caratteristica	$f_{tk} \geq 800 \text{ MPa}$
Resistenza a taglio	$\tau \geq 120 \text{ MPa}$
Diametro di perforazione	$> 100 \text{ mm}$

<b>Acciaio per infilaggi al contorno (Sez. B2, C2v)</b>	
Tipo	S 355
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} \geq 338 \text{ MPa}$

### Rivestimento provvisorio

<b>Calcestruzzo proiettato (fibrorinforzato)</b>	
Classe di resistenza	C 25/30
Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni	$f_{cd} = f_{ck}/1,5 = 16,66 \text{ MPa}$
Modulo elastico a 28 giorni	$E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0,3} = 31447 \text{ MPa}$

<b>Acciaio per centine</b>	
Tipo	S 275
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} \geq 261 \text{ MPa}$

### Rivestimenti definitivi

<b>Calcestruzzo armato</b>	
Classe di resistenza di calcolo	C 25/30 (calotta) C30/37 (arco rovescio)
Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni	$f_{cd} = 0,85 f_{ck}/1,5 = 14,17 \text{ MPa}$
Modulo elastico a 28 giorni	$E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0,3} = 31476 \text{ MPa}$
Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018)	$\sigma_c = 0,6 f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 11,25 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente

Relazione geotecnica e di calcolo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40 D 07	CL	GN 04 00 001	B	36 di 73

**Acciaio per barre di armatura**

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 10.4 Analisi e verifica delle sezioni tipo

Le soluzioni progettuali descritte nel capitolo precedente sono state analizzate per verificarne adeguatezza ed efficacia, con riferimento al modello geotecnico illustrato nel 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. In Tabella 11 sono riepilogate le analisi eseguite:

**Tabella 11 - Sezioni di analisi fasi di terapia**

Analisi n.	Sezione	progressiva	formazione	Condizione analisi
1	C2	4+320	TRV	NON DRENATE / DRENATE
2	C2V	4+900	TRV	NON DRENATE / DRENATE

### 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).

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

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

con:

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

Relazione geotecnica e di calcolo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40 D 07	CL	GN 04 00 001	B	38 di 73

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

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

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

dove:

- $\tau_{b,k}$  = tensione di aderenza all'interfaccia con il terreno,
- $L_A$  = lunghezza utile dell'elemento,
- $p_A$  = perimetro dell'interfaccia con il terreno,
- $f_{t,k}$  = resistenza a trazione dell'elemento in VTR,
- $A_T$  = sezione resistente a trazione dell'elemento in VTR
- $A_i$  = area di influenza del singolo elemento di consolidamento.

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

Per 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:

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

- 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.

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 mediante il codice di calcolo PLAXIS 2D.

In tale tipologia di analisi lo scavo dell'uscita laterale dell'uscita laterale 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 dell'uscita laterale della Galleria è ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti. Nel caso di sezioni con campo di avanzamento tronco-conico, per la definizione della geometria della sezione di scavo si è fatto riferimento alla sezione media. Congruentemente, i rivestimenti definitivi di calotta (a carpenteria variabile) sono verificati secondo lo spessore medio.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

L'effetto dei consolidamenti del 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 in corrispondenza del fronte.

Per gli interventi di precontenimento al contorno l'effetto dei consolidamenti è tenuto in conto direttamente nei modelli numerici, simulando un arco di materiale al contorno dello scavo avente proprietà meccaniche incrementate, in funzione del tipo di intervento in progetto, rispetto a quelle del terreno non trattato.

In particolare, nel volume di terreno consolidato i parametri di resistenza possono essere definiti, adottando il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, a partire dalla resistenza a compressione uniassiale del materiale consolidato,  $\sigma_c$  (requisito di progetto da verificare in sito) con la seguente relazione, nella quale l'angolo d'attrito  $\varphi'_k$  rimane immutato e l'effetto del trattamento è legato ad un incremento della coesione ( $\Delta c_k$ ):

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot \Delta c'_k \cdot \cos \varphi'_k}{(1 - \sin \varphi'_k)}$$

Sia la geometria, sia i parametri meccanici del terreno naturale sono requisiti di progetto che devono essere verificati con campo prova e in fase realizzativa.

Gli eventuali interventi di presostegno realizzati mediante elementi metallici al contorno non sono modellati nelle analisi ed il relativo effetto è pertanto trascurato. Le verifiche strutturali di tali elementi sono condotte a partire dal valore della pressione in calotta derivante dall'analisi numerica nella configurazione ad 1,0 m dal fronte (configurazione più gravosa corrispondente alla massima lunghezza non sostenuta). Nello specifico le verifiche strutturali sugli elementi di presostegno sono condotte calcolando tali elementi come travi incastrate ai due estremi, rappresentati da un lato dall'ultima centina installata e dall'altro dal fronte stesso. La luce di calcolo si definisce come:

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

dove:

$\delta$  = interasse centine;

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

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

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

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

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

Le strutture di rivestimento provvisorio dell'uscita laterale della Galleria sono simulate con elementi beam elastico-lineari, con proprietà di rigidità ed inerzia definite considerando la sola sezione di spritz-beton, trascurando il contributo delle centine. In fase di verifica degli elementi strutturali, le sollecitazioni ottenute dalla modellazione (previa applicazione dei coefficienti parziali di Normativa) sono gestite ripartendo lo sforzo

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

normale (N) tra centine e spritz-beton in base alle rigidzze assiali relative, mentre il taglio (T) e il momento flettente (M) sono assegnati interamente alle centine.

Lo spritz-beton è verificato a semplice compressione secondo la seguente disuguaglianza (in accordo con il D.M. 17/01/2018):

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

dove:

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

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

$N_{Sd}$  rappresenta lo sforzo normale di calcolo;

$A_{sb}$  rappresenta l'area resistente dello spritz-beton;

$E_{sb} \cdot A_{sb}$  rappresenta la rigidezza assiale dello spritz-beton;

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

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

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

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

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

dove:

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

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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

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

Le strutture di rivestimento definitivo dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria sono simulate con elementi "plate".

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

### 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 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 dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria, ricavata a partire dall'azione sismica di progetto.

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 partire 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 &

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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

con:

- $\gamma_{\text{ref}} = \tau_{\max} / G_{\max}$  deformazione di riferimento;
- $G_{\max}$  modulo di deformazione al taglio iniziale  $G_{\max} = \rho \cdot V_s^2$
- $\tau_{\max}$  tensione tangenziale massima;
- $\gamma$  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 ( $\tau_{\max}$ ), 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  $\gamma_h$ . 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):

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

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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

Il livello di deformazione indotto dal sisma è quello associato al valore di  $\tau_{\max, \text{sis}}$  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:

**Tabella 12 – Parametri per la definizione dell'azione sismica per le sezioni considerate**

	<b>Sezione C2</b>
Formazione	TRV
Progressiva	4+320
Coperture [m]	25
$P_{VR}$ [%]	5
$V_N$ [anni]	50
$c_U$ [-]	1,5
$V_R$ [anni]	75
$T_R$ [anni]	2193
ag [g]	0,099
$F_0$ [-]	2,75
Categoria di sottosuolo	A
$S_s$ [-]	1,5
Categoria topografica	T1
$S_T$ [-]	1
$a_{\max}$ [g]	0,148

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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 uscita laterale dell'uscita laterale della 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.

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 dell'uscita laterale dell'uscita laterale della Galleria nell'ipotesi di perfetta aderenza al contatto terreno-rivestimento:

$$M_{\max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r^2 \gamma_{\max} \quad N_{\max} = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} r \gamma_{\max}$$

Dove:

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

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

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

$$F = \frac{E_m (1-\nu_i^2) r^3}{6E_t I (1+\nu_m)}$$

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



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

Relazione geotecnica e di calcolo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40 D 07	CL	GN 04 00 001	B	47 di 73

fessure tale da non compromettere la durabilità dell'opera e imponendo limiti tensionali sia per l'acciaio che per il calcestruzzo.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA RS3U	LOTTO 40 D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 04 00 001	REV. B

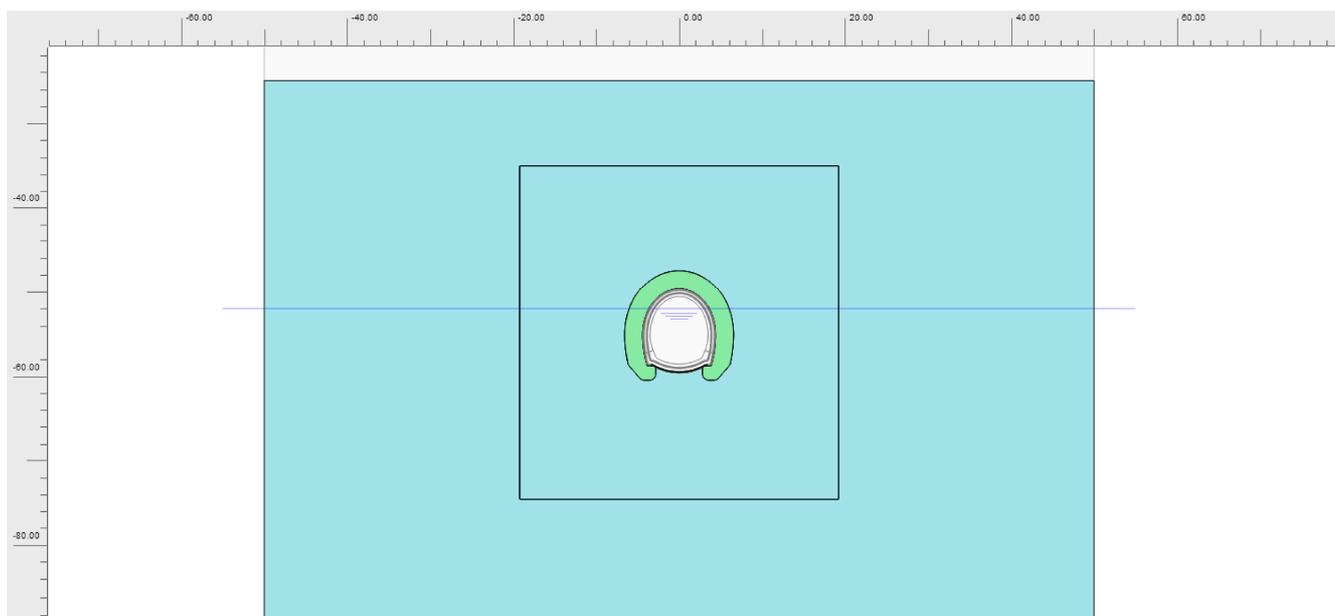
#### 10.4.2 Analisi n. 1 - Sezione di calcolo pk 4+856

##### Interazione opera-terreno

Si riportano nel seguito l'analisi numerica e le verifiche strutturali per il dimensionamento della sezione relativa alla uscita laterale della Galleria di linea posto alla pk 4+856 e realizzata con sezione tipo C2.

##### *Modello geotecnico*

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi prevede la Formazione di Terravecchia (TRV). Lo scavo dell'uscita laterale della Galleria interessa la litologia TRV (vedi figura seguente). Il livello piezometrico è posto a 85 metri dal piano campagna quindi a circa 28 metri dal piano dei centri dell'uscita laterale della Galleria .



**Figura 13 – Modello geotecnico**

La tabella seguente 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 di fase conoscitiva, Cap.8.

**Tabella 13 – Sezione geotecnica di calcolo**

<i>Stratigrafia di calcolo</i>		C	Superficie piezometrica	$\gamma$	c' <sub>k</sub>	$\phi'$ <sub>k</sub>	E'	K <sub>0</sub>
<i>Formazione</i>	<i>Profondità da p.c.</i>							
[-]	[m da p.c.]	[m]	[m] da calotta	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
TRV	113	110	85	21	31	22	450	0.62
<i>C = copertura (rispetto alla calotta)</i> <i><math>\gamma</math> = peso di volume</i>								

Relazione geotecnica e di calcolo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40 D 07	CL	GN 04 00 001	B	49 di 73

$c'k$  = coesione drenata  
 $\varphi'k$  = angolo di attrito interno  
 $E'$  = modulo elastico  
 $K0$  = coefficiente di spinta a riposo

Al fine di simulare gli interventi di precontenimento al contorno, attorno al cavo è prevista una coronella di materiale iniettato di spessore 2.5 m e avente modulo elastico e coesione pari a 2 volte quella del terreno naturale. L'angolo di attrito resta invece invariato.

### Modello geometrico

La mesh di calcolo è opportunamente intensificata nelle zone di maggiore interesse in corrispondenza dell'uscita laterale della Galleria, in modo da seguire il più fedelmente possibile le geometrie locali delle strutture. Lateralmente ed inferiormente il modello è vincolato con carrelli. La griglia presenta un'estensione laterale di 50 m (per una larghezza totale di 100 m) e un'altezza complessiva di 85 m (vedi figura seguente); i bordi sono stati collocati sufficientemente lontani dall'uscita laterale della Galleria (a distanza  $> 5D$  con  $D$  = diametri dell'uscita laterale della Galleria), in modo tale che le condizioni di vincolo ivi definite non influenzino la modellazione.

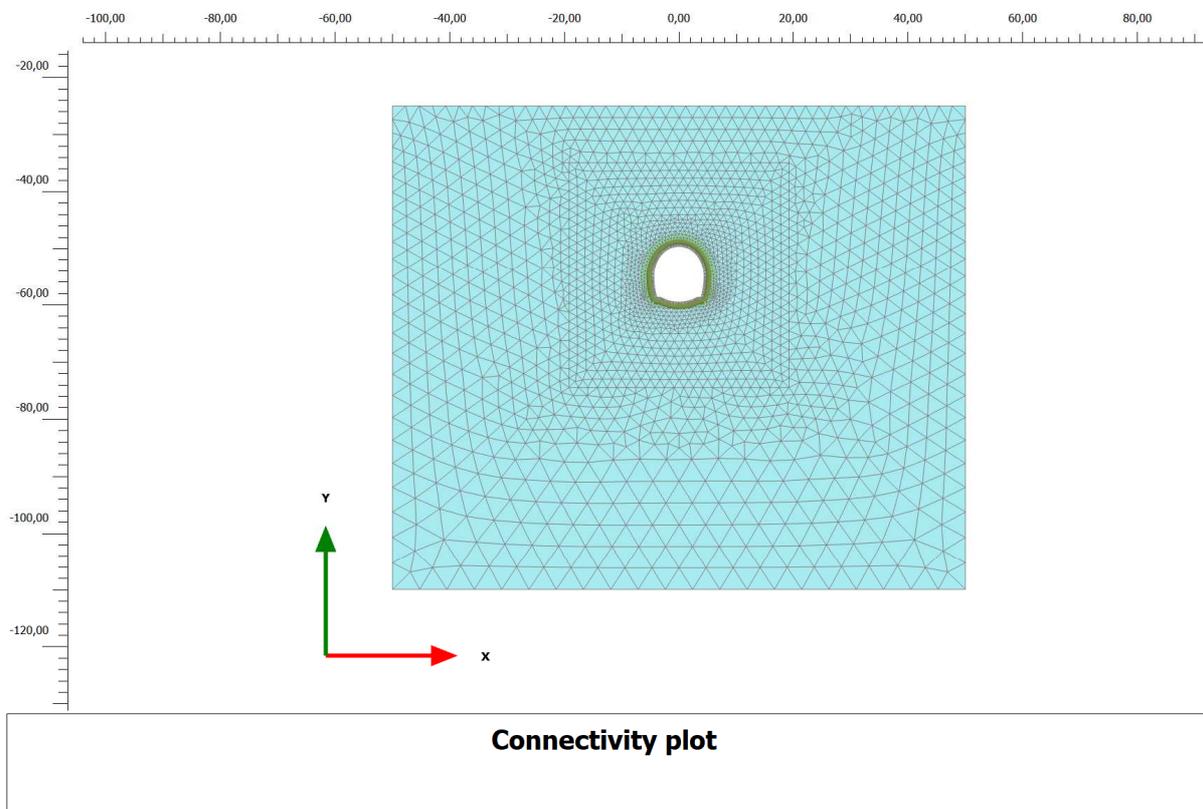


Figura 14 – Modello di calcolo – Geometria della mesh

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

Il rivestimento di prima fase è stato simulato utilizzando elementi tipo “plate”, aventi modello costitutivo elastico lineare. Il modello costitutivo dell’ammasso è elasto-plastico con criterio di resistenza di “Mohr-Coulomb”.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento provvisorio della sezione analizzata:

**Tabella 14 – Caratteristiche del rivestimento provvisorio**

<i>Caratteristiche</i>	<i>Spritz beton / Centine</i>
<i>Spessore dello spritz beton [m]</i>	<i>0.25</i>
<i>Tipologia profilati</i>	<i>2 IPN180</i>
<i>Interasse longitudinale profilato [m]</i>	<i>1.00</i>
<i>Area resistente della centina <math>A_{cent}</math> [cm<sup>2</sup>]</i>	<i>27.90</i>
<i>Modulo resistente elastico della centina <math>W_{cent}</math> [cm<sup>3</sup>]</i>	<i>161</i>
<i>Momento d’inerzia <math>I_{cent}</math> [cm<sup>4</sup>]</i>	<i>1450</i>

Il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato è stato simulato tramite elementi di mesh ed elementi “ghost” aventi i parametri di rigidezza riportati in tabella:

**Tabella 15 – Parametri di calcolo delle strutture in C.A.**

<i>Elemento strutturale</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>Peso Specifico (kNm<sup>3</sup>)</i>	<i>Coefficiente di Poisson (-)</i>
<i>C.A. (Arco Rovescio)</i>	<i>32837</i>	<i>25.00</i>	<i>0.20</i>
<i>C.A. (Calotta e piedritti)</i>	<i>31476</i>	<i>25.00</i>	<i>0.20</i>

**Tabella 16 – Parametri di calcolo degli elementi “ghost” inseriti all’interno gli elementi di mesh delle strutture in C.A.**

<i>Opera</i>	<i>Elemento strutturale</i>	<i>Spessore reale (m)</i>	<i>EA (kN/m)</i>	<i>EI (kNm<sup>2</sup>/m)</i>	<i>Coefficiente di Poisson</i>
<i>GN</i>	<i>Calotta</i>	<i>0.60</i>	<i>18.8855</i>	<i>5.67E-01</i>	<i>0.20</i>
<i>GN</i>	<i>Piedritti</i>	<i>0.60</i>	<i>22.9856</i>	<i>9.39E-01</i>	<i>0.20</i>
<i>GN</i>	<i>Arco rovescio</i>	<i>0.70</i>	<i>18.8855</i>	<i>5.67E-01</i>	<i>0.20</i>

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

### *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 dell' uscita laterale 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").

In via cautelativa, lo scavo dell'uscita laterale della Galleria è stato simulato in quattro fasi, attribuendo alla fase di pre-convergenza un tasso di rilascio del 50%, seguito da un rilascio del 79% delle forze di scavo al fine di simulare lo sfondo pari ad 1 m, successivamente si rilascia fino al 92% sui priverestimenti, e del 93% nella fase in cui si installano arco rovescio e murette e infine, un tasso di rilascio del 100% dopo l'installazione della calotta.

Dopo aver determinato il valore di pre-convergenza al fronte è stato possibile risalire, attraverso il software di calcolo, al corrispondente tasso di rilascio, impiegato successivamente per la taratura della curva di Panet.

I suddetti valori del tasso di rilascio sono stati ottenuti dalla curva di Panet, precedentemente tarata, impiegando un fattore di stabilità  $N_s=3$ , calcolato considerando il rapporto tra la tensione verticale litostatica e la resistenza al taglio non drenata.

Tale fattore di stabilità risulta conforme ed, al contempo, cautelativo per la profondità di scavo considerata.

Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine in cui si elimina il priverestimento e si annulla l'effetto di incremento di modulo elastico e coesione della coronella in calotta.

Infine si esegue una fase di consolidazione al fine di ripristinare la condizione di pressione idrostatica dell'acqua, ovvero si annullano le sovra-pressioni interstiziali generate dallo scavo.

**Tabella 17 – Fasi di calcolo**

<b>Fase</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Rilascio forze di scavo</b>
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)	-
<b>SCAVO</b>		
3	Formazione della coronella in calotta	-
4	Preconvergenza del fronte	0.50
5	Simulazione della convergenza dovuto allo sfondo di 1.00 m	0.79
6	Installazione del rivestimento di prima fase (4 m dal fronte)	0.92

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

7	Installazione di murette e arco rovescio (6 m dal fronte di scavo)	0.93
8	Installazione del rivestimento definitivo di calotta	1.00
<b>LUNGO TERMINE</b>		
9	Rimozione del priverestimento e della coronella consolidata in calotta	-
10	Fase di consolidazione al fine di annullare le sovra-pressioni interstiziali	-

#### *Analisi e commento dei risultati*

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative all'analisi della sezione C2. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per le fasi di calcolo più rappresentative. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima.

#### FASE 4

Viene simulato il rilascio a cavo libero del fronte dell'uscita laterale della Galleria. Il campo degli spostamenti mostra spostamenti verticali pari a circa 1.6 cm in calotta e 1.9 cm in arco rovescio, mentre gli spostamenti orizzontali in piedritto sono pari a circa 1.7 cm. Al contorno dell'uscita laterale della Galleria, in particolare nella zona in corrispondenza dei piedritti è presente una fascia di zone plasticizzate di estensione pari a circa 3.20 m.

#### FASE 5

Viene simulato il rilascio tensionale dovuto allo sfondo di 1.00 m dell'uscita laterale della Galleria. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.2 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.3 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.2 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto si estende ulteriormente fino a raggiungere circa 4.80 m.

#### FASE 6

Viene simulata l'installazione del rivestimento di prima fase dell'uscita laterale della Galleria di sinistra, si considera una posizione dal fronte di circa 4.00 m. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.3 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.7 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.7 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto si estende ulteriormente fino a raggiungere circa 5.00 m.

#### FASE 7

Viene simulata l'installazione dell'arco rovescio e delle murette del rivestimento definitivo, considerando una posizione dal fronte di circa 6 m. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.4 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.7 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.7 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto si estende ulteriormente fino a raggiungere circa 5.00 m. Gli spostamenti

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

cumulati, così come le plasticizzazioni, non subiscono variazioni significative rispetto alla precedente fase di analisi.

#### FASE 8

Viene simulato il completamento del rivestimento definitivo con la realizzazione di piedritti e calotta. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.4 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.7 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.7 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto si estende ulteriormente fino a raggiungere circa 5.00 m.

#### FASE 9

Viene simulato il decadimento completo sia del priverivestimento che della coronella al contorno della calotta. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.4 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.7 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.7 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto si estende ulteriormente fino a raggiungere circa 5.00 m.

#### FASE 10

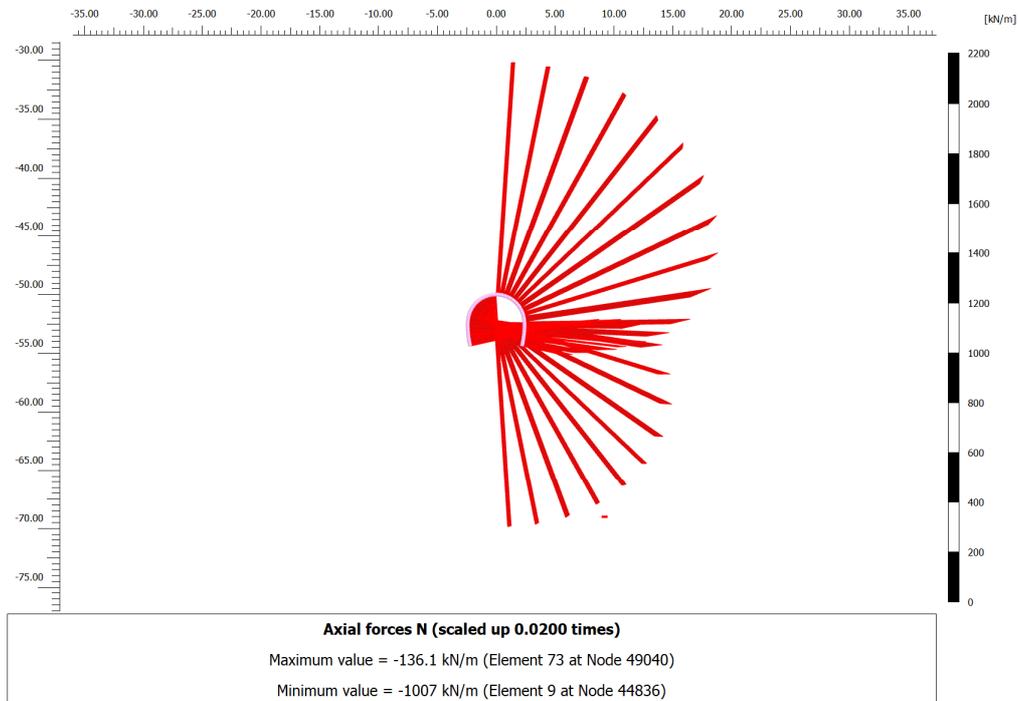
Viene simulata la condizione di lungo termine attraverso una analisi accoppiata fluido-meccanica. Si effettua quindi una fase di calcolo di consolidazione al fine di dissipare le sovra-pressioni in eccesso causate dalla realizzazione dello scavo. Lo spostamento verticale in calotta è dell'ordine di 3.4 cm mentre in arco rovescio è di circa 3.7 cm, mentre lo spostamento orizzontale ai piedritti è pari a circa 4.7 cm. In questa fase l'area plasticizzata nella zona del piedritto non subisce variazioni.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

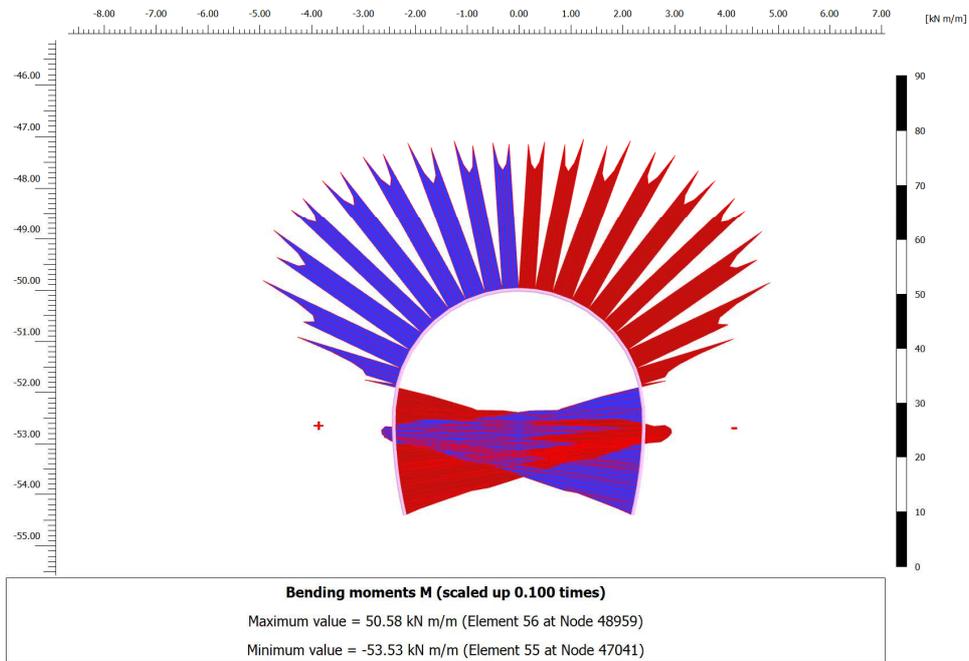
*Verifiche strutturali SLU del rivestimento di prima fase*

La verifica strutturale (SLU STR) del priverivestimento 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. In particolare, le sollecitazioni ottenute dalla modellazione (previa applicazione dei coefficienti parziali di Normativa) sono gestite ripartendo lo sforzo normale (N) tra centine e spritz-beton in base alle rigidzze assiali relative, mentre il taglio (T) e il momento flettente (M) sono assegnati interamente alle centine. Lo spritz-beton è verificato a semplice compressione. Le verifiche sono realizzate secondo la normativa vigente NTC2018.

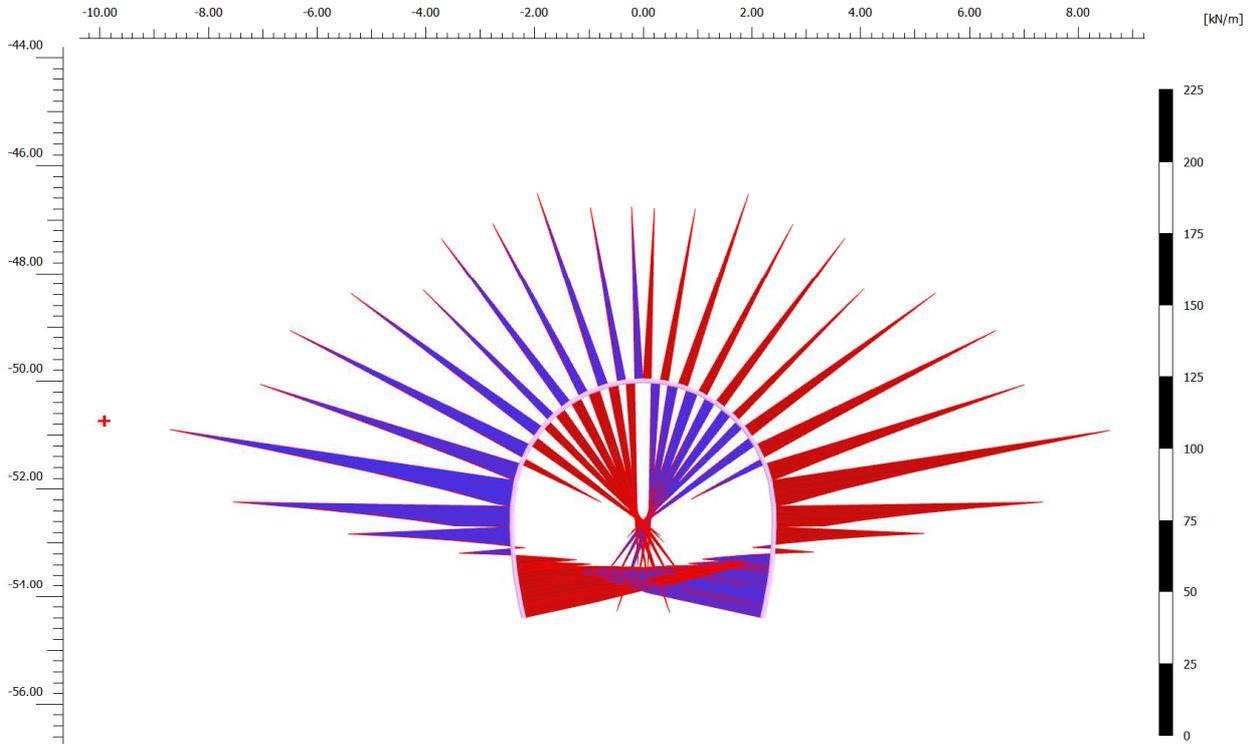
Le verifiche sul rivestimento provvisorio interessano le FASI 6 e 7 dell'analisi numerica.



**Figura 15 – Andamento sforzo normale (FASE 6)**



**Figura 16 – Andamento Momento flettente (FASE 6)**



**Shear forces Q (scaled up 0.0500 times)**

Maximum value = 128.9 kN/m (Element 41 at Node 45102)

Minimum value = -126.4 kN/m (Element 42 at Node 47200)

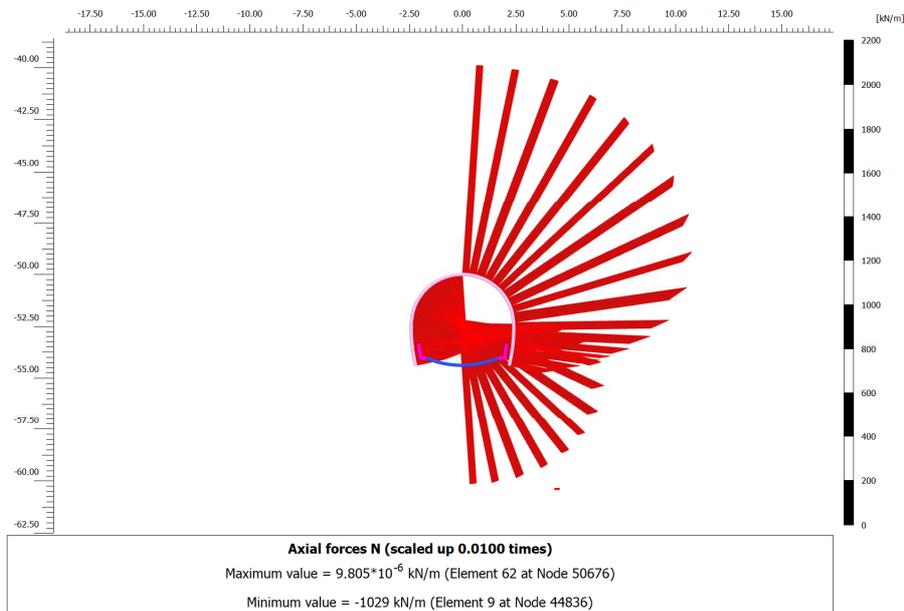
**Figura 17 – Andamento taglio (FASE 6)**

**Tabella 18 – Rivestimento di prima fase (FASE 6)**

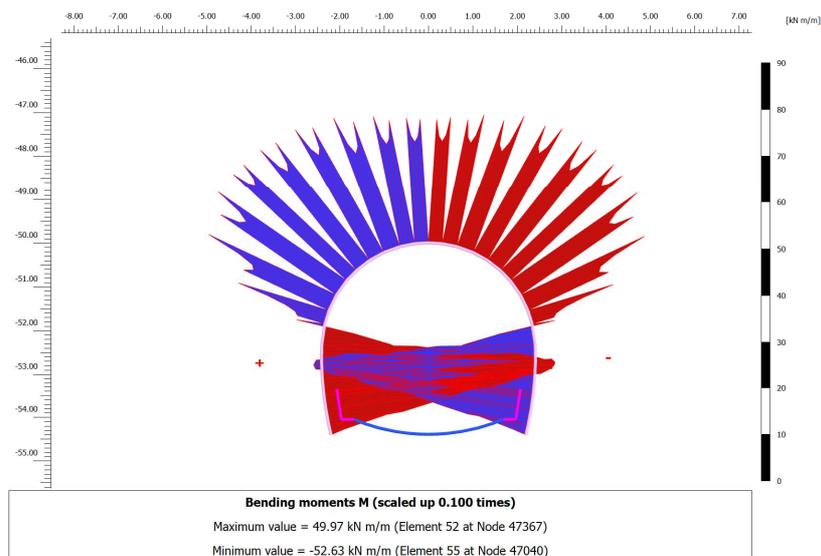
Nodo	Sollecitazioni di calcolo SLU				Verifica centina				Verifica spritz-beton	
	N <sub>Sd, sb</sub>	N <sub>Sd, cent</sub>	V <sub>Sd, cent</sub>	M <sub>Sd, cent</sub>	σ <sub>cent, d, max</sub>	τ <sub>cent, d</sub>	σ <sub>id, cent, d</sub>	Esito Verifica	σ <sub>sb, d, max</sub>	Esito Verifica
[-]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kNm/ml]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]	
45752	1123.1	167.2	64.9	37.1	145.2	26.1	152.1	VERIF.	4.5	VERIF.
45872	787.0	117.2	54.0	46.5	165.3	21.7	169.6	VERIF.	3.1	VERIF.
47358	749.8	111.7	50.3	46.3	163.7	20.2	167.4	VERIF.	3.0	VERIF.
49040	153.9	22.9	27.3	0.0	4.1	11.0	19.5	VERIF.	0.6	VERIF.

52365	175.0	26.1	42.8	0.0	4.7	17.2	30.2	VERIF.	0.7	VERIF.
-------	-------	------	------	-----	-----	------	------	--------	-----	--------

Le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche per ogni nodo dei privestimenti sono riportate con completezza in allegato. Le verifiche strutturali sono soddisfatte in tutti i nodi.



**Figura 18 – Andamento sforzo normale (FASE 7)**



**Figura 19 – Andamento Momento flettente (FASE 7)**

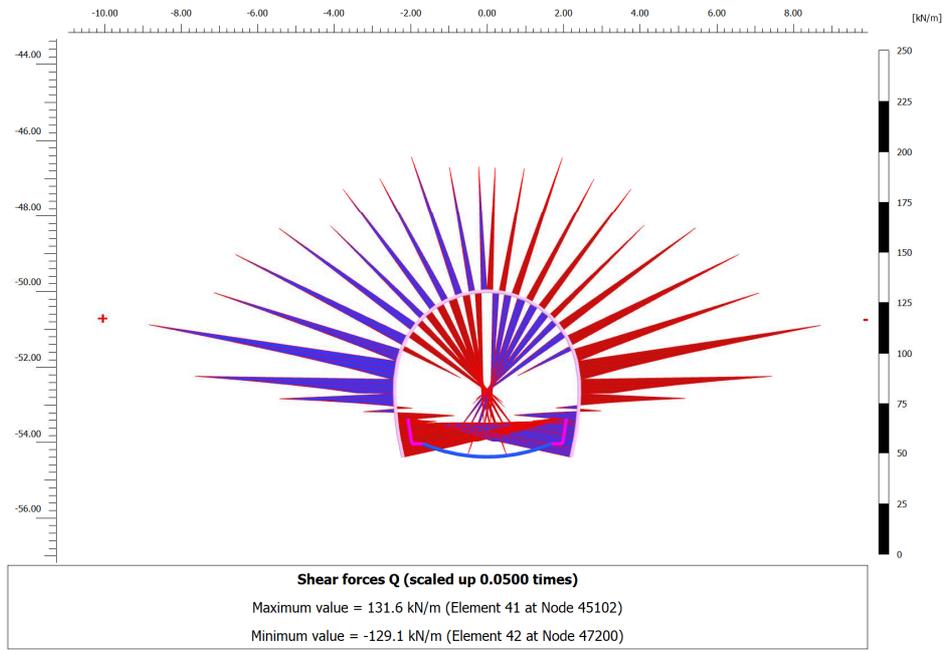


Figura 20 – Andamento taglio (FASE 7)

Tabella 19 – Rivestimento di prima fase (FASE 7)

Nodo	Sollecitazioni di calcolo SLU				Verifica centina			Esito Verifica	Verifica spritz-beton	
	N <sub>Sd, sb</sub>	N <sub>Sd, cent</sub>	V <sub>Sd, cent</sub>	M <sub>Sd, cent</sub>	σ <sub>cent, d, max</sub>	τ <sub>cent, d</sub>	σ <sub>id, cent, d</sub>		σ <sub>sb, d, max</sub>	Esito Verifica
[-]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kNm/ml]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
45752	1146.2	170.7	66.3	37.1	145.9	26.7	153.0	VERIF.	4.6	VERIF.
45872	1146.2	170.7	65.7	37.1	145.9	26.5	152.9	VERIF.	4.6	VERIF.
47358	815.0	121.4	54.2	47.0	167.7	21.8	172.0	VERIF.	3.3	VERIF.
49040	777.9	115.8	50.5	46.8	166.1	20.3	169.8	VERIF.	3.1	VERIF.
52365	154.5	23.0	27.3	0.0	4.1	11.0	19.5	VERIF.	0.6	VERIF.

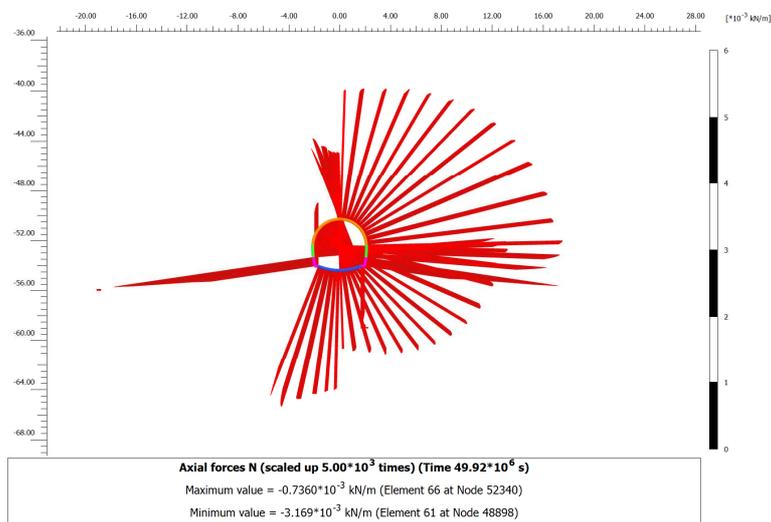
Le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche per ogni nodo dei prerinvestimenti sono riportate con completezza in allegato. Le verifiche strutturali sono soddisfatte in tutti i nodi.

### Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

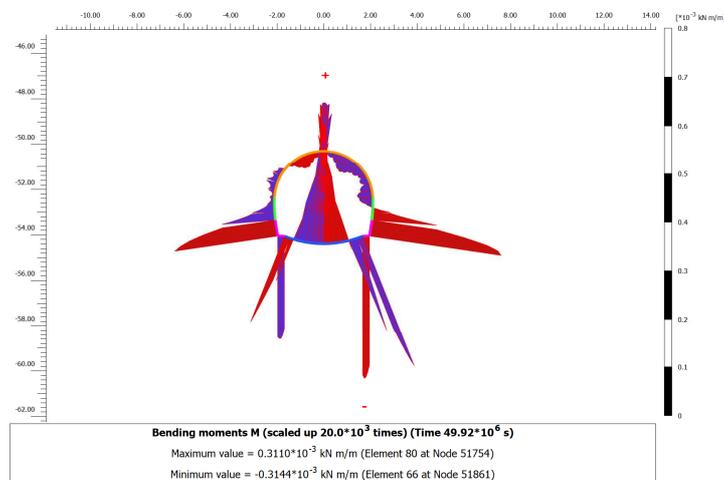
La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N. Per la verifica dei rivestimenti definitivi è stato considerato l'involuppo delle sollecitazioni alla FASE 10.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento definitivo.



**Figura 21 – Andamento sforzo normale (FASE 10)**



**Figura 22 – Andamento Momento flettente (FASE 10)**

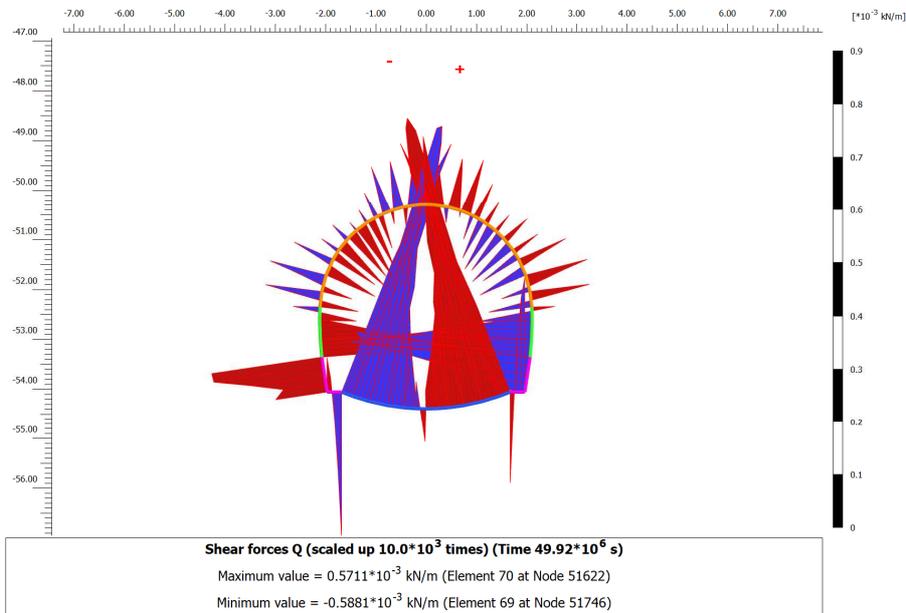


Figura 23 – Andamento taglio (FASE 10)

Tabella 20 – Sollecitazioni rivestimento definitivo – CALOTTA – FASE 10

CALOTTA			
NODO	N_SLU (kN/m)	M_SLU (kNm/m)	Q_SLU (kN/m)
45402	-1497.08	158.04	29.50
45620	-1779.70	266.42	45.96
47204	-1776.74	267.45	46.40
48898	-1831.66	186.52	213.31
50676	-1828.87	187.08	215.23

Tabella 21 – Sollecitazioni rivestimento definitivo – ARCO ROVESCIO – FASE 10

ARCO ROVESCIO			
NODO	N_SLU (kN/m)	M_SLU (kNm/m)	Q_SLU (kN/m)
50366	-2274.2	305.1	371.5

51783	-2480.4	399.2	46.6
51860	-2040.7	399.4	242.3

Di seguito sono riportate le verifiche strutturali condotte per i rivestimenti definitivi nelle fasi di analisi considerate più rappresentative. In ogni caso si sottolinea che le verifiche sono soddisfatte per tutte le fasi di calcolo.

Le combinazioni allo SLU sono ottenute moltiplicando le combinazioni derivanti dall'analisi per il coefficiente parziale  $\gamma_G = 1.3$ .

Si riportano di seguito i domini statici SLU di Calotta e Arco Rovescio.

Le sezioni sono armate con barre di diametro 20 mm disposte a passo 10 cm. Le verifiche delle sezioni armate sono state condotte considerando un copriferro netto pari a 6.2 cm.

Nel seguito si riportano i risultati delle verifiche SLU condotte sui rivestimenti per la FASE di calcolo 10.

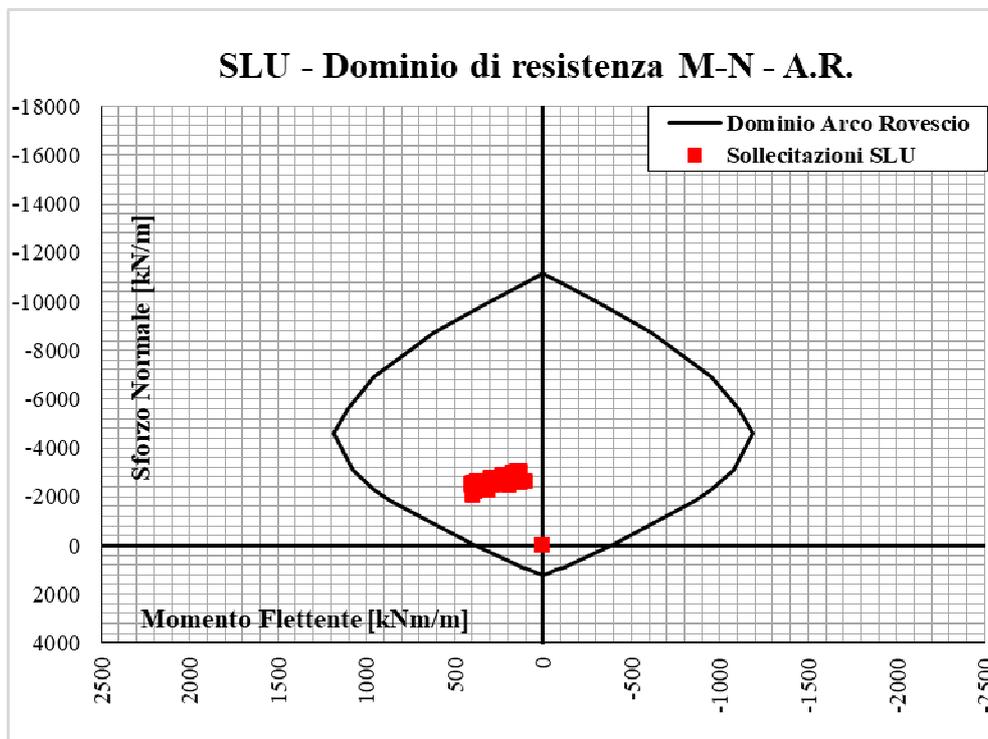


Figura 24 – Dominio resistente SLU arco rovescio – FASE 10

<b>Armatura trasversale</b>		
$n_b$ (numero di bracci dell'armatura trasversale)	3.3	[-]
$\Phi_{sw}$ (diametro armatura trasversale)	14	[mm]
$A_{sw}$ (area dell'armatura trasversale)	513	[mm <sup>2</sup> ]
$s$ (passo armatura trasversale)	300	[mm]
$\alpha$	90	[°]
$\theta$	25.0	
$1 \leq \text{ctg}\theta \leq 2.5$	2.14	[-]
<b>Verifica sezione armata a taglio</b>		
$V_{Rs,d}$ (resistenza a taglio - armatura tras.)	811	[kN]
$V_{Rc,d}$ (resistenza a taglio - sezione cls armata)	1917	[kN]
$V_{Rd} = \min(V_{Rs,d}; V_{Rc,d})$	811	[kN]
$V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1$	0.94	[-]

Figura 25 – Verifica a taglio – ARCO ROVESCIO – FASE 10

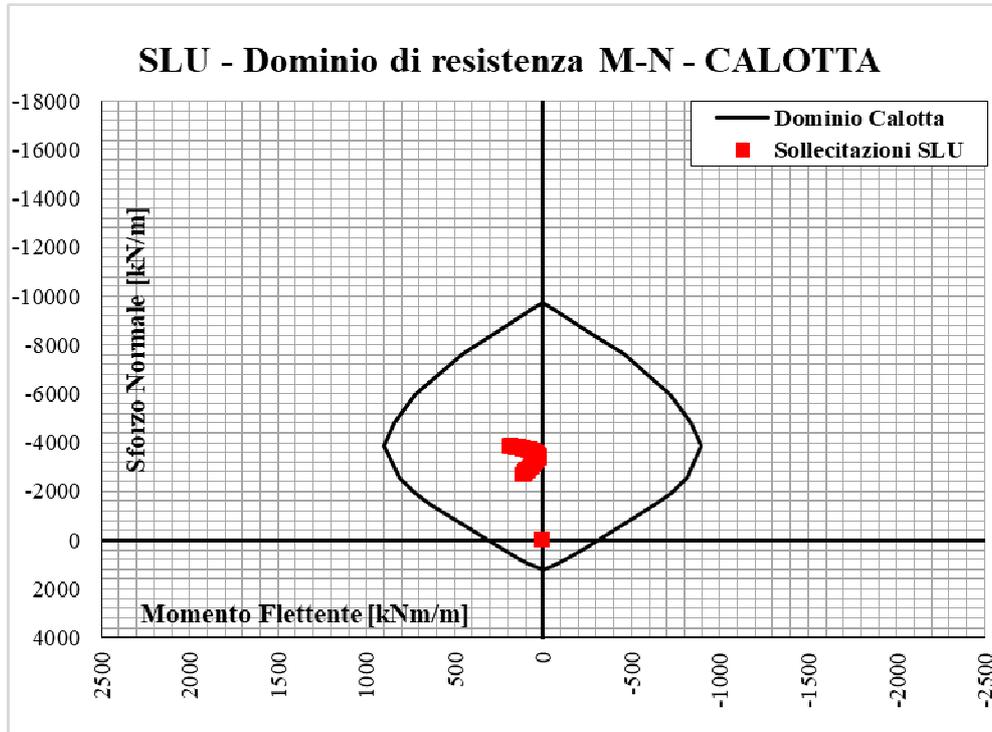


Figura 26 – Dominio resistente SLU calotta – FASE 10

Verifica Taglio -NT2008			Armatura longitudinale		
<b>Sollecitazioni</b>			$n_s$ (numero di barre long. in zona tesa)	5	[-]
$V_{Ed-SLU}$	244.0	[kN]	$\Phi_s$ (diametro barre long.)	20	[mm]
$N_{Ed-SLU}$	3650.3	[kN]	$c$ (ricompimento $A_s$ )	62	[mm]
<b>Proprietà materiali strutturali</b>			$d$ (altezza utile sezione) = $h-c-\Phi_s/2$	528	[mm]
<b>Calcestruzzo</b>			$A_s$ (area dell'armatura long. tesa)	1571	[mm <sup>2</sup> ]
$f_{ck}$ (resistenza caratteristica cls)	25.0	[MPa]	$\rho_l$ (percentuale geometrica di armatura long. tesa)	0.00297	[-]
$f_{cd}$ (resistenza di progetto cls)	14.2	[MPa]	$\sigma_{cp}$ (tensione di compressione) = $N_{Ed}/A_c$	6.08	[MPa]
<b>Acciaio</b>			<b>Verifica sezione non armata a taglio</b>		
$f_{yk}$ (resistenza caratteristica acciaio)	450.0	[MPa]	$\{0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\} \cdot b_w \cdot d$	424.2	[kN]
$f_{yd}$ (resistenza di progetto acciaio)	391.3	[MPa]	$(V_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$	414.1	[kN]
<b>Geometria sezione di verifica</b>			$V_{Rd,0}$	424.2	[kN]
$b_w$ (larghezza minima sezione in zona tesa)	1000	[mm]	$V_{Ed}/V_{Rd,0} \leq 1$	0.58	[-]
$h$ (altezza sezione)	600	[mm]			

Figura 27 – Verifica a taglio – CALOTTA – FASE 10

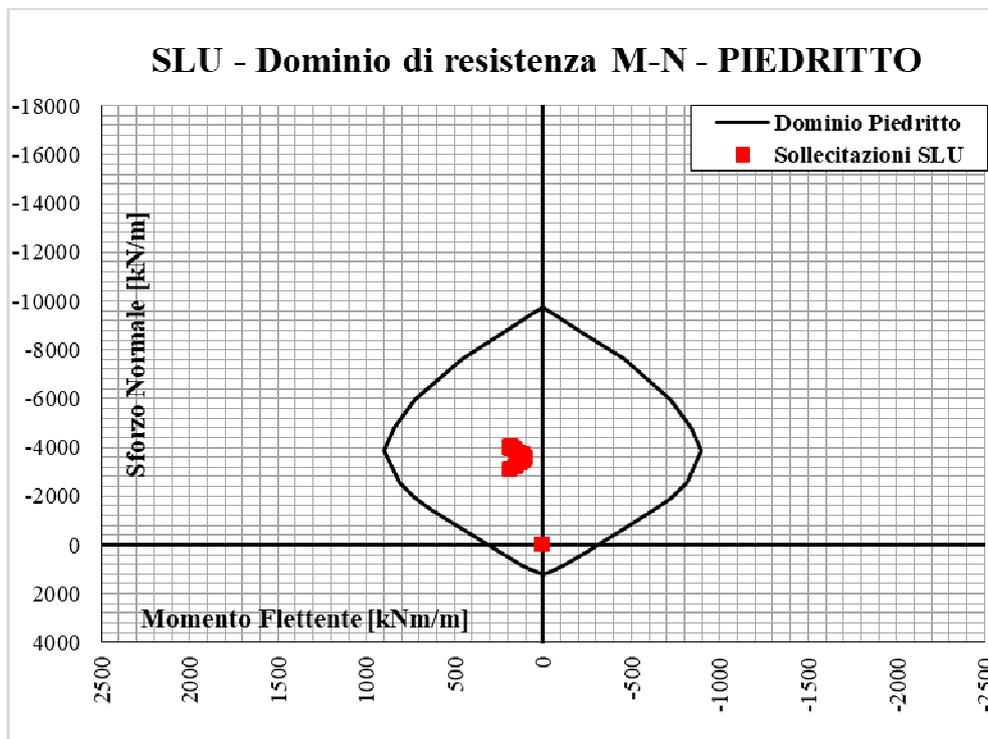


Figura 28 – Dominio resistente SLU piedritti – FASE 10

<b>Armatura trasversale</b>		
$n_b$ (numero di bracci dell'armatura trasversale)	2.5	[-]
$\Phi_{sw}$ (diametro armatura trasversale)	14	[mm]
$A_{sw}$ (area dell'armatura trasversale)	385	[mm <sup>2</sup> ]
$s$ (passo armatura trasversale)	300	[mm]
$\alpha$	90	[°]
$\theta$	25.0	
$1 \leq \text{ctg}\theta \leq 2.5$	2.14	[-]
<b>Verifica sezione armata a taglio</b>		
$V_{Rs,d}$ (resistenza a taglio - armatura tras.)	512	[kN]
$V_{Rc,d}$ (resistenza a taglio - sezione cls armata)	1612	[kN]
$V_{Rd} = \min (V_{Rs,d} ; V_{Rc,d})$	512	[kN]
$V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1$	0.93	[-]

Figura 29 – Verifica a taglio – PIEDRITTI – FASE 10

#### Verifiche sismiche SLU

Per quanto riguarda le verifiche sismiche, sono di seguito riportati i valori nelle zone di maggiore interesse del rivestimento definitivo e i domini di resistenza.

Le combinazioni allo SLU sismiche sono ottenute sommando alle combinazioni derivanti dall'analisi gli incrementi delle sollecitazioni sismiche.

Di seguito sono riportati i parametri geotecnici, strutturali e sismici impiegati nella determinazione delle sollecitazioni sismiche agenti trasversalmente alla uscita laterale della Galleria .

Tabella 22: Parametri geotecnici e sismici

GEOTECHNICAL PARAMETERS			
Formazione			
peso specifico	$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	22
coeff. Poisson terreno	$\nu$	[-]	0.3
coesione	$c'$	[kPa]	177
densità	$\rho$	[kNs <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]	2.24
copertura	$h$	[m]	110
coefficiente di riduzione	-	[-]	5
modulo elastico statico	$E_0$	[MPa]	450
modulo elastico dinamico	Em dinamico	[MPa]	2250.00
		[kPa]	2250000.0

EARTHQUAKE PARAMETERS			
accelerazione di progetto max	amax	[g]	0.1485885
PGV/PGA	PGV/amax	[cm/s/g]	105
riduzione	rid	[-]	0.7
peak ground velocity	PGV	[m/s]	<b>0.1560</b>
vel app. propagazione onde taglio	Cm	[m/s]	764
max deformazione taglio_TAO max	$\gamma_{max}$	[-]	<b>0.000192</b>
Accelerazione di progetto	ag	[g]	0.099059
Amplificazione classe di suolo	$S_c$	-	1.5
Amplificazione topografica	$S_T$	-	1
Periodo $T_c$	$T_c$	[s]	<b>0.669</b>
max deformazione taglio	$\gamma_{max}$	[-]	<b>0.000143</b>
$\tau_{max}$ sisma	$\tau_{max}$	[kPa]	<b>251.71</b>
Gmax da Vs	Gmax	[-]	<b>1309002</b>

Tabella 23: Parametri strutturali – ARCO ROVESCIO

STRUCTURAL PARAMETERS			
diametro	D	[m]	5.38
spessore rivestimento	t	[m]	0.7
E cls	$E_c$	[MPa]	32836.57
coeff. Poisson cls	$\nu_{cls}$	[-]	0.2
defomaz amissibile cls	$\epsilon$	[-]	0.003
G cls	$G_c$	[MPa]	13681.90417
inerzia	$I_c$	[m <sup>4</sup> ]	0.028583333
area per unità di larghezza	A <sub>l</sub>	[m <sup>2</sup> ]	0.7

Tabella 24: Parametri strutturali – CALOTTA

STRUCTURAL PARAMETERS			
diametro	D	[m]	5.38
spessore rivestimento	t	[m]	0.6
E cls	$E_c$	[MPa]	31476
coeff. Poisson cls	$\nu_{cls}$	[-]	0.2
defomaz amissibile cls	$\epsilon$	[-]	0.003
G cls	$G_c$	[MPa]	13115
inerzia	$I_c$	[m <sup>4</sup> ]	0.018
area per unità di larghezza	A <sub>l</sub>	[m <sup>2</sup> ]	0.6

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 25: Parametri strutturali – PIEDRITTI**

STRUCTURAL PARAMETERS			
diámetro	D	[m]	5.38
spessore rivestimento	t	[m]	0.6
E cls	Ec	[MPa]	31476
coeff. Poisson cls	v cls	[-]	0.2
defomaz amissibile cls	ε	[-]	0.003
G cls	Gc	[MPa]	13115
inerzia	Ic	[m4]	0.018
area per unità di larghezza	Al	[m2]	0.6

**Tabella 26: Rigidezze relative, coefficienti di risposta e sollecitazioni sismiche massime secondo Wang (Wang J.N. (1993) – ARCO ROVESCIO**

<b>C</b>	[-]	0,50
<b>F</b>	[-]	5,7
<b>K1</b>	[-]	0,6
<b>K2</b>	[-]	1,16
<b>±Nmax</b>	[kN]	410,8
<b>±Mmax</b>	[kNm]	229,57

**Tabella 27: Rigidezze relative, coefficienti di risposta e sollecitazioni sismiche massime secondo Wang (Wang J.N. (1993) – CALOTTA**

<b>C</b>	[-]	0,59
<b>F</b>	[-]	9,51
<b>K1</b>	[-]	0,37
<b>K2</b>	[-]	1,12
<b>±Nmax</b>	[kN]	394,83
<b>±Mmax</b>	[kNm]	151,68

**Tabella 28: Rigidezze relative, coefficienti di risposta e sollecitazioni sismiche massime secondo Wang (Wang J.N. (1993) – PIEDRITTI**

<b>C</b>	[-]	0,59
<b>F</b>	[-]	9,51
<b>K1</b>	[-]	0,37
<b>K2</b>	[-]	1,11
<b>±Nmax</b>	[kN]	394,93
<b>±Mmax</b>	[kNm]	151,68

**Tabella 29 – Sollecitazioni sismiche rivestimento definitivo – CALOTTA – FASE 10**

<b>CALOTTA</b>
----------------

NODO	$N+\Delta N_{WANG}$ [kN/m]	$M+\Delta M_{WANG}$ [kNm/m]	$N-\Delta N_{WANG}$ [kN/m]	$M-\Delta M_{WANG}$ [kNm/m]
<b>45402</b>	68.20	-272.13	-68.20	68.20
<b>45620</b>	68.20	-272.13	-68.20	68.20
<b>47204</b>	68.20	-272.13	-68.20	68.20
<b>48898</b>	187.35	-2746.59	50.95	187.35
<b>50676</b>	211.66	-2640.35	75.26	211.66

**Tabella 30 – Sollecitazioni sismiche rivestimento definitivo – ARCO ROVESCIO – FASE 10**

ARCO ROVESCIO				
NODO	$N+\Delta N_{WANG}$ [kN/m]	$M+\Delta M_{WANG}$ [kNm/m]	$N-\Delta N_{WANG}$ [kN/m]	$M-\Delta M_{WANG}$ [kNm/m]
<b>50366</b>	106.91	-284.46	-106.91	106.91
<b>51783</b>	106.91	-284.46	-106.91	106.91
<b>51860</b>	106.91	-284.46	-106.91	106.91

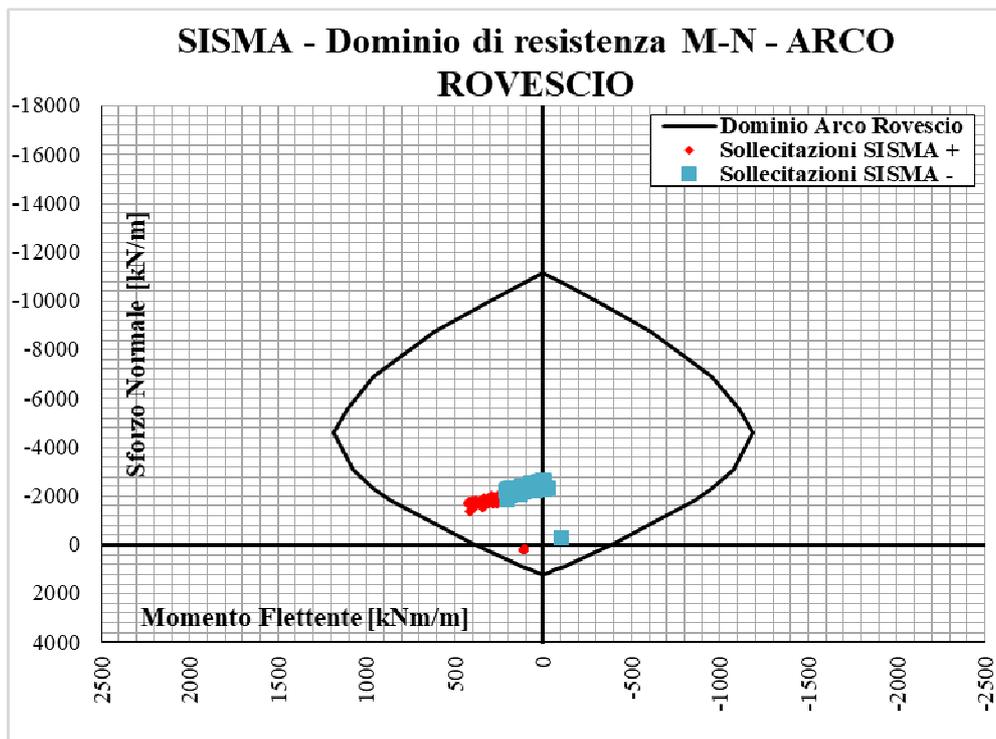


Figura 30 – Dominio resistente SLU a sisma – ARCO ROVESCIO – FASE 10

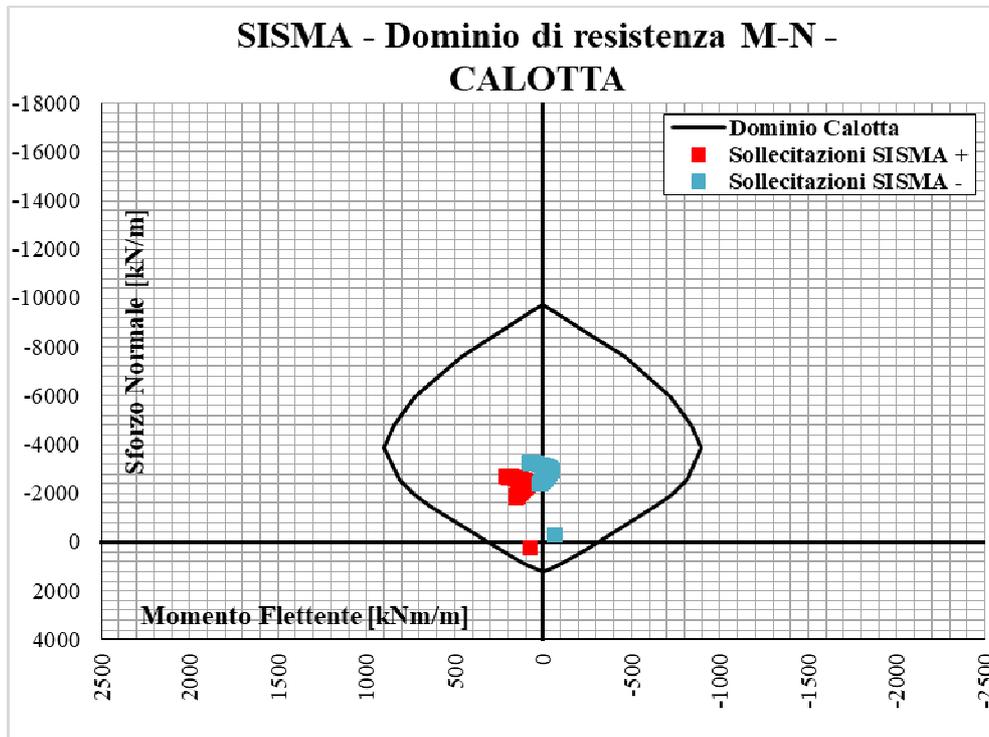
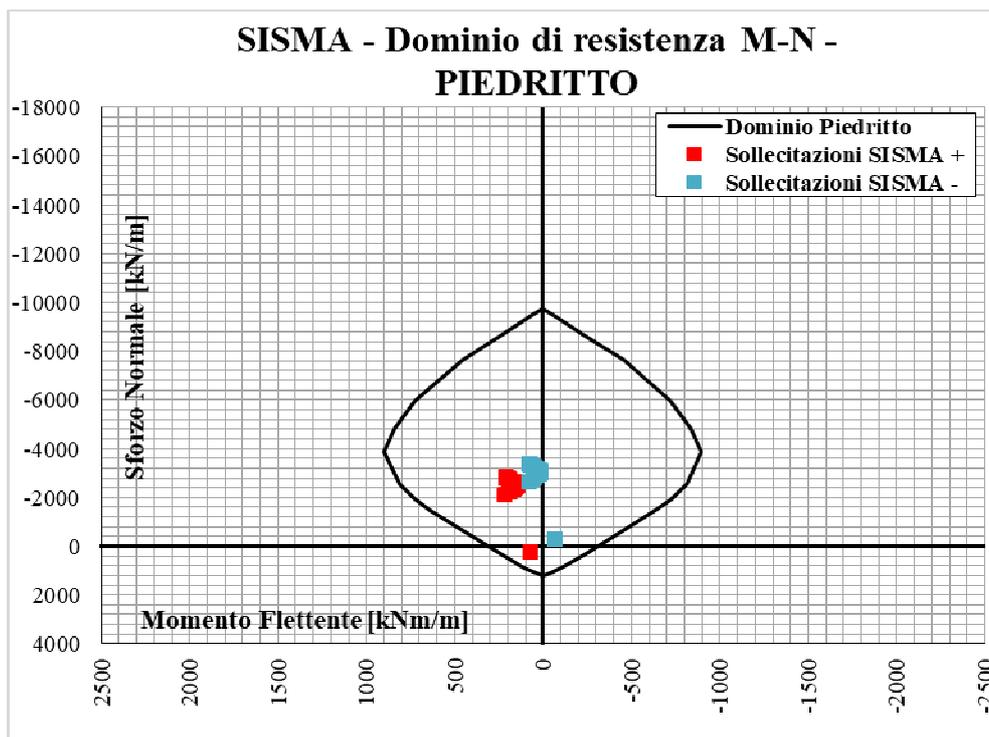


Figura 31 – Dominio resistente SLU a sisma – CALOTTA – FASE 10



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

**Figura 32 – Dominio resistente SLU a sisma – PIEDRITTI – FASE 10**

### Verifiche SLE

Le verifiche SLE del rivestimento definitivo sono finalizzate a prevenire la formazione di un quadro fessurativo tale da compromettere la durabilità dell'opera. A tal fine la Normativa vigente [NTC2018] stabilisce un limite massimo all'ampiezza delle fessure (SLE di fessurazione) ed al contempo, impone il rispetto di opportuni limiti tensionali sia nell'acciaio che nel calcestruzzo (SLE di tensione).

Nello specifico, la verifica agli SLE di fessurazione della calotta e arco rovescio evidenziano l'apertura di fessure la cui ampiezza è comunque inferiore ai limiti normativi.

Anche le verifiche SLE di tensione per la calotta e arco rovescio risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla Normativa vigente [NTC2018].

Nel seguito si riportano i risultati delle verifiche SLE condotte sul rivestimento definitivo per la FASE di calcolo 10.

**Tabella 31 – Verifiche SLE – CALOTTA – FASE 10**

CALOTTA					
NODO	N (kN/m)	M (kNm/m)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	wk (mm)
<b>45402</b>	-2064.9	83.2	-2.38	-32.92	0.00
<b>45620</b>	-2934.5	138.1	-3.34	-45.39	0.00
<b>47204</b>	-2957.1	138.9	-3.34	-45.44	0.00
<b>48898</b>	-2474.5	119.1	-2.64	-36.83	0.00
<b>50676</b>	-2368.2	143.5	-2.64	-36.89	0.00

**Tabella 32 – Verifiche SLE – ARCO ROVESCIO – FASE 10**

ARCO ROVESCIO					
NODO	N (kN/m)	M (kNm/m)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	wk (mm)
<b>50366</b>	-2684.34	108.15	-3.11	-40.97	0.02
<b>51783</b>	-3814.91	179.59	-1.95	-27.62	0.00
<b>51860</b>	-3844.18	180.61	-3.13	-41.18	0.02

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

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

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

Sono di seguito illustrati i criteri che dovranno essere adottati in corso d'opera per l'applicazione delle sezioni tipo e la gestione delle variabilità, nell'ambito delle previsioni del progetto, che sono sintetizzate nei valori attesi delle grandezze caratteristiche. I valori attesi dei fenomeni deformativi al fronte, al cavo e al piano campagna (ove pertinente) sono individuati in funzione dei risultati delle analisi numeriche, di esperienze in contesti analoghi e di dati di letteratura.

In corso d'opera, i rilievi del fronte e i dati di monitoraggio della risposta deformativa del fronte e del cavo, correlati alle fasi di avanzamento, sono confrontati con le previsioni progettuali (i valori attesi) per consentire la verifica e la messa a punto del progetto con i criteri di seguito descritti:

1. Le condizioni geologiche e geotecniche rilevabili al fronte corrispondono con quanto previsto in progetto e la risposta deformativa rientra nel campo dei valori attesi: la previsione progettuale è confermata, si procede con la sezione tipo media prevista per la tratta.
2. La risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità definito in progetto: la sezione tipo prevista per la tratta è ottimizzata secondo le definite variabilità, che consistono in: aumento/diminuzione ( $\pm 20\%$ ) degli interventi di preconsolidamento, diminuzione/aumento dell'interasse delle centine ( $\pm 20\%$  del passo medio), diminuzione/aumento delle distanze del rivestimento definitivo dal fronte di scavo.
3. Le condizioni geologiche e geotecniche osservate sono sensibilmente differenti da quelle ipotizzate e la risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità definito in progetto: si passa ad una diversa sezione tipo, tra quelle definite in progetto come "sezioni eventuali" per quella tratta:

**Tabella 33: Previsioni progettuali**

Sezione tipo	Formazione	VALORI ATTESI		
		Convergenza radiale (mm)	Estrusione cumulativa totale (mm)	Cedimento (mm)
C2	TRV	25	40	20

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 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 dell'uscita laterale della Galleria naturale il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

- monitoraggio piezometrico per la misura della variazione della quota di falda nelle aree prospicienti alle paratie di imbocco;
- monitoraggio inclinometrico per la misura degli spostamenti orizzontali delle paratie e del terreno limitrofo;
- monitoraggio degli spostamenti delle paratie mediante mire ottiche disposte sull'opera di sostegno;
- monitoraggio delle sollecitazioni indotte dallo scavo sui tiranti mediante celle di carico.

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

il rilievo analitico e speditivo del fronte di scavo, con particolare riferimento alle caratteristiche delle discontinuità e al grado di fratturazione dell'ammasso;

il controllo della convergenza del cavo, mediante installazione di stazioni di convergenza con mire ottiche;

il controllo dell'estrusione del fronte, mediante installazione di estrusometri in avanzamento, dove previsto;

il controllo delle deformazioni al contorno del cavo attraverso gli estensimetri multibase;

- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento di prima fase mediante celle di carico, celle di pressione e *strain-gauges*;
- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche;
- il controllo dei cedimenti al piano campagna mediante installazione di capisaldi su sezioni di livellazione topografica;

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.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</b> <b>GALLERIA MONTESTRETTO</b>					
	Relazione geotecnica e di calcolo	COMMESSA <b>RS3U</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>GN 04 00 001</b>	REV. <b>B</b>

## 12 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione dell'uscita laterale della Galleria naturale Montestretto.

La progettazione delle opere in sotterraneo è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [18]), 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 uscita laterale della 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 dell'uscita laterale 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 con metodo tradizionale. La soluzione progettuale è stata analizzata 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 dell'uscita laterale della Galleria al procedere dello scavo e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.

## ALLEGATO 1

TITOLO	
TIPO DI DOCUMENTO	Documento – Formato A4
CODIFICA	RS3U40D07CLGN04100001B
PAGINE	28
DATA	02-2020
SORGENTE	U.O. Gallerie Italferr S.p.A.
NOTE	-

# Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

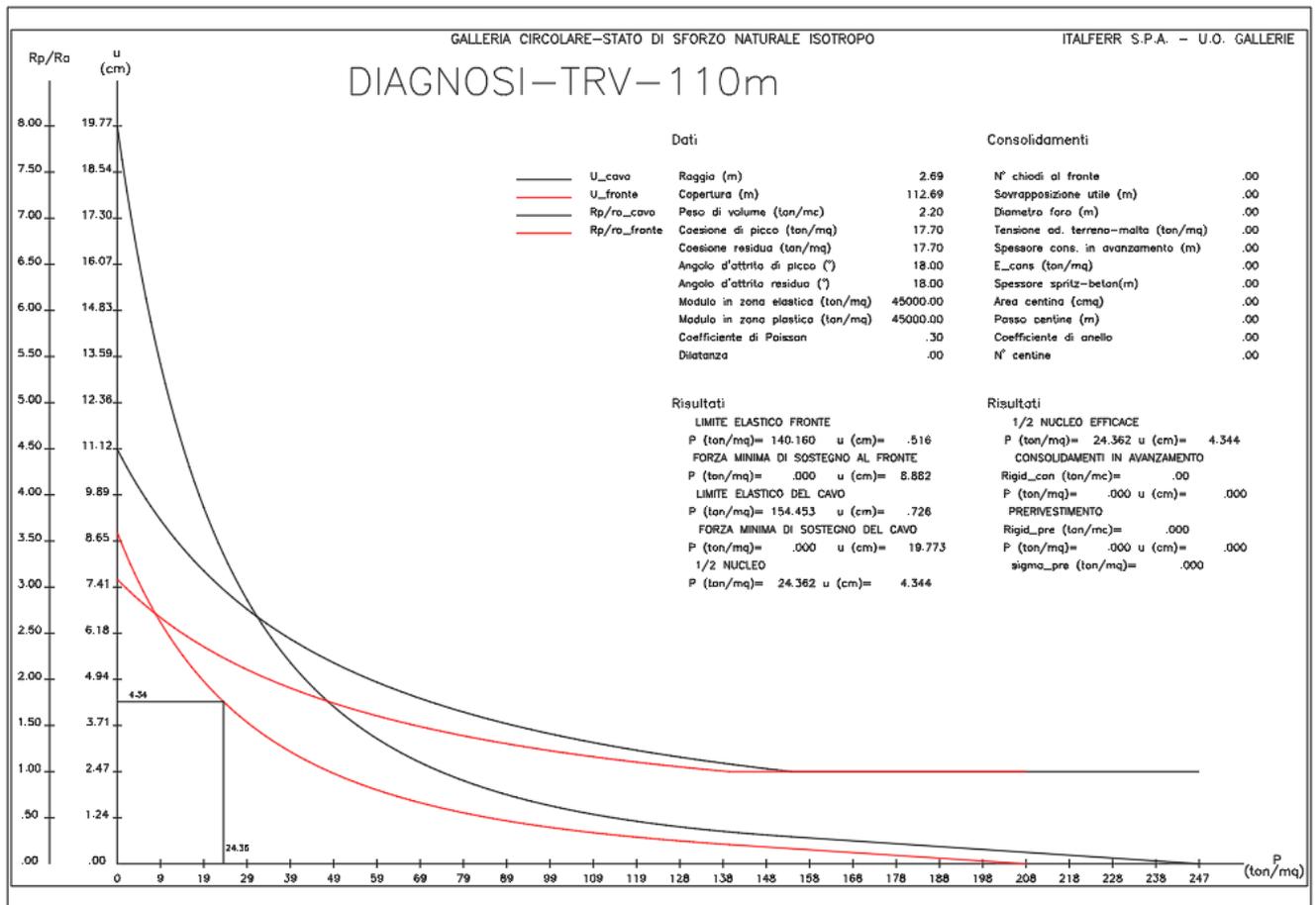
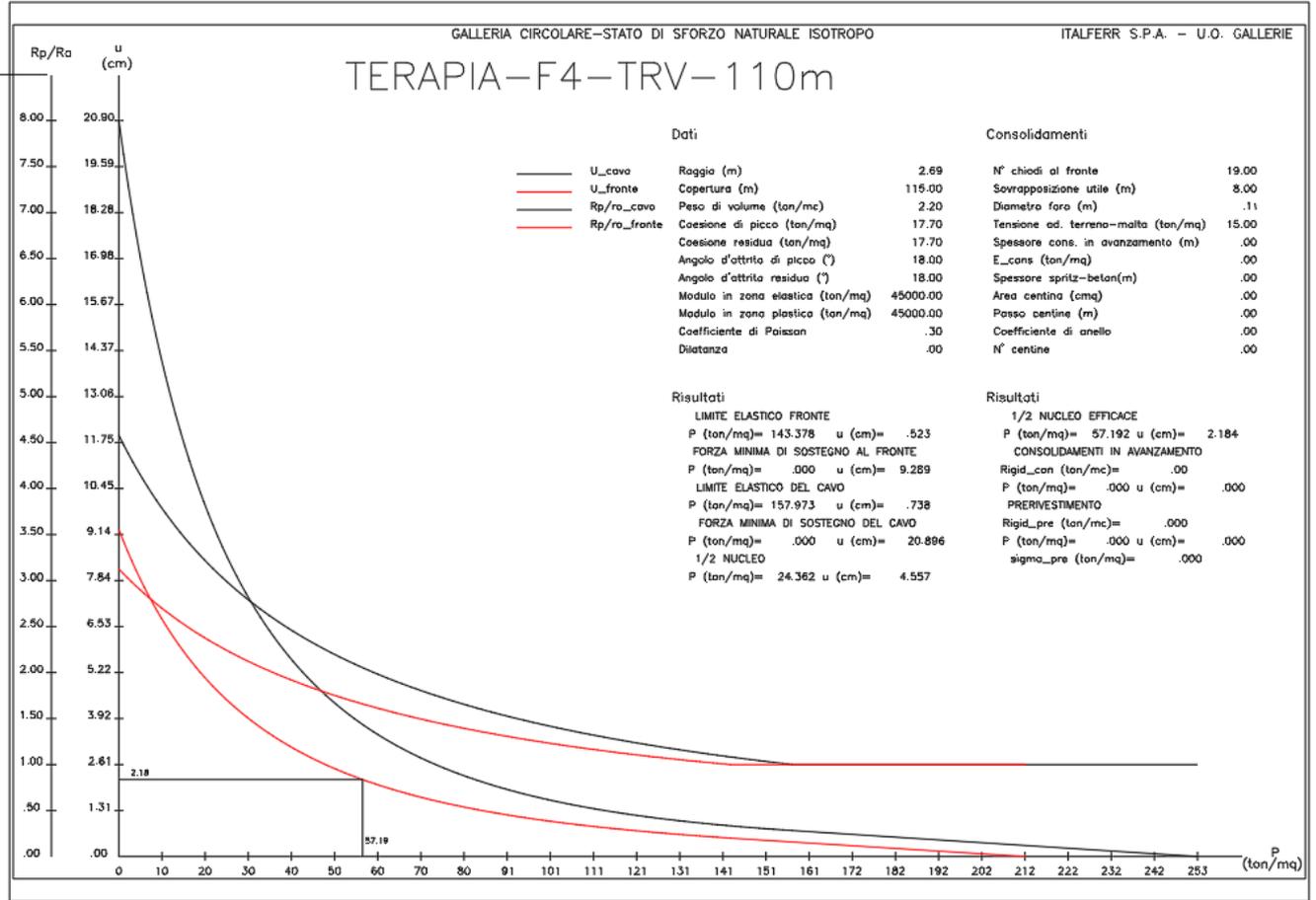


Figura 1: Fase di diagnosi A1+M1+R1 - TRV- copertura di 110 metri

Figura 3: Fase di tensione A2-M2-D2 TRV copertura di 110 metri



# Analisi con il metodo di stabilità al fronte

FACE STABILITY ANALYSIS

ROCKSOIL S.p.A.

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

## Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_s$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
FYN4	12.6	21.0	30.0	22.0

Tunnel Face layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_s$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]
layers ordering: invert-crown				
FYN4	4.8	21.0	30.0	22.0

## Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	12.6
Surface load	qs [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H <sub>w</sub> [m]	0.00
Tunnel full face area	A <sub>excav</sub> [m <sup>2</sup> ]	22.0
Tunnel face height	A [m]	4.76
Tunnel face width	D [m]	5.33

Equivalent tunnel diameter	D <sub>eq</sub> [m]	5.29
Free span length	a [m]	1.0

### Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z <sub>d</sub> [m]	9.06
Length of prisms in advance	L <sub>p</sub> [m]	3.21

## Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

### Prisms 1

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_s$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average cohesion	cu [kPa]	30.0
Average friction angle	$\phi'_s$ [°]	22.0
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	2.20

### Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_s$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	cu [kPa]	30.0
Average friction angle within Discharge Zone	$\phi'_s$ [°]	22.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	0.75
Average buoyant unit weight within D.Z.	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight within D.Z.	$\gamma_s$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0

## Therapy phase

### Conventional Excavation

#### Injection grout properties

Cubic compression resistance	R <sub>ck</sub> [MPa]	0.0
Injection influence ratio	i <sub>i</sub> [-]	0.0
Curing factor	$\gamma_c$ [-]	1.0
Material partial safety factor	$\gamma_F$ [-]	0.0
Possion ratio	$\nu_c$ [-]	0.2
Elastic modulus	E <sub>c</sub> [GPa]	20.0
Grout-soil bond	$\tau_a$ [kPa]	0
Injection penetrability coeff.	$\alpha_i$ [-]	1.0
Design strenght (ULS)	$\alpha_c$ [-]	#DIV/0!

#### Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	$\sigma_b$ [MPa]	800.0
Unit Tensile strength at joint	$\sigma_j$ [MPa]	800.0
Unit Shear strength	$\sigma_s$ [MPa]	100.0
Drilling diameter	$\phi_{dr}$ [mm]	100.0
External diameter	$\phi_{ext}$ [mm]	60.0
Thickness	th <sub>s</sub> [mm]	10.0
Single bar Cross sectional area	A <sub>b</sub> [mm <sup>2</sup> ]	1571
Overlapping length	L <sub>lap</sub> [m]	0
Joint step	i <sub>joint</sub> [m]	0

Single bar Shear strenght	T <sub>i</sub> [kN]	157
Single bar Tensile strenght	T <sub>r</sub> [kN]	1257
Single bar Pull-out strenght	T <sub>f</sub> [kN]	0
Max. resistance offered by bars	T <sub>max</sub> [kN]	0

Number of bars installed at tunnel face	N <sub>b</sub> [-]	0
N° of bars for unit of area	n <sub>b</sub> [m <sup>-2</sup> ]	0.00
Applied pressure at tunnel boundary	p <sub>a</sub> [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	p <sub>f</sub> [kPa]	0

## Therapy phase

### Mechanized Excavation

Applied pressure at tunnel boundary	p <sub>a</sub> [kPa]	0
-------------------------------------	----------------------	---

Applied pressure at tunnel face	p <sub>f</sub> [kPa]	0
---------------------------------	----------------------	---

## Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

### Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	74
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	50
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	25
Undist. eff. vertical stress at crown	$\sigma'_v$ [kPa]	265
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	315

### Pore Pressure distribution

pore pressure at discharge-zone top	u <sub>d</sub> [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	u <sub>d1/3</sub> [kPa]	0
pore pressure at 2/3 discharge-zone	u <sub>d2/3</sub> [kPa]	0
pore pressure at tunnel springline	u <sub>s</sub> [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	u <sub>i</sub> [kPa]	0

### Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	70
Unit shear strength (prisms 2)	s <sub>m2</sub> [kPa]	37.5
Unit shear strength (prism 3)	s <sub>m3</sub> [kPa]	33.9

Tunnel-face global stability (M <sub>2-nl</sub> /M <sub>2-nl</sub> )	FS <sub>g</sub>	1.33
--	-----------------	------

### Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$\sigma_c / 0.3 \cdot (H - p_a) = 0.3$  plastic deformations

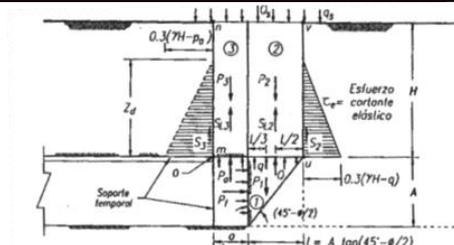
Crown prism vertical stress field (Terzaghi's anchoring effect)  $\sigma_{v0}$  [kPa]

z1 Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01      0.33

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses basic field) FS<sub>c</sub> 2.76

Crown wedge local stability (against plasticization): verified

## Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium



CATEG.COMIC

Figura 3: Fase di diagnosi – FYR4 - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzáles - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

## Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
FYN4	22.6	21.0	30	20.0

Tunnel Face layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]
layers ordering: invert-crown				
FYN4	4.8	21.0	30	20.0

## Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	22.6
Surface load	$q_s$ [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	$H_w$ [m]	0.00
Tunnel full face area	$A_{\text{DCAV}}$ [m <sup>2</sup> ]	22.0
Tunnel face height	A [m]	4.76
Tunnel face width	D [m]	5.33

Equivalent tunnel diameter	$D_{\text{eq}}$ [m]	5.29
Free span length	a [m]	1.0

## Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	$Z_d$ [m]	9.06
Length of prisms in advance	$L_p$ [m]	3.33

## Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

## Prisms 1

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average cohesion	cu [kPa]	30.0
Average friction angle	$\phi'_E$ [°]	20.0
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	2.04

## Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	cu [kPa]	30.0
Average friction angle within Discharge Zone	$\phi'_p$ [°]	20.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	0.79
Average buoyant unit weight within D.Z.	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0
Average saturated unit weight within D.Z.	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0

## Therapy phase

## Conventional Excavation

## Injection grout properties

Cubic compression resistance	$R_{ck}$ [MPa]	0.0
Injection influence ratio	$i_i$ [-]	0.0
Curing factor	$\gamma_c$ [-]	1.0
Material partial safety factor	$\gamma_r$ [-]	0.0
Possion ratio	$\nu_c$ [-]	0.2
Elastic module	$E_c$ [GPa]	20.0
Grot-soil bond	$\tau_a$ [kPa]	0
Injection penetrability coeff.	$\alpha_i$ [-]	0.0
Design strenght (ULS)	$\alpha_c$ [-]	#DIV/0!

## Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	$\sigma_b$ [MPa]	600.0
Unit Tensile strength at joint	$\sigma_j$ [MPa]	600.0
Unit Shear strength	$\sigma_s$ [MPa]	100.0
Drilling diameter	$\phi_{\text{drill}}$ [mm]	100.0
External diameter	$\phi_{\text{ext}}$ [mm]	60.0
Thickness	$th_b$ [mm]	10.0
Single bar Cross sectional area	$A_b$ [mm <sup>2</sup> ]	1571
Overlapping length	$L_{\text{lap}}$ [m]	0
Joint step	$i_{\text{joint}}$ [m]	0

Single bar Shear strenght	$T_s$ [kN]	157
Single bar Tensile strenght	$T_t$ [kN]	942
Single bar Pull-out strenght	$T_f$ [kN]	0
Max. resistance offered by bars	$T_{\text{max}}$ [kN]	0

Number of bars installed at tunnel face	$N_b$ [-]	0
N° of bars for unit of area	$n_b$ [m <sup>-2</sup> ]	0.00
Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

## Therapy phase

## Mechanized Excavation

Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
-------------------------------------	----------	---

Applied pressure at tunnel face	pf [kPa]	0
---------------------------------	----------	---

## Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

## Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	284
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	190
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	95
Undist. eff. vertical stress at crown	$\sigma'_v$ [kPa]	475
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	525

## 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	$u_s$ [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	$u_r$ [kPa]	0

## Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	$\tau_1$ [kPa]	66
Unit shear strength (prisms 2)	$\tau_2$ [kPa]	67.8
Unit shear strength (prism 3)	$\tau_3$ [kPa]	64.6

Tunnel-face global stability ( $M_{\Sigma \tau} / M_{\Sigma \sigma}$ )	$FS_g$	1.22
---	--------	------

## Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$\nu < 0.03(H-p) = 0.2$	plastic deformations
-------------------------	----------------------

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect)	$\sigma_{v1}$ [kPa]
---	---------------------

zT Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01	0.35
---	------

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses elastic field)	$FS_c$	2.93
--	--------	------

Crown wedge local stability (against plasticization):	verified
---	----------

## Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

Figura 4: Fase di diagnosi – FYR4 - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [kNm <sup>-3</sup> ]	c'/Cu [kPa]	$\phi'$ [°]	Tunnel Face layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [kNm <sup>-3</sup> ]	c'/Cu [kPa]	$\phi'$ [°]	Overburden	Face
										$\gamma_n'$ [kNm <sup>-3</sup> ]	$\gamma_n''$ [kNm <sup>-3</sup> ]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface					layers ordering: invert-crown						
FYN4	12.6	21.0	24	16.2	FYN4	4.8	21.0	24	16.2	21.0	21.0
										0	0
										0	0
										0	0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	12.6
Surface load	qs [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H <sub>w</sub> [m]	0.00
Tunnel full face area	A <sub>EXCAV</sub> [m <sup>2</sup> ]	22.0
Tunnel face height	A [m]	4.76
Tunnel face width	D [m]	5.33

Equivalent tunnel diameter	D <sub>eq</sub> [m]	5.29
Free span length	a [m]	1.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z <sub>d</sub> [m]	9.06
Length of prisms in advance	L <sub>p</sub> [m]	3.57

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0
Average cohesion	cu [kPa]	24.0
Average friction angle	$\phi'_E$ [°]	16.2
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	1.78

Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	cu [kPa]	24.0
Average friction angle within Discharge Zone	$\phi'_p$ [°]	16.2
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	0.86
Average buoyant unit weight within D.Z.	$\gamma_b$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0
Average saturated unit weight within D.Z.	$\gamma_n$ [kNm <sup>-3</sup> ]	21.0

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

Cubic compression resistance	R <sub>ck</sub> [MPa]	15.0
Injection influence ratio	i <sub>i</sub> [-]	1.0
Curing factor	$\gamma_c$ [-]	1.0
Material partial safety factor	$\gamma_f$ [-]	1.1
Possion ratio	v <sub>c</sub> [-]	0.2
Elastic module	E <sub>c</sub> [GPa]	20.0
Grout-soil bond	$\tau_a$ [kPa]	150
Injection penetrability coeff.	$\alpha_i$ [-]	1.0
Design strenght (ULS)	$\alpha_c$ [-]	13.6

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	$\sigma_b$ [MPa]	800.0
Unit Tensile strength at joint	$\sigma_j$ [MPa]	800.0
Unit Shear strength	$\sigma_s$ [MPa]	100.0
Drilling diameter	$\phi_{dril}$ [mm]	100.0
External diameter	$\phi_{ext}$ [mm]	60.0
Thickness	th <sub>b</sub> [mm]	10.0
Single bar Cross sectional area	A <sub>b</sub> [mm <sup>2</sup> ]	1571
Overlapping length	L <sub>LAP</sub> [m]	8
Joint step	i <sub>joint</sub> [m]	4

Single bar Shear strenght	T <sub>t</sub> [kN]	157
Single bar Tensile strenght	T <sub>T</sub> [kN]	1257
Single bar Pull-out strenght	T <sub>F</sub> [kN]	188
Max. resistance offered by bars	T <sub>max</sub> [kN]	188

Number of bars installed at tunnel face	N <sub>b</sub> [-]	19
N° of bars for unit of area	n <sub>b</sub> [m <sup>-2</sup> ]	0.86
Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	163

Therapy phase

Mechanized Excavation

Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
-------------------------------------	----------	---

Applied pressure at tunnel face	pf [kPa]	0
---------------------------------	----------	---

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	74
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	50
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	25
Undist. eff. vertical stress at crown	$\sigma'_v$ [kPa]	265
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	315

Pore Pressure distribution

pore pressure at discharge-zone top	u <sub>d</sub> [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	u <sub>d1/3</sub> [kPa]	0
pore pressure at 2/3 discharge-zone	u <sub>d2/3</sub> [kPa]	0
pore pressure at tunnel springline	u <sub>o</sub> [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	u <sub>i</sub> [kPa]	0

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	265
Unit shear strength (prisms 2)	s <sub>m2</sub> [kPa]	40.8
Unit shear strength (prism 3)	s <sub>m3</sub> [kPa]	29.8

Tunnel-face global stability (M <sub>S2m</sub> /M <sub>S2m</sub> )	FS <sub>g</sub>	3.03
--	-----------------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$\epsilon_c/0.3(\gamma H - p_p) =$	0.3	plastic deformations
------------------------------------	-----	----------------------

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses elastic field)	FS <sub>c</sub>	2.42
---	-----------------	------

Figura 5: Fase di terapia - FYR4 - 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	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
FYN4	22.6	21.0	24	16.2

Tunnel Face layers	$\Delta H$ [m]	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	$c'/Cu$ [kPa]	$\phi'$ [°]	Overburden $\gamma'_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	Face $\gamma'_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]
layers ordering: invert-crown						
FYN4	4.8	21.0	24	16.2	21.0	21.0
					0	0
					0	0
					0	0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	22.6
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 <sup>2</sup> ]	22.0
Tunnel face height	A [m]	4.76
Tunnel face width	D [m]	5.33

Equivalent tunnel diameter	$D_{eq}$ [m]	5.29
Free span length	a [m]	1.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	$Z_d$ [m]	9.06
Length of prisms in advance	$L_p$ [m]	3.57

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1			
Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	
Average cohesion	$c_u$ [kPa]	24.0	
Average friction angle	$\phi'_E$ [°]	16.2	
Coefficient of passive earth pressure	$Kp$ [-]	1.78	

Prisms 2-3			
Average buoyant unit weight	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	
Average saturated unit weight	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	
Average cohesion within Discharge Zone	$c_u$ [kPa]	24.0	
Average friction angle within Discharge Zone	$\phi'_p$ [°]	16.2	
Friction Coefficient within Discharge Zone	$Kf$ [-]	0.86	
Average buoyant unit weight within D.Z.	$\gamma_b$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	
Average saturated unit weight within D.Z.	$\gamma_n$ [ $\text{kNm}^{-3}$ ]	21.0	

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

Cubic compression resistance	$R_{ck}$ [MPa]	15.0
Injection influence ratio	$i_i$ [-]	1.0
Curing factor	$\gamma_c$ [-]	1.0
Material partial safety factor	$\gamma_f$ [-]	1.1
Possion ratio	$v_c$ [-]	0.2
Elastic module	$E_c$ [GPa]	20.0
Grout-soil bond	$\tau_a$ [kPa]	150
Injection penetrability coeff.	$\alpha_i$ [-]	1.0
Design strenght (ULS)	$\alpha_c$ [-]	13.6

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	$\alpha_b$ [MPa]	800.0
Unit Tensile strength at joint	$\alpha_j$ [MPa]	800.0
Unit Shear strength	$\alpha_s$ [MPa]	100.0
Drilling diameter	$\phi_{dril}$ [mm]	100.0
External diameter	$\phi_{ext}$ [mm]	60.0
Thickness	$th_b$ [mm]	10.0
Single bar Cross sectional area	$A_b$ [mm <sup>2</sup> ]	1571
Overlapping length	$L_{LAP}$ [m]	8
Joint step	$i_{joint}$ [m]	4

Single bar Shear strenght	$T_s$ [kN]	157
Single bar Tensile strenght	$T_t$ [kN]	1257
Single bar Pull-out strenght	$T_p$ [kN]	188
Max. resistance offered by bars	$T_{max}$ [kN]	188

Number of bars installed at tunnel face	$N_b$ [-]	19
N° of bars for unit of area	$n_b$ [m <sup>-2</sup> ]	0.86
Applied pressure at tunnel boundary	$pa$ [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	$pf$ [kPa]	163

Therapy phase

Mechanized Excavation

Applied pressure at tunnel boundary	$pa$ [kPa]	0
-------------------------------------	------------	---

Applied pressure at tunnel face	$pf$ [kPa]	0
---------------------------------	------------	---

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	284
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	190
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	$\sigma'_{vd}$ [kPa]	95
Undist. eff. vertical stress at crown	$\sigma'_v$ [kPa]	475
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	525

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	$u_i$ [kPa]	0

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	$q$ [kPa]	326
Unit shear strength (prisms 2)	$s_{m2}$ [kPa]	69.4
Unit shear strength (prism 3)	$s_{m3}$ [kPa]	55.9

Tunnel-face global stability ( $M_{ΣF_{res}}/M_{ΣF_{res,a}}$ )	$FS_g$	1.76
--	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$\epsilon_c/0.3(\gamma H - p_c) =$	0.1	plastic deformations
------------------------------------	-----	----------------------

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect)  $\sigma_{v1}$ [kPa]

zt Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01	0.28
---	------

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses elastic field)	$FS_c$	2.54
---	--------	------

Crown wedge local stability (against plasticization):	verified
---	----------

Figura 6: Fase di terapia - FYR4- analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

## Analisi numerica per la verifica della Sezione F-C2 (0+250): risultati delle verifiche

Per comodità di lettura del presente allegato, nella tabella che segue è riportata una sintesi delle fasi di calcolo previste per l'analisi numerica:

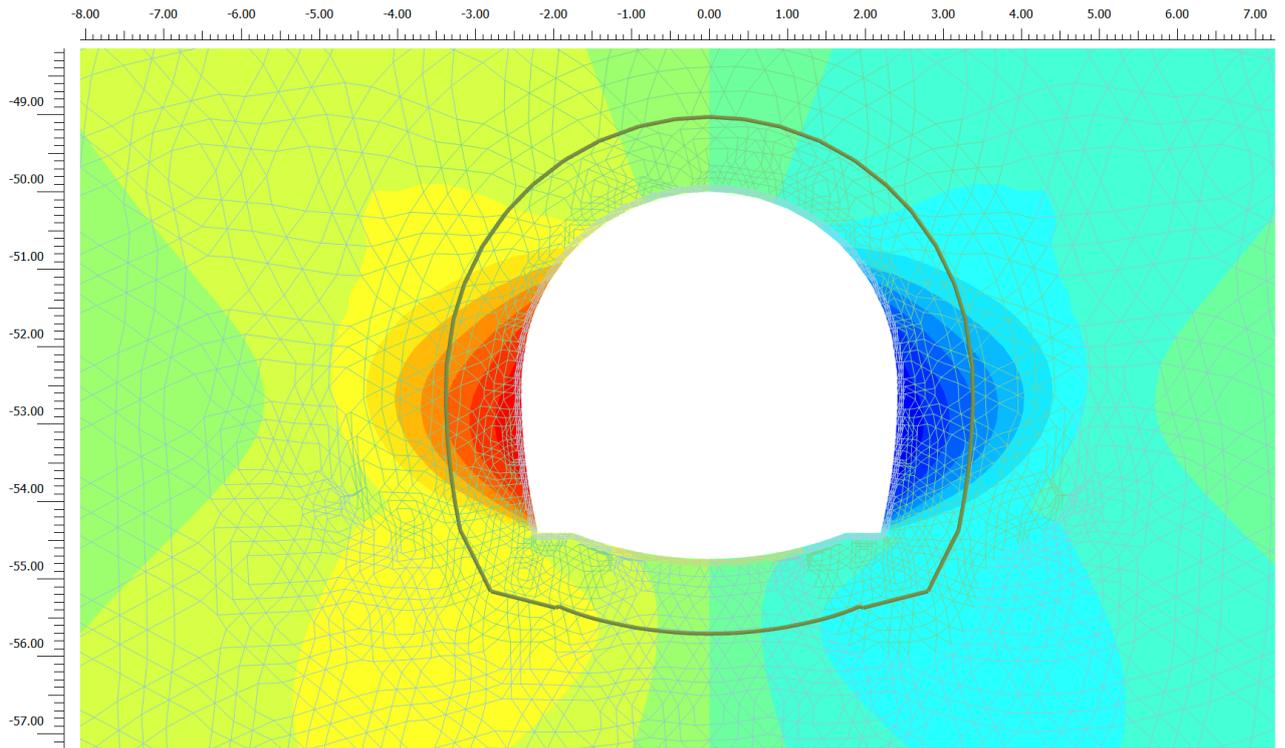
Fase	Descrizione	Rilascio forze di scavo
0	Creazione della geometria del modello	-
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche	-
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb)	-
<b>SCAVO</b>		
3	Formazione della coronella in calotta	-
4	Preconvergenza del fronte	0.50
5	Simulazione della convergenza dovuto allo sfondo di 1.00 m	0.79
6	Installazione del rivestimento di prima fase (4 m dal fronte)	0.92
7	Installazione di murette e arco rovescio (6 m dal fronte di scavo)	0.93
8	Installazione del rivestimento definitivo di calotta	1.00
<b>LUNGO TERMINE</b>		
9	Rimozione del priverestimento e della coronella consolidata in calotta	-
10	Fase di consolidazione al fine di annullare le sovra-pressioni interstiziali	-

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;
- kN per le forze.

L'andamento delle sollecitazioni riportato nelle figure che seguiranno, risente della convenzione legata al sistema di riferimento degli assi locali degli elementi strutturali con cui sono stati modellati i rivestimenti stessi. Si rimanda alle verifiche strutturali eseguite.

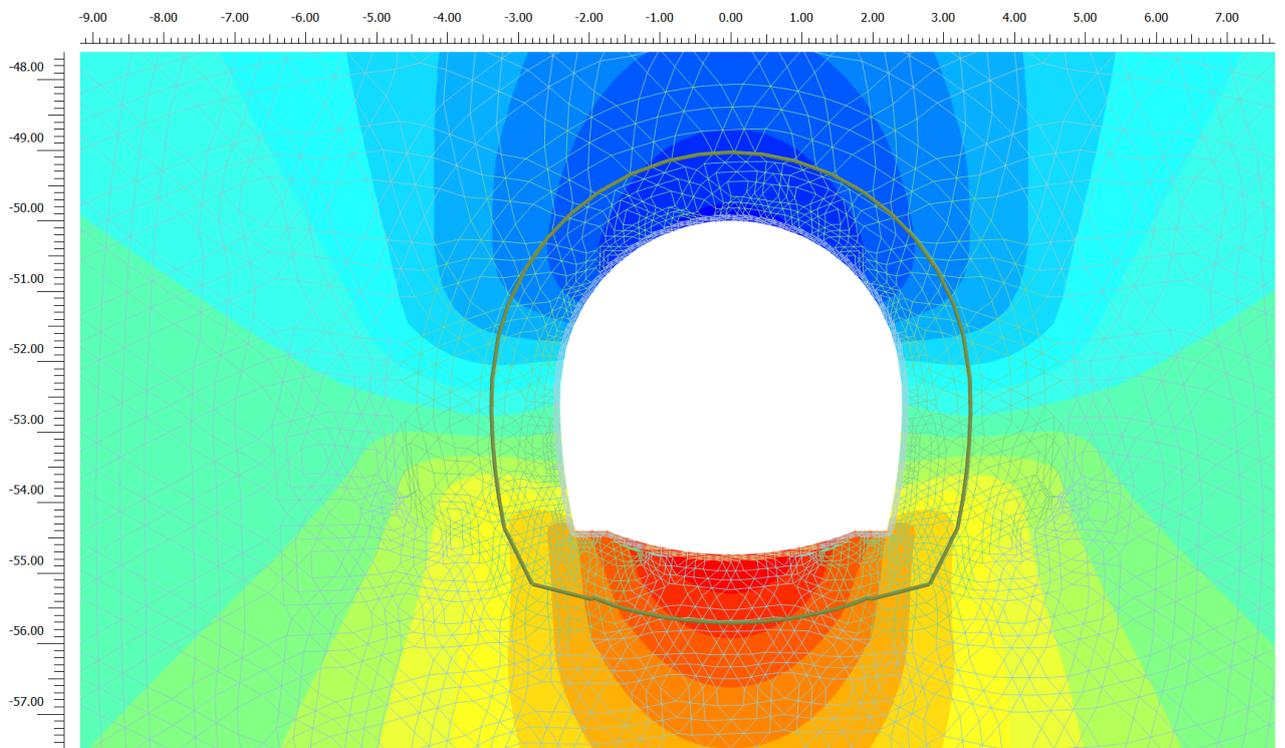
## Fase 4



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 200 times)**

Maximum value = 0.01785 m (Element 8644 at Node 46061)

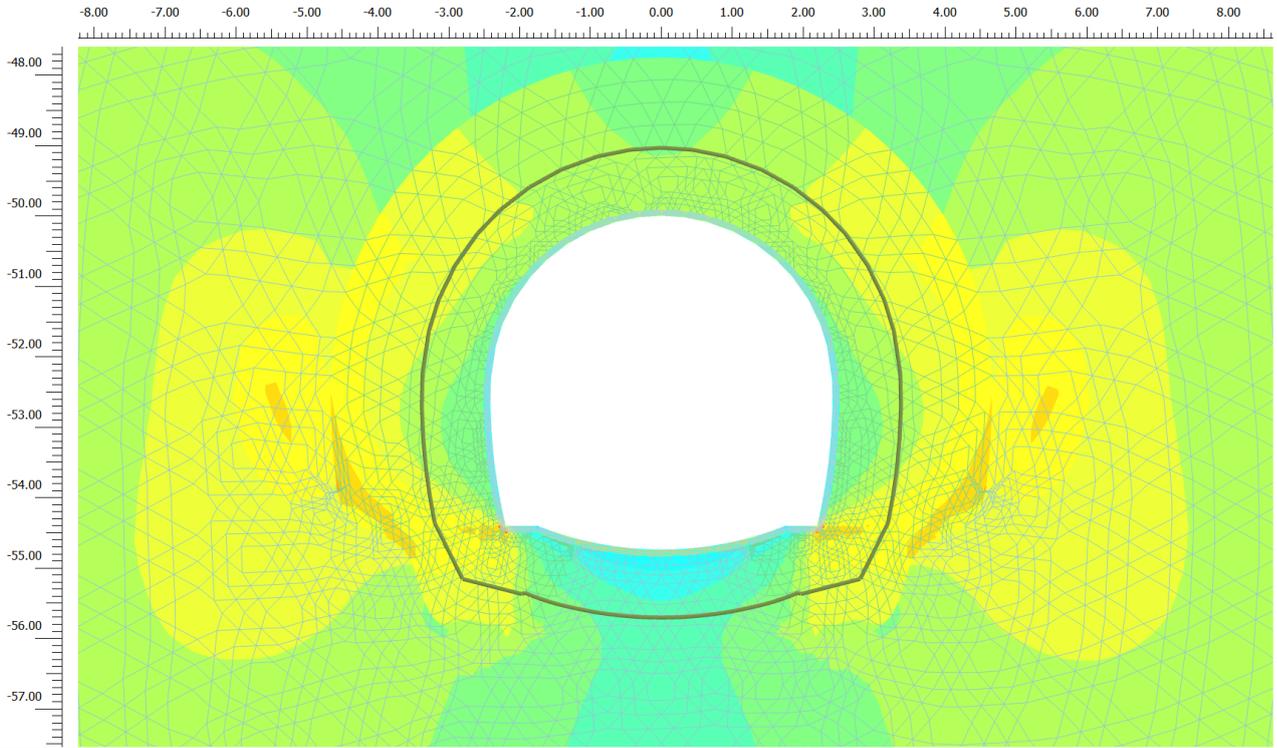
Minimum value = -0.01785 m (Element 8625 at Node 50237)



**Total displacements  $u_y$  (scaled up 200 times)**

Maximum value = 0.01972 m (Element 8975 at Node 54410)

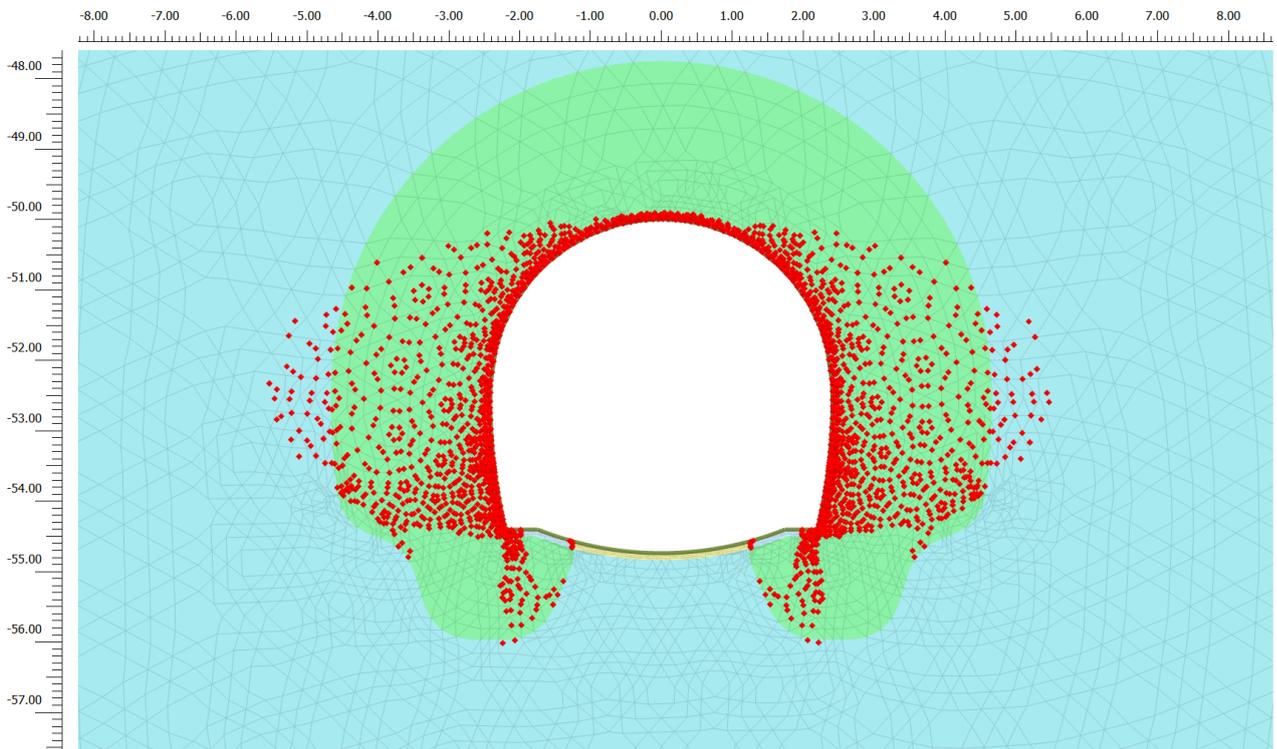
Minimum value = -0.01661 m (Element 8668 at Node 46169)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $1.00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value =  $1.992 \cdot 10^{-3}$  kN/m<sup>2</sup> (Element 196 at Node 5339)

Minimum value = -6843 kN/m<sup>2</sup> (Element 8687 at Node 52475)

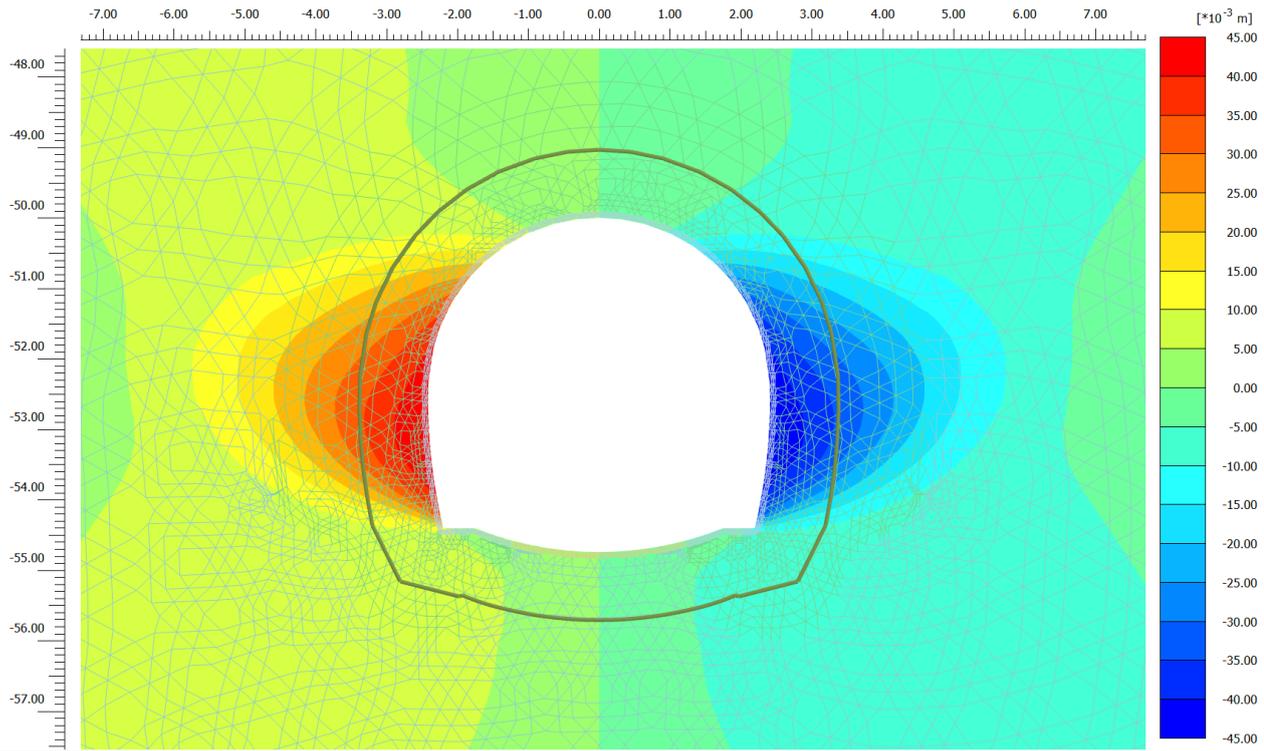


**Plastic points (scaled up 0.00 times)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point

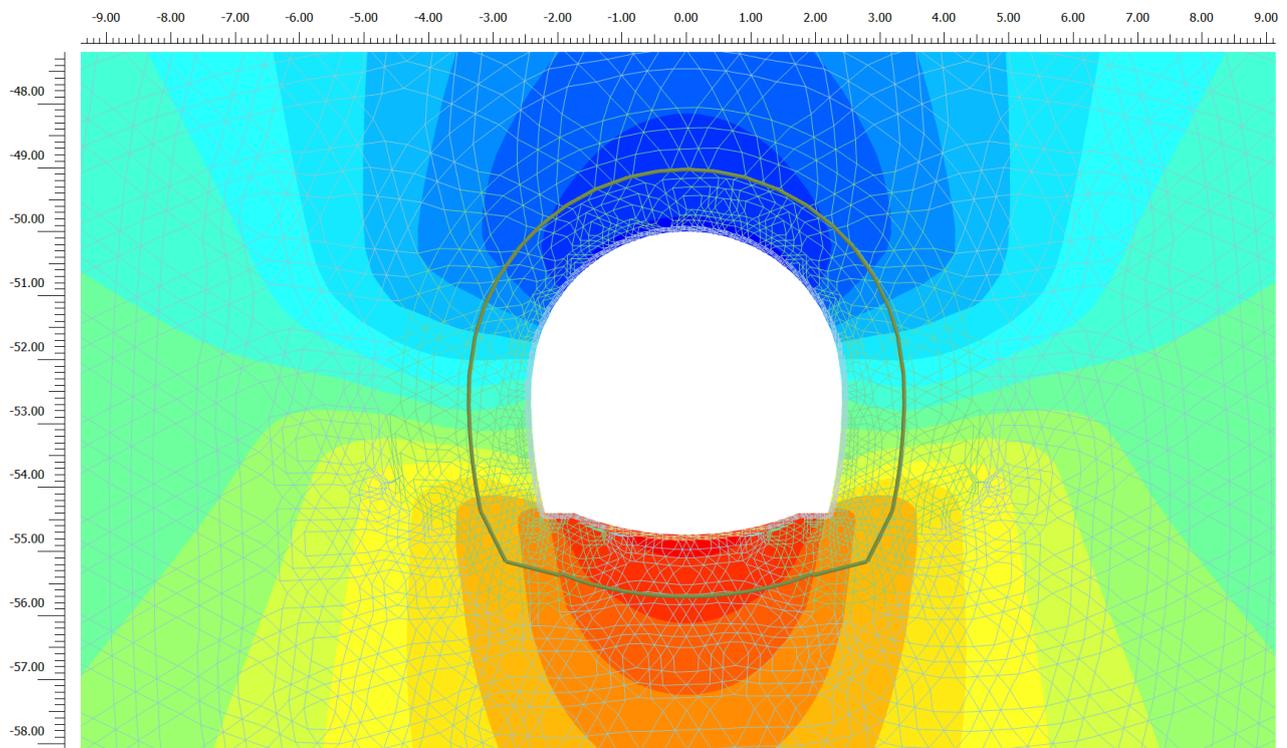
# Fase 5



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 50.0 times)**

Maximum value = 0.04488 m (Element 8644 at Node 46060)

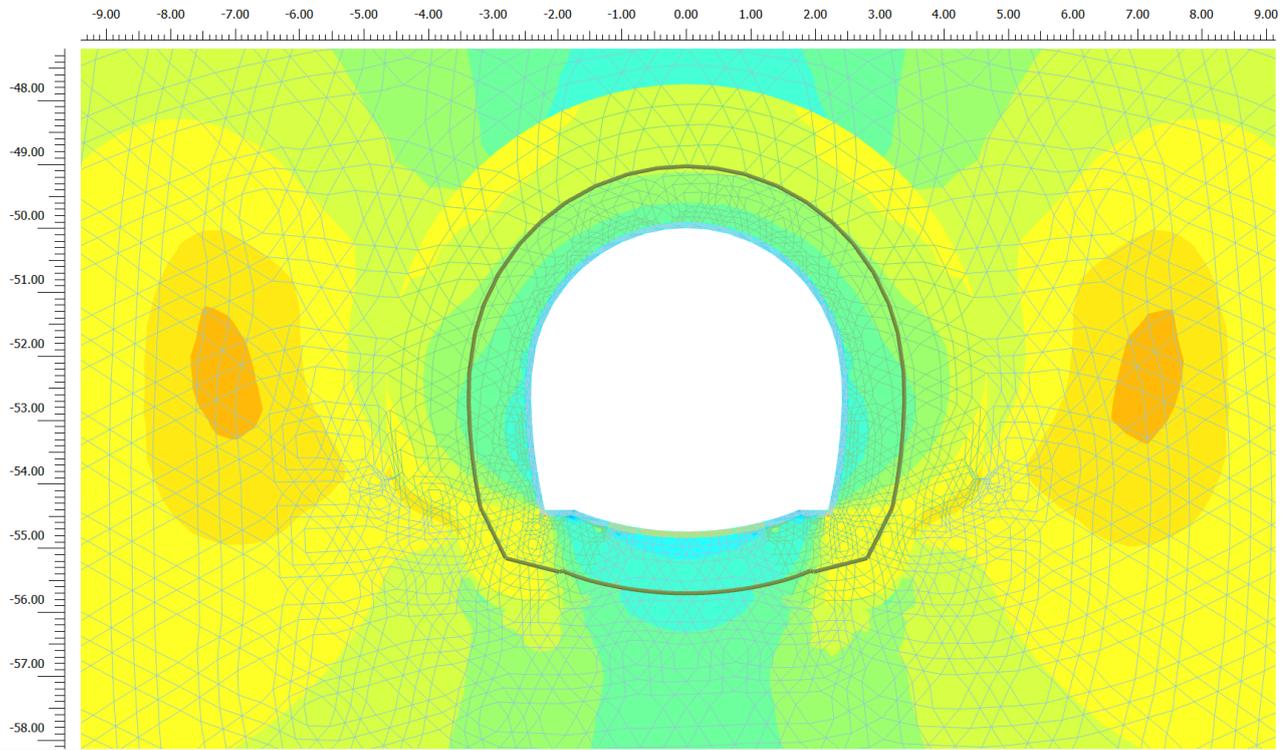
Minimum value = -0.04489 m (Element 8625 at Node 50238)



**Total displacements  $u_y$  (scaled up 100 times)**

Maximum value = 0.03361 m (Element 8975 at Node 54410)

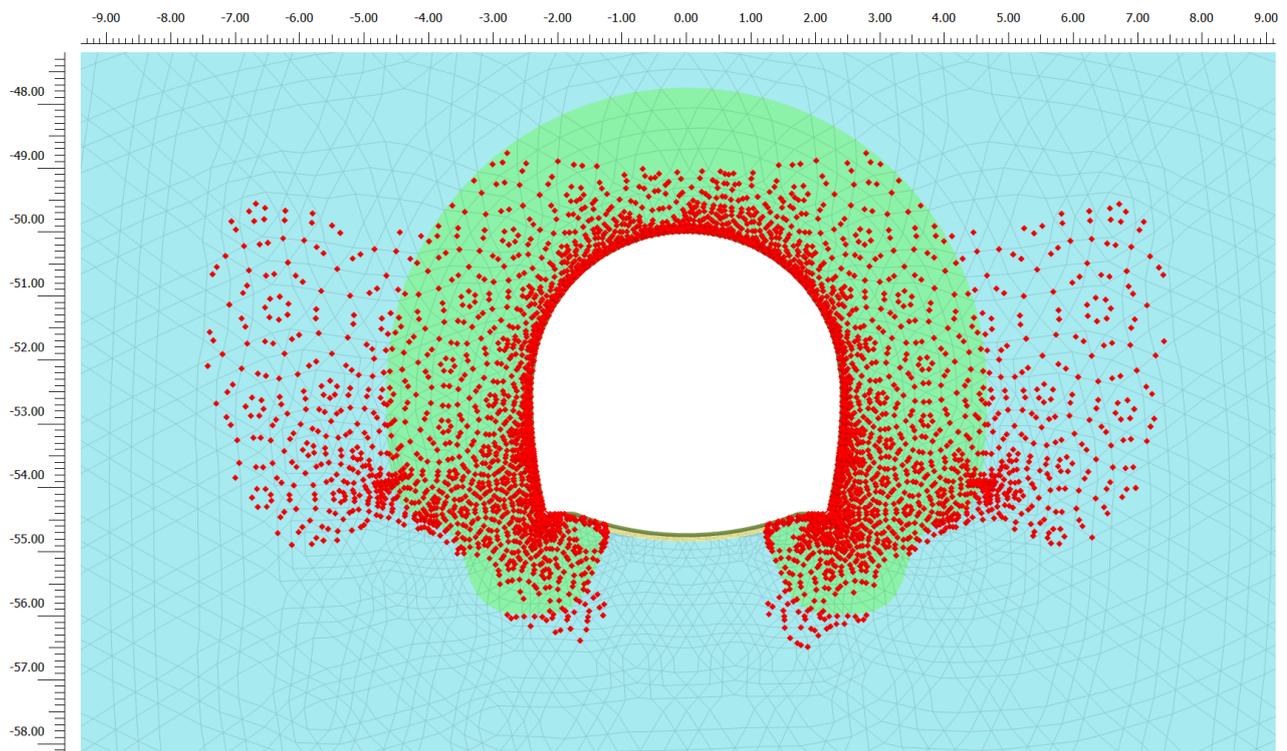
Minimum value = -0.03331 m (Element 8630 at Node 47082)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $1.00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value =  $2.024 \cdot 10^{-3}$  kN/m<sup>2</sup> (Element 196 at Node 5339)

Minimum value = -6786 kN/m<sup>2</sup> (Element 8692 at Node 56361)

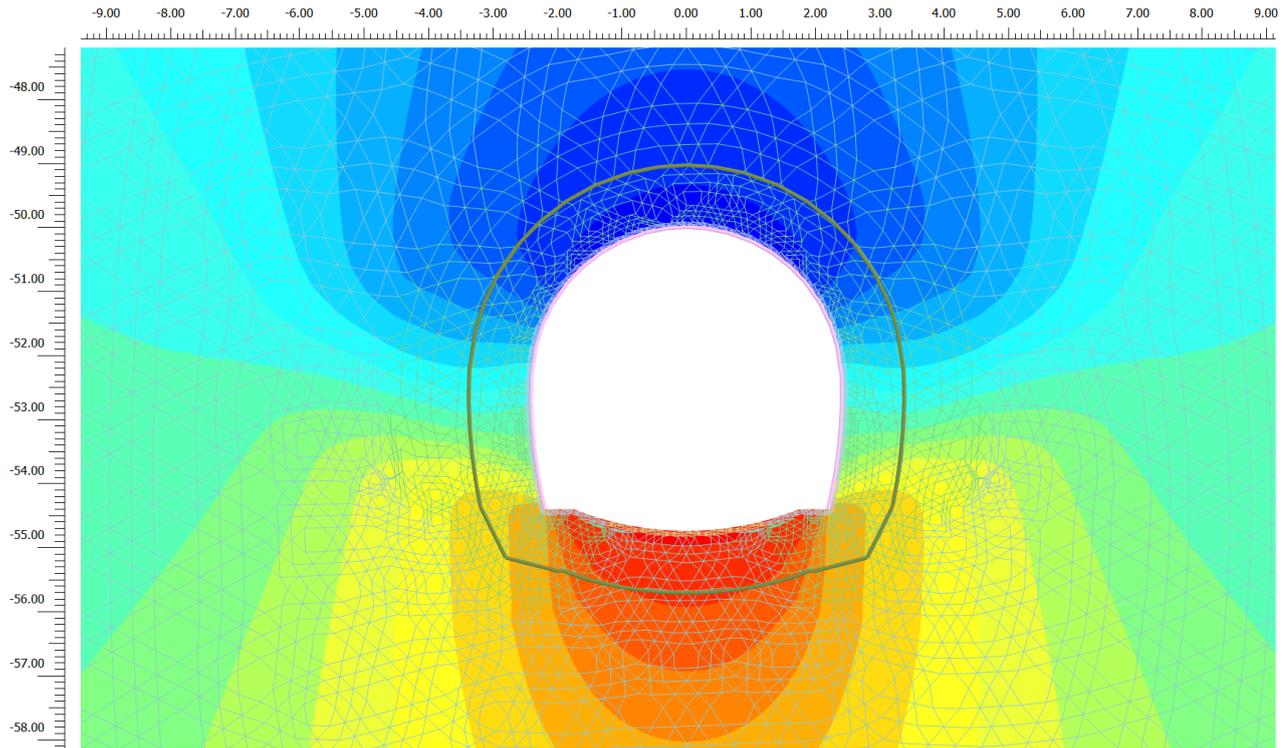


**Plastic points (scaled up 0.00 times)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point

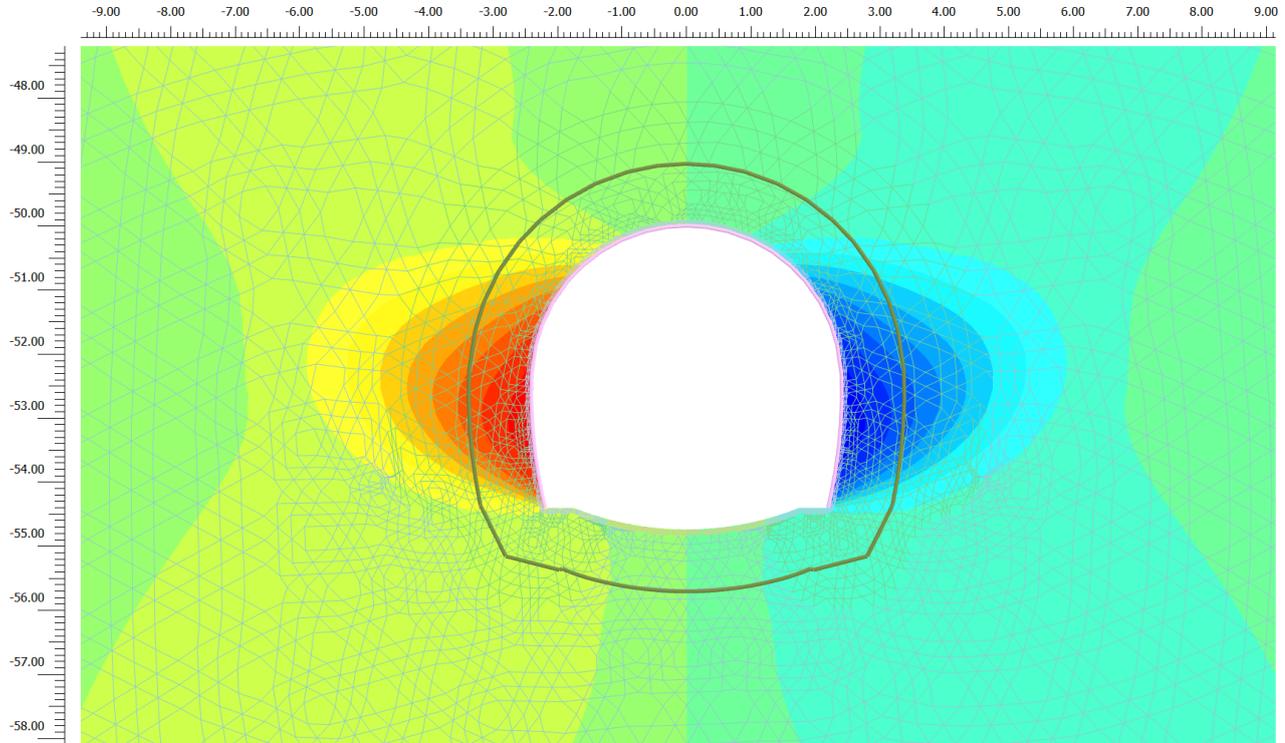
## Fase 6



**Total displacements  $u_y$  (scaled up 100 times)**

Maximum value = 0.03730 m (Element 8975 at Node 54410)

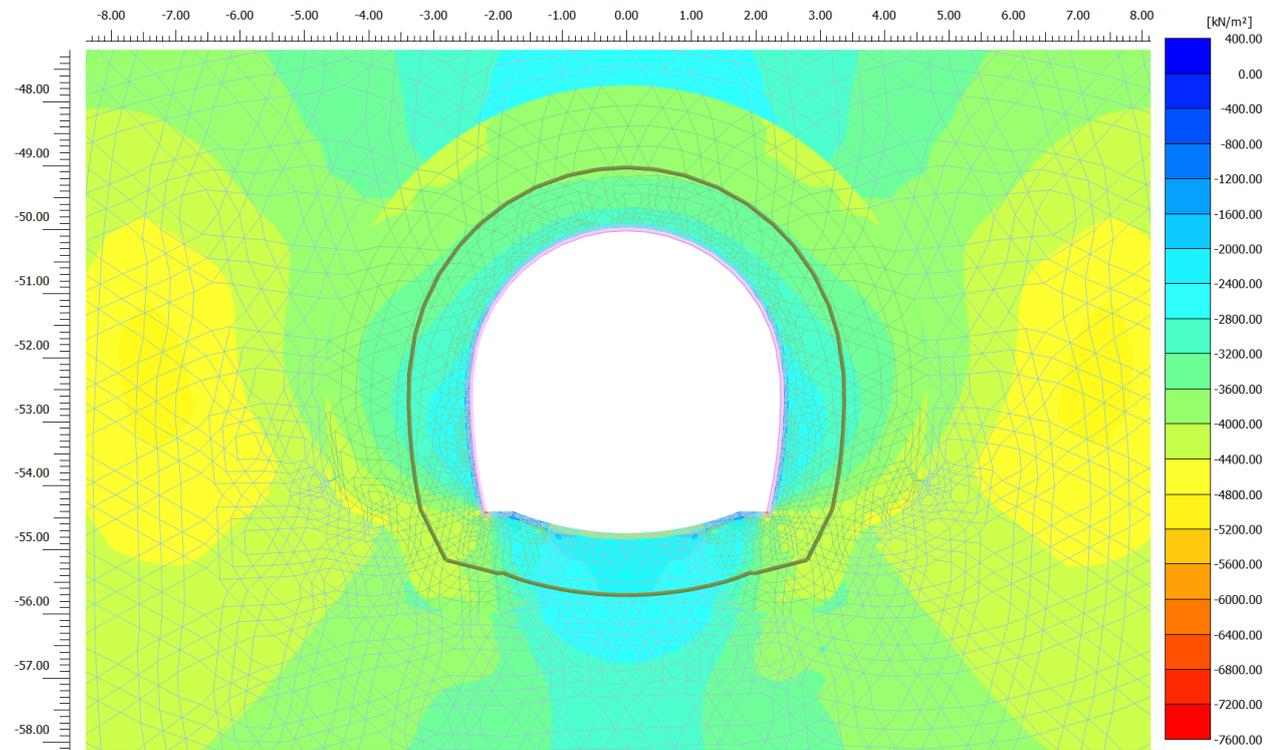
Minimum value = -0.03485 m (Element 8630 at Node 47082)



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 50.0 times)**

Maximum value = 0.04877 m (Element 8644 at Node 46061)

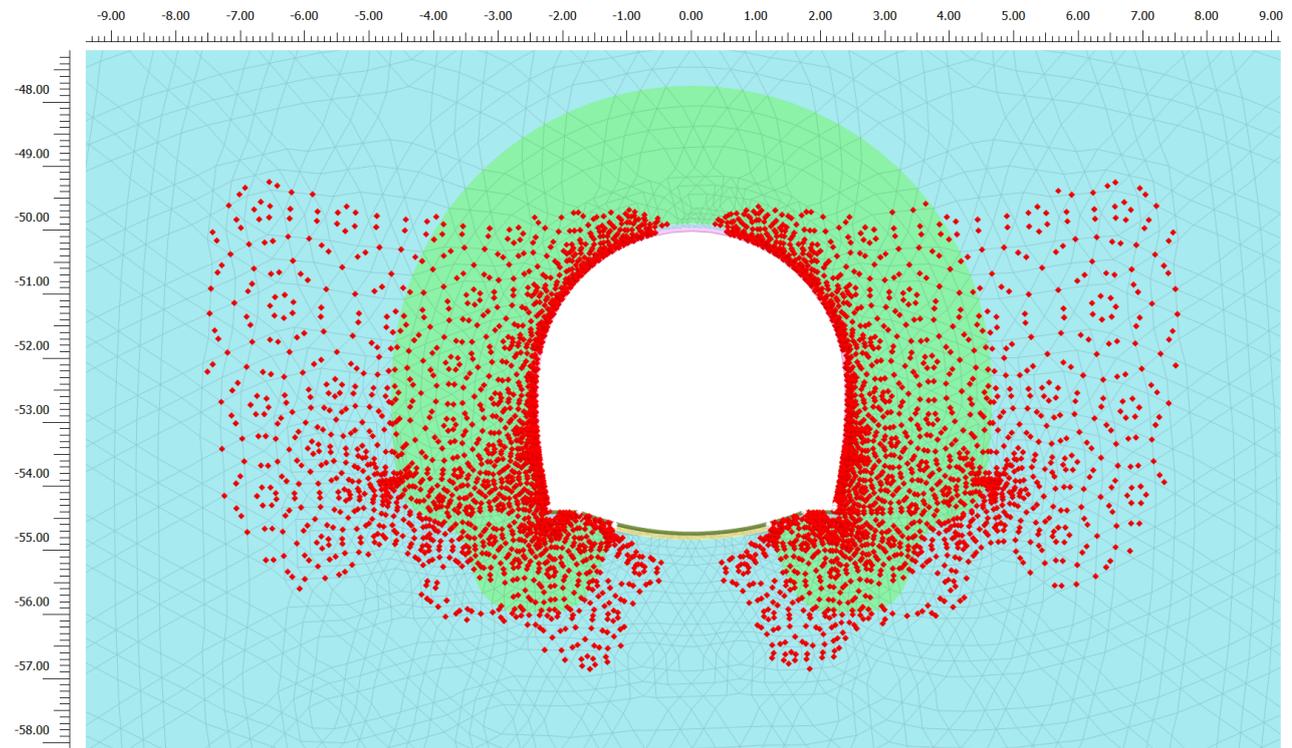
Minimum value = -0.04884 m (Element 8625 at Node 50237)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $1.00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value =  $2.028 \cdot 10^{-3}$  kN/m<sup>2</sup> (Element 196 at Node 5339)

Minimum value = -7223 kN/m<sup>2</sup> (Element 8687 at Node 52475)



**Plastic points (scaled up 0.00 times)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point

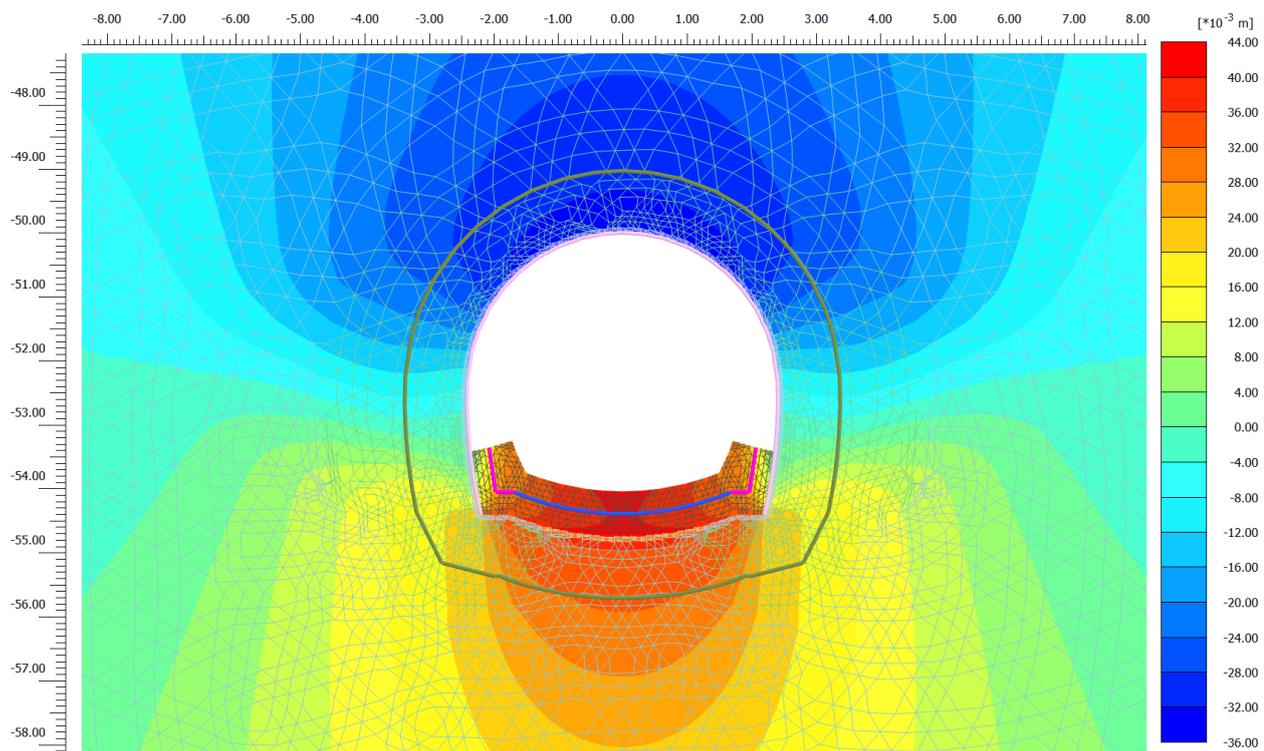
Nodo	Sollecitazioni di calcolo SLU				Verifica centina				Verifica spritz-beton	
	N <sub>Sd, sb</sub>	N <sub>Sd, cent</sub>	V <sub>Sd, cent</sub>	M <sub>Sd, cent</sub>	σ <sub>cent, d, max</sub>	τ <sub>cent, d</sub>	σ <sub>id, cent, d</sub>	Esito Verifica	σ <sub>sb, d, max</sub>	Esito Verifica
[-]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kNm/ml]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]	
45440	1125.7	167.6	68.1	37.7	147.2	27.4	154.6	VERIF.	4.5	VERIF.
45443	1125.2	167.6	34.7	32.5	131.0	14.0	133.2	VERIF.	4.5	VERIF.
45442	1124.6	167.5	1.5	30.7	125.3	0.6	125.3	VERIF.	4.5	VERIF.
45441	1123.9	167.4	31.8	32.2	130.0	12.8	131.9	VERIF.	4.5	VERIF.
45752	1123.1	167.2	64.9	37.1	145.2	26.1	152.1	VERIF.	4.5	VERIF.
45938	1123.6	167.3	68.4	38.0	147.9	27.5	155.4	VERIF.	4.5	VERIF.
45753	1123.7	167.3	35.3	32.7	131.6	14.2	133.9	VERIF.	4.5	VERIF.
45754	1123.6	167.3	2.2	30.8	125.7	0.9	125.7	VERIF.	4.5	VERIF.
45755	1123.4	167.3	31.1	32.3	130.2	12.5	132.0	VERIF.	4.5	VERIF.
45752	1123.1	167.3	64.4	37.1	145.2	25.9	152.0	VERIF.	4.5	VERIF.
45206	1131.1	168.4	75.7	39.8	153.8	30.5	162.6	VERIF.	4.5	VERIF.
45209	1130.1	168.3	40.3	33.5	134.2	16.2	137.2	VERIF.	4.5	VERIF.
45208	1129.0	168.1	4.8	31.1	126.6	2.0	126.6	VERIF.	4.5	VERIF.
45207	1127.5	167.9	30.7	32.5	130.9	12.3	132.6	VERIF.	4.5	VERIF.
45440	1125.9	167.7	66.2	37.7	147.2	26.6	154.3	VERIF.	4.5	VERIF.
46338	1126.7	167.8	75.6	40.3	155.1	30.4	163.8	VERIF.	4.5	VERIF.
45939	1126.4	167.7	40.6	34.0	135.5	16.4	138.4	VERIF.	4.5	VERIF.
45940	1125.7	167.6	5.4	31.5	127.7	2.2	127.8	VERIF.	4.5	VERIF.
45941	1124.9	167.5	30.0	32.8	131.8	12.1	133.5	VERIF.	4.5	VERIF.
45938	1123.9	167.4	65.6	38.0	147.9	26.4	154.8	VERIF.	4.5	VERIF.
45176	1136.9	169.3	87.3	42.9	163.5	35.1	174.5	VERIF.	4.5	VERIF.
45179	1136.3	169.2	47.0	34.3	136.8	18.9	140.7	VERIF.	4.5	VERIF.
45178	1135.1	169.0	6.2	30.9	126.3	2.5	126.3	VERIF.	4.5	VERIF.
45177	1133.3	168.8	34.8	32.7	131.9	14.0	134.1	VERIF.	4.5	VERIF.
45206	1131.2	168.4	76.2	39.8	153.8	30.7	162.7	VERIF.	4.5	VERIF.
46544	1129.8	168.2	86.6	43.4	165.1	34.9	175.8	VERIF.	4.5	VERIF.
46339	1129.8	168.2	46.9	34.9	138.6	18.9	142.4	VERIF.	4.5	VERIF.
46340	1129.3	168.2	6.6	31.5	127.9	2.7	128.0	VERIF.	4.5	VERIF.
46341	1128.3	168.0	34.3	33.2	133.4	13.8	135.5	VERIF.	4.5	VERIF.
46338	1126.8	167.8	75.7	40.3	155.1	30.5	163.8	VERIF.	4.5	VERIF.
44834	1138.2	169.5	78.3	44.7	169.3	31.5	177.9	VERIF.	4.6	VERIF.
44837	1139.2	169.6	41.7	37.6	147.2	16.8	150.0	VERIF.	4.6	VERIF.
44836	1139.5	169.7	4.3	34.9	138.7	1.7	138.7	VERIF.	4.6	VERIF.
44835	1139.2	169.6	33.7	36.6	144.1	13.6	146.0	VERIF.	4.6	VERIF.
45176	1138.2	169.5	72.2	42.9	163.5	29.1	171.1	VERIF.	4.6	VERIF.
47123	1128.2	168.0	76.8	45.2	170.3	30.9	178.6	VERIF.	4.5	VERIF.
46545	1129.9	168.3	41.0	38.1	148.6	16.5	151.4	VERIF.	4.5	VERIF.
46546	1130.9	168.4	4.2	35.5	140.3	1.7	140.3	VERIF.	4.5	VERIF.
46547	1131.3	168.5	33.5	37.2	145.7	13.5	147.6	VERIF.	4.5	VERIF.
46544	1131.0	168.4	71.9	43.4	165.1	28.9	172.6	VERIF.	4.5	VERIF.
44660	1128.2	168.0	77.9	45.7	172.1	31.4	180.5	VERIF.	4.5	VERIF.
44663	1131.8	168.5	41.2	38.5	149.6	16.6	152.4	VERIF.	4.5	VERIF.
44662	1134.8	169.0	2.9	35.8	141.3	1.2	141.3	VERIF.	4.5	VERIF.
44661	1136.9	169.3	36.7	37.8	147.7	14.8	149.9	VERIF.	4.5	VERIF.
44834	1138.4	169.5	77.6	44.7	169.3	31.2	177.7	VERIF.	4.6	VERIF.
47137	1114.9	166.0	75.9	45.7	171.8	30.5	179.8	VERIF.	4.5	VERIF.
47124	1119.4	166.7	40.0	38.7	150.0	16.1	152.5	VERIF.	4.5	VERIF.
47125	1123.1	167.2	2.3	36.1	142.0	0.9	142.1	VERIF.	4.5	VERIF.
47126	1126.0	167.7	37.1	38.2	148.6	14.9	150.9	VERIF.	4.5	VERIF.
47123	1128.2	168.0	77.6	45.2	170.3	31.3	178.7	VERIF.	4.5	VERIF.
44383	1110.4	165.4	61.7	45.8	171.9	24.8	177.2	VERIF.	4.4	VERIF.
44382	1115.9	166.2	32.9	40.9	156.7	13.2	158.3	VERIF.	4.5	VERIF.
44381	1120.8	166.9	1.7	39.0	151.2	0.7	151.2	VERIF.	4.5	VERIF.
44380	1125.2	167.6	31.7	40.6	156.1	12.8	157.6	VERIF.	4.5	VERIF.

44660	1129.0	168.1	67.1	45.7	172.1	27.0	178.4	VERIF.	4.5	VERIF.
47138	1094.0	162.9	59.3	45.3	169.9	23.9	174.8	VERIF.	4.4	VERIF.
47139	1100.2	163.8	31.2	40.6	155.4	12.6	156.9	VERIF.	4.4	VERIF.
47140	1105.9	164.7	0.5	38.9	150.3	0.2	150.3	VERIF.	4.4	VERIF.
47141	1111.0	165.4	32.5	40.5	155.6	13.1	157.2	VERIF.	4.4	VERIF.
47137	1115.6	166.1	67.6	45.7	171.8	27.2	178.2	VERIF.	4.5	VERIF.
44630	1071.6	159.6	58.7	41.3	156.7	23.6	162.0	VERIF.	4.3	VERIF.
44281	1082.1	161.1	28.1	35.6	139.4	11.3	140.7	VERIF.	4.3	VERIF.
44280	1091.7	162.6	6.3	34.1	135.1	2.5	135.2	VERIF.	4.4	VERIF.
44279	1100.6	163.9	44.4	37.4	145.4	17.9	148.7	VERIF.	4.4	VERIF.
44383	1108.7	165.1	86.2	45.8	171.9	34.7	182.1	VERIF.	4.4	VERIF.
47002	1051.0	156.5	55.7	40.1	152.5	22.4	157.3	VERIF.	4.2	VERIF.
46964	1062.5	158.2	26.3	34.7	136.1	10.6	137.3	VERIF.	4.2	VERIF.
46965	1073.1	159.8	7.4	33.4	132.4	3.0	132.5	VERIF.	4.3	VERIF.
46966	1082.9	161.3	45.1	36.8	143.2	18.2	146.6	VERIF.	4.3	VERIF.
47138	1092.0	162.6	86.5	45.3	169.8	34.8	180.2	VERIF.	4.4	VERIF.
44650	1014.7	151.1	32.8	27.6	112.7	13.2	115.0	VERIF.	4.1	VERIF.
44633	1029.1	153.3	7.3	25.0	105.1	2.9	105.3	VERIF.	4.1	VERIF.
44632	1042.9	155.3	24.1	26.1	108.8	9.7	110.1	VERIF.	4.2	VERIF.
44631	1055.9	157.2	59.0	31.3	125.4	23.7	132.0	VERIF.	4.2	VERIF.
44630	1068.2	159.1	98.0	41.3	156.6	39.5	170.9	VERIF.	4.3	VERIF.
47019	989.6	147.4	30.2	25.9	106.8	12.2	108.9	VERIF.	4.0	VERIF.
46999	1005.1	149.7	5.1	23.6	100.1	2.1	100.2	VERIF.	4.0	VERIF.
47000	1019.9	151.9	24.8	24.8	104.3	10.0	105.7	VERIF.	4.1	VERIF.
47001	1034.0	154.0	59.3	30.1	121.1	23.9	127.9	VERIF.	4.1	VERIF.
47002	1047.4	156.0	98.1	40.1	152.4	39.5	167.0	VERIF.	4.2	VERIF.
45102	951.8	141.7	2.3	8.3	51.2	0.9	51.2	VERIF.	3.8	VERIF.
44653	966.8	144.0	20.9	9.5	55.2	8.4	57.1	VERIF.	3.9	VERIF.
44652	981.4	146.1	43.5	12.8	65.9	17.5	72.6	VERIF.	3.9	VERIF.
44651	995.4	148.2	70.0	18.7	84.6	28.2	97.7	VERIF.	4.0	VERIF.
44650	1009.1	150.3	100.5	27.6	112.5	40.5	132.6	VERIF.	4.0	VERIF.
47200	922.9	137.4	3.5	6.6	45.1	1.4	45.2	VERIF.	3.7	VERIF.
47020	938.8	139.8	21.4	7.8	49.4	8.6	51.6	VERIF.	3.8	VERIF.
47021	954.3	142.1	43.5	11.2	60.2	17.5	67.4	VERIF.	3.8	VERIF.
47022	969.3	144.3	69.8	17.1	78.9	28.1	92.7	VERIF.	3.9	VERIF.
47019	983.9	146.5	99.9	25.9	106.7	40.2	127.4	VERIF.	3.9	VERIF.
45870	840.4	125.1	5.6	27.5	107.9	2.3	108.0	VERIF.	3.4	VERIF.
45105	866.1	129.0	25.7	25.2	101.3	10.3	102.9	VERIF.	3.5	VERIF.
45104	891.5	132.8	52.7	19.2	83.3	21.2	91.1	VERIF.	3.6	VERIF.
45103	916.5	136.5	87.0	8.4	50.5	35.0	78.9	VERIF.	3.7	VERIF.
45102	941.3	140.2	128.9	8.3	50.9	51.9	103.3	VERIF.	3.8	VERIF.
47356	805.6	120.0	5.8	28.2	109.2	2.3	109.2	VERIF.	3.2	VERIF.
47201	832.8	124.0	24.5	26.0	102.9	9.9	104.3	VERIF.	3.3	VERIF.
47202	859.7	128.0	50.8	20.2	85.7	20.5	92.7	VERIF.	3.4	VERIF.
47203	886.2	132.0	84.8	9.7	53.9	34.1	80.0	VERIF.	3.5	VERIF.
47200	912.5	135.9	126.4	6.6	44.8	50.9	98.9	VERIF.	3.7	VERIF.
46126	741.0	110.3	21.3	55.5	192.0	8.6	192.6	VERIF.	3.0	VERIF.
45873	764.1	113.8	35.9	52.0	181.8	14.5	183.5	VERIF.	3.1	VERIF.
45872	787.0	117.2	54.0	46.5	165.3	21.7	169.6	VERIF.	3.1	VERIF.
45871	809.8	120.6	76.1	38.5	141.1	30.6	150.8	VERIF.	3.2	VERIF.
45870	832.4	124.0	102.7	27.5	107.7	41.4	129.3	VERIF.	3.3	VERIF.
47366	701.0	104.4	18.5	54.4	187.7	7.5	188.2	VERIF.	2.8	VERIF.
47357	725.5	108.0	32.5	51.3	178.7	13.1	180.2	VERIF.	2.9	VERIF.
47358	749.8	111.7	50.3	46.3	163.7	20.2	167.4	VERIF.	3.0	VERIF.
47359	773.9	115.2	72.4	38.7	141.0	29.1	149.7	VERIF.	3.1	VERIF.
47356	797.9	118.8	99.0	28.2	108.9	39.9	129.0	VERIF.	3.2	VERIF.
47039	635.1	94.6	4.5	68.1	228.5	1.8	228.5	VERIF.	2.5	VERIF.
46132	661.2	98.5	7.7	67.9	228.6	3.1	228.7	VERIF.	2.6	VERIF.
46131	687.1	102.3	22.4	66.0	223.3	9.0	223.9	VERIF.	2.7	VERIF.

46130	712.8	106.1	39.8	62.0	211.5	16.0	213.3	VERIF.	2.9	VERIF.
46126	738.2	109.9	60.3	55.5	192.0	24.3	196.5	VERIF.	3.0	VERIF.
48956	588.7	87.7	7.7	64.9	217.2	3.1	217.3	VERIF.	2.4	VERIF.
47367	616.6	91.8	3.8	65.2	218.8	1.5	218.9	VERIF.	2.5	VERIF.
47368	644.1	95.9	18.1	63.8	215.2	7.3	215.6	VERIF.	2.6	VERIF.
47369	671.4	100.0	35.2	60.3	205.2	14.2	206.7	VERIF.	2.7	VERIF.
47366	698.4	104.0	55.5	54.4	187.7	22.3	191.6	VERIF.	2.8	VERIF.
47284	548.4	81.7	23.1	66.7	221.8	9.3	222.4	VERIF.	2.2	VERIF.
47042	570.4	84.9	14.4	68.6	228.3	5.8	228.6	VERIF.	2.3	VERIF.
47041	592.2	88.2	4.4	69.6	231.9	1.8	232.0	VERIF.	2.4	VERIF.
47040	613.6	91.4	7.0	69.5	232.1	2.8	232.2	VERIF.	2.5	VERIF.
47039	634.6	94.5	19.9	68.1	228.5	8.0	228.9	VERIF.	2.5	VERIF.
48982	495.8	73.8	25.8	61.8	205.3	10.4	206.1	VERIF.	2.0	VERIF.
48957	519.5	77.4	17.9	64.1	212.9	7.2	213.2	VERIF.	2.1	VERIF.
48958	542.9	80.8	8.5	65.4	217.7	3.4	217.8	VERIF.	2.2	VERIF.
48959	565.8	84.3	3.5	65.8	219.3	1.4	219.3	VERIF.	2.3	VERIF.
48956	588.4	87.6	15.0	64.9	217.2	6.0	217.5	VERIF.	2.4	VERIF.
47376	507.2	75.5	28.0	63.2	209.7	11.3	210.6	VERIF.	2.0	VERIF.
47287	517.8	77.1	24.0	64.3	213.6	9.7	214.3	VERIF.	2.1	VERIF.
47286	528.3	78.7	19.7	65.3	217.0	7.9	217.5	VERIF.	2.1	VERIF.
47285	538.6	80.2	14.9	66.1	219.8	6.0	220.0	VERIF.	2.2	VERIF.
47284	548.8	81.7	9.8	66.7	221.8	3.9	221.9	VERIF.	2.2	VERIF.
50689	451.4	67.2	30.4	57.7	191.3	12.3	192.4	VERIF.	1.8	VERIF.
48983	462.8	68.9	26.9	59.0	195.6	10.8	196.5	VERIF.	1.9	VERIF.
48984	474.2	70.6	22.9	60.2	199.5	9.2	200.1	VERIF.	1.9	VERIF.
48985	485.3	72.3	18.5	61.1	202.7	7.5	203.1	VERIF.	1.9	VERIF.
48982	496.3	73.9	13.7	61.8	205.3	5.5	205.5	VERIF.	2.0	VERIF.
48930	416.1	62.0	51.8	50.1	166.8	20.9	170.7	VERIF.	1.7	VERIF.
47379	440.2	65.5	44.6	54.6	181.2	17.9	183.9	VERIF.	1.8	VERIF.
47378	463.5	69.0	36.2	58.3	193.4	14.6	195.0	VERIF.	1.9	VERIF.
47377	486.0	72.4	26.8	61.2	203.0	10.8	203.8	VERIF.	1.9	VERIF.
47376	507.8	75.6	16.3	63.2	209.7	6.5	210.0	VERIF.	2.0	VERIF.
51876	357.2	53.2	50.5	44.2	146.6	20.3	150.8	VERIF.	1.4	VERIF.
50686	380.5	56.7	44.9	48.5	160.9	18.1	163.9	VERIF.	1.5	VERIF.
50687	404.2	60.2	37.9	52.3	173.3	15.3	175.3	VERIF.	1.6	VERIF.
50688	428.2	63.8	29.6	55.4	183.6	11.9	184.7	VERIF.	1.7	VERIF.
50689	452.5	67.4	20.0	57.7	191.3	8.0	191.8	VERIF.	1.8	VERIF.
49036	300.1	44.7	81.7	22.2	77.0	32.9	95.7	VERIF.	1.2	VERIF.
48933	329.2	49.0	72.9	31.0	105.0	29.3	116.7	VERIF.	1.3	VERIF.
48932	358.6	53.4	62.6	38.7	129.7	25.2	136.9	VERIF.	1.4	VERIF.
48931	388.4	57.8	50.7	45.1	150.5	20.4	154.6	VERIF.	1.6	VERIF.
48930	418.5	62.3	37.4	50.1	166.9	15.1	168.9	VERIF.	1.7	VERIF.
52360	242.8	36.2	69.6	18.2	63.0	28.0	79.5	VERIF.	1.0	VERIF.
51877	271.0	40.4	65.7	25.9	87.7	26.4	98.9	VERIF.	1.1	VERIF.
51878	299.9	44.7	58.9	33.0	110.5	23.7	117.8	VERIF.	1.2	VERIF.
51879	329.4	49.0	49.5	39.2	130.4	19.9	134.9	VERIF.	1.3	VERIF.
51876	359.3	53.5	37.9	44.2	146.7	15.3	149.1	VERIF.	1.4	VERIF.
49040	153.9	22.9	27.3	0.0	4.1	11.0	19.5	VERIF.	0.6	VERIF.
49039	200.0	29.8	68.8	3.9	17.3	27.7	51.0	VERIF.	0.8	VERIF.
49038	239.2	35.6	85.5	9.8	36.9	34.4	70.1	VERIF.	1.0	VERIF.
49037	272.7	40.6	83.1	16.4	58.3	33.4	82.2	VERIF.	1.1	VERIF.
49036	302.0	45.0	67.3	22.2	77.0	27.1	90.2	VERIF.	1.2	VERIF.
52365	175.0	26.1	42.8	0.0	4.7	17.2	30.2	VERIF.	0.7	VERIF.
52361	191.3	28.5	55.6	3.8	16.8	22.4	42.2	VERIF.	0.8	VERIF.
52362	208.1	31.0	64.0	8.4	31.6	25.8	54.7	VERIF.	0.8	VERIF.
52363	226.1	33.7	65.9	13.4	47.6	26.5	66.1	VERIF.	0.9	VERIF.
52360	246.0	36.6	58.9	18.2	63.1	23.7	75.3	VERIF.	1.0	VERIF.
50396	261.9	39.0	79.8	0.0	7.0	32.1	56.1	VERIF.	1.0	VERIF.
50394	331.5	49.4	101.0	7.0	30.7	40.7	76.8	VERIF.	1.3	VERIF.

50393	383.0	57.0	106.4	15.0	56.8	42.8	93.4	VERIF.	1.5	VERIF.
50392	420.9	62.7	100.5	23.0	82.6	40.5	108.3	VERIF.	1.7	VERIF.
50391	450.1	67.0	87.9	30.2	105.7	35.4	122.2	VERIF.	1.8	VERIF.
57147	314.4	46.8	87.5	0.0	8.4	35.2	61.6	VERIF.	1.3	VERIF.
57143	330.8	49.3	93.5	6.9	30.3	37.6	71.9	VERIF.	1.3	VERIF.
57144	347.7	51.8	96.8	14.2	53.4	39.0	86.0	VERIF.	1.4	VERIF.
57145	365.4	54.4	95.8	21.6	76.7	38.6	101.7	VERIF.	1.5	VERIF.
57142	384.3	57.2	89.1	28.7	99.3	35.9	117.1	VERIF.	1.5	VERIF.

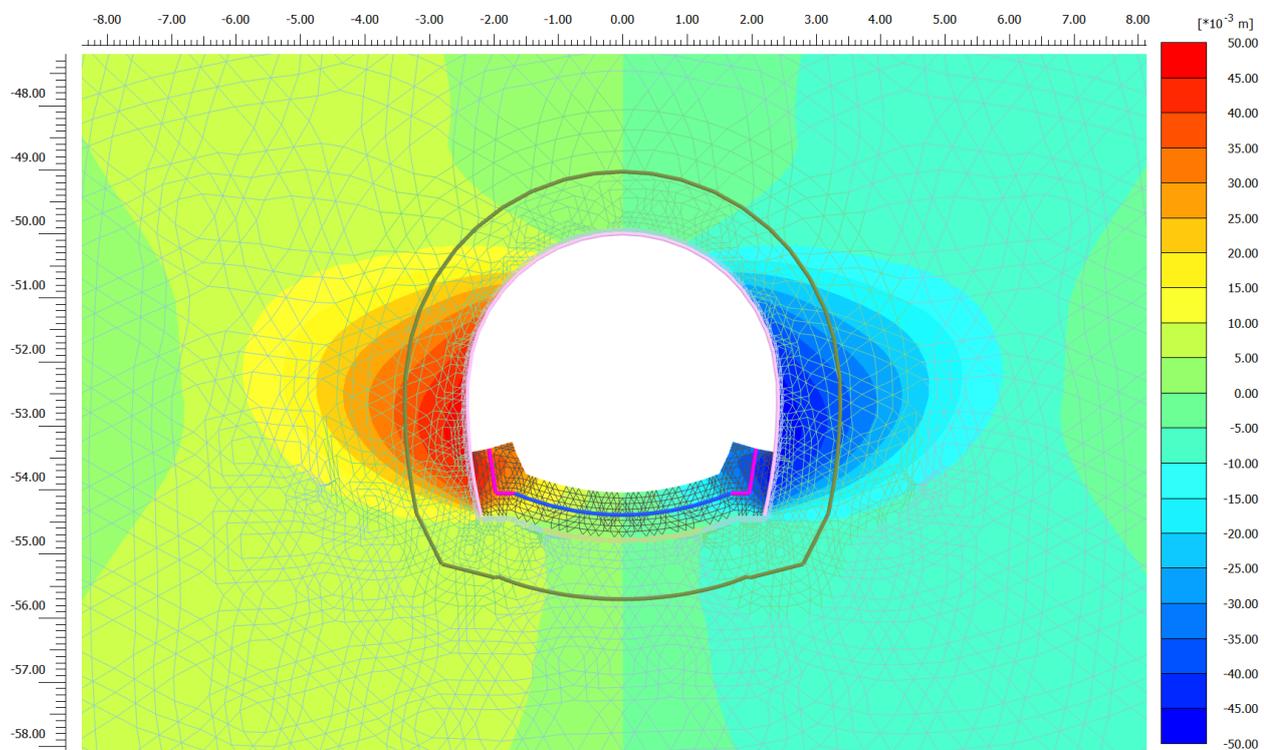
## Fase 7



**Total displacements  $u_y$  (scaled up 50.0 times)**

Maximum value = 0.04061 m (Element 8922 at Node 49960)

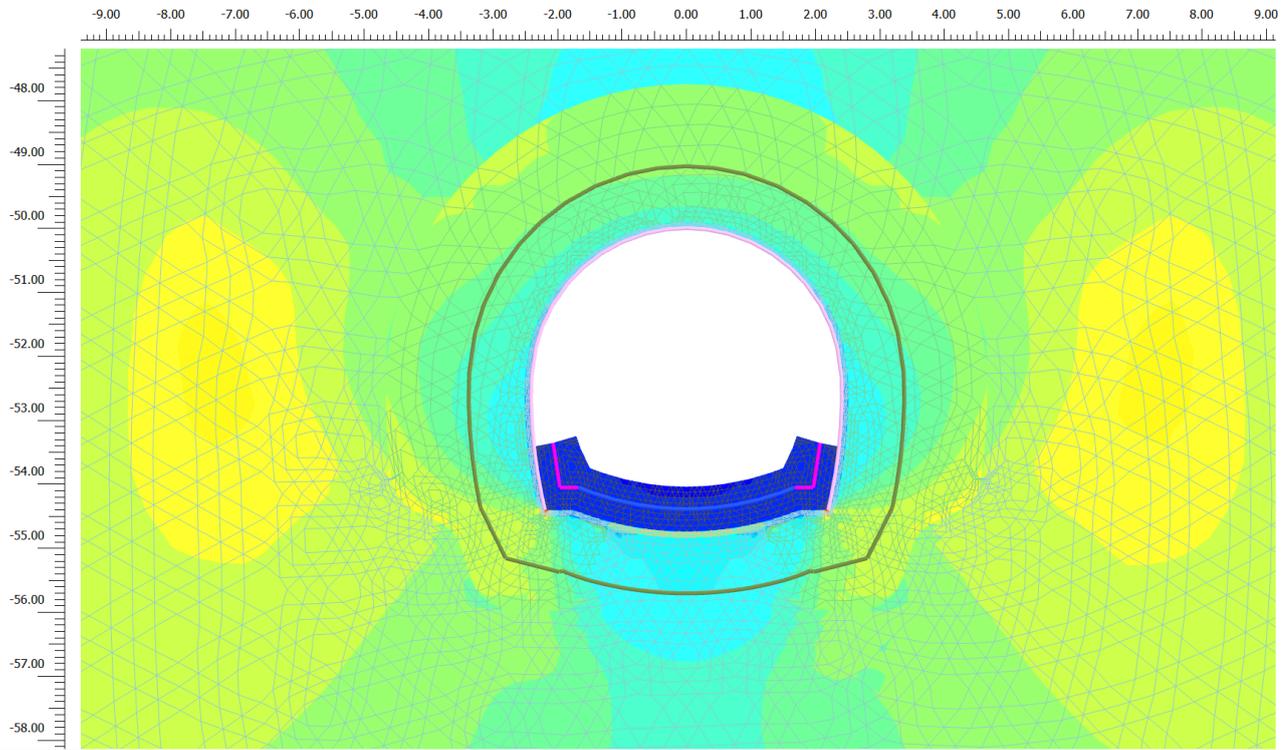
Minimum value = -0.03487 m (Element 8630 at Node 47082)



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 50.0 times)**

Maximum value = 0.04930 m (Element 8963 at Node 47284)

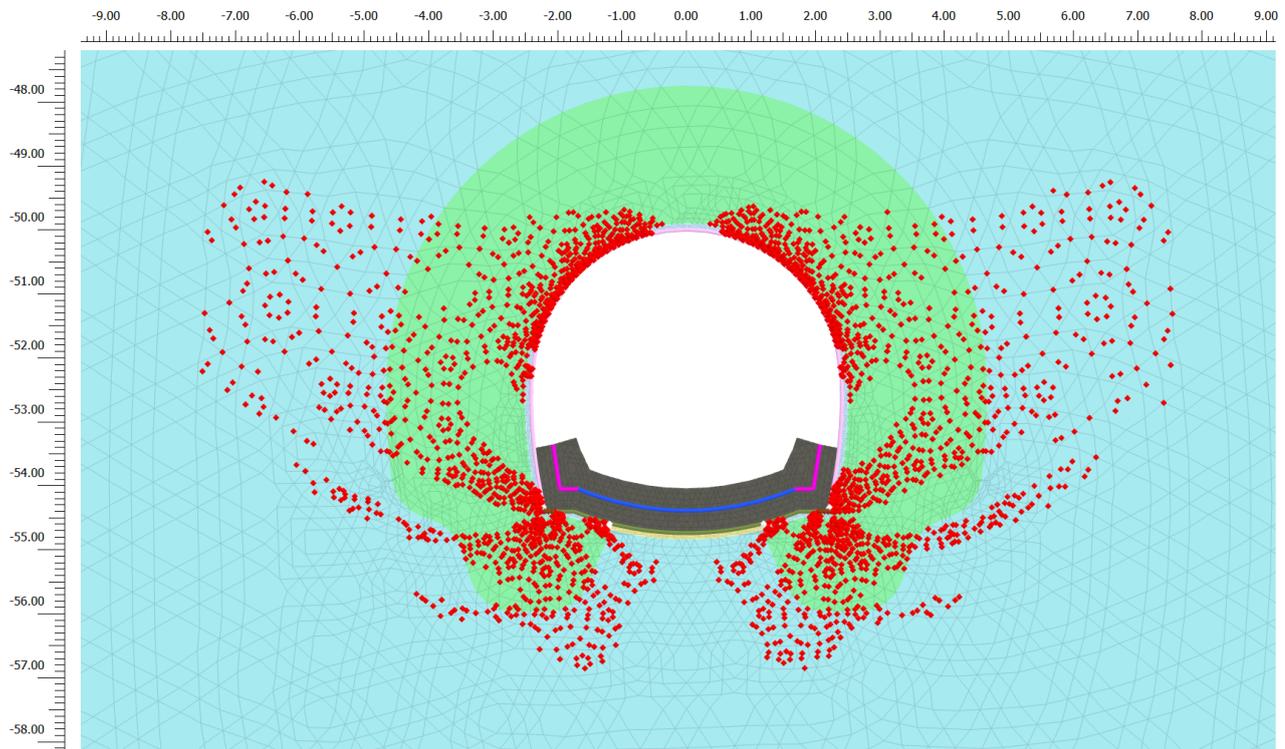
Minimum value = -0.04939 m (Element 8964 at Node 48982)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $1.00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value = 1.010 kN/m<sup>2</sup> (Element 8934 at Node 50666)

Minimum value = -7212 kN/m<sup>2</sup> (Element 8687 at Node 52475)



**Plastic points (scaled up 0.00 times)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point

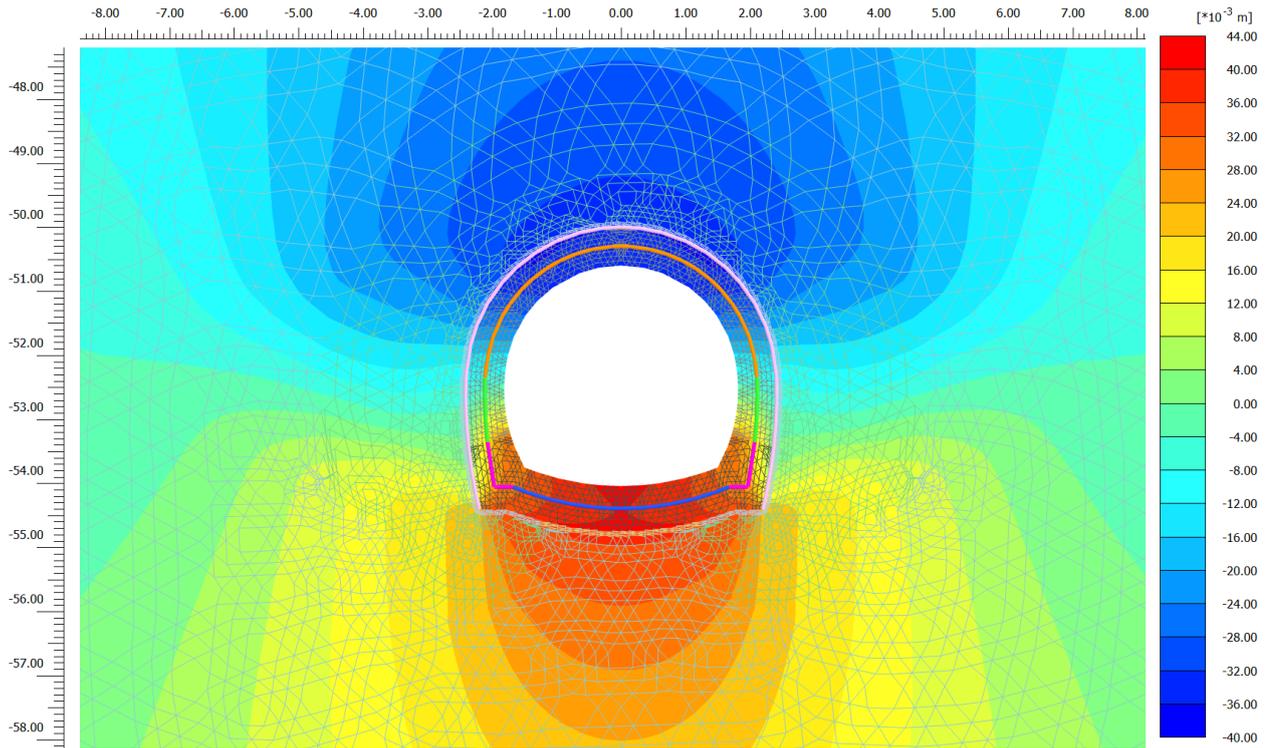
Nodo	Sollecitazioni di calcolo SLU				Verifica centina			Verifica spritz-beton		
	N <sub>Sd, sb</sub>	N <sub>Sd, cent</sub>	V <sub>Sd, cent</sub>	M <sub>Sd, cent</sub>	σ <sub>cent, d, max</sub>	τ <sub>cent, d</sub>	σ <sub>id, cent, d</sub>	Esito Verifica	σ <sub>sb, d, max</sub>	Esito Verifica
[-]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kN/ml]	[kNm/ml]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]	
45440	1148.9	171.1	69.4	37.7	147.8	28.0	155.5	VERIF.	4.6	VERIF.
45443	1148.4	171.0	35.4	32.5	131.6	14.3	133.9	VERIF.	4.6	VERIF.
45442	1147.8	170.9	1.5	30.7	125.9	0.6	125.9	VERIF.	4.6	VERIF.
45441	1147.0	170.8	32.4	32.2	130.6	13.1	132.6	VERIF.	4.6	VERIF.
45752	1146.2	170.7	66.3	37.1	145.9	26.7	153.0	VERIF.	4.6	VERIF.
45938	1146.8	170.8	69.8	38.0	148.5	28.1	156.3	VERIF.	4.6	VERIF.
45753	1146.8	170.8	36.1	32.7	132.2	14.5	134.6	VERIF.	4.6	VERIF.
45754	1146.8	170.8	2.2	30.8	126.3	0.9	126.3	VERIF.	4.6	VERIF.
45755	1146.6	170.7	31.7	32.3	130.8	12.8	132.7	VERIF.	4.6	VERIF.
45752	1146.2	170.7	65.7	37.1	145.9	26.5	152.9	VERIF.	4.6	VERIF.
45206	1154.6	171.9	77.2	39.8	154.4	31.1	163.6	VERIF.	4.6	VERIF.
45209	1153.5	171.8	41.1	33.5	134.9	16.5	137.9	VERIF.	4.6	VERIF.
45208	1152.3	171.6	4.9	31.1	127.2	2.0	127.3	VERIF.	4.6	VERIF.
45207	1150.8	171.4	31.3	32.5	131.5	12.6	133.3	VERIF.	4.6	VERIF.
45440	1149.1	171.1	67.6	37.7	147.8	27.2	155.1	VERIF.	4.6	VERIF.
46338	1150.3	171.3	77.2	40.3	155.7	31.1	164.8	VERIF.	4.6	VERIF.
45939	1149.8	171.2	41.4	34.0	136.1	16.7	139.2	VERIF.	4.6	VERIF.
45940	1149.1	171.1	5.5	31.5	128.3	2.2	128.4	VERIF.	4.6	VERIF.
45941	1148.2	171.0	30.7	32.8	132.5	12.4	134.2	VERIF.	4.6	VERIF.
45938	1147.1	170.8	67.0	38.0	148.5	27.0	155.7	VERIF.	4.6	VERIF.
45176	1161.0	172.9	89.1	42.9	164.2	35.9	175.5	VERIF.	4.6	VERIF.
45179	1160.1	172.8	47.9	34.3	137.5	19.3	141.5	VERIF.	4.6	VERIF.
45178	1158.8	172.6	6.3	30.9	126.9	2.5	127.0	VERIF.	4.6	VERIF.
45177	1156.9	172.3	35.6	32.7	132.5	14.3	134.8	VERIF.	4.6	VERIF.
45206	1154.6	171.9	77.8	39.8	154.4	31.3	163.7	VERIF.	4.6	VERIF.
46544	1153.9	171.8	88.5	43.5	165.8	35.6	176.9	VERIF.	4.6	VERIF.
46339	1153.8	171.8	47.9	34.9	139.2	19.3	143.2	VERIF.	4.6	VERIF.
46340	1153.1	171.7	6.7	31.5	128.6	2.7	128.6	VERIF.	4.6	VERIF.
46341	1152.0	171.5	35.1	33.2	134.0	14.1	136.2	VERIF.	4.6	VERIF.
46338	1150.4	171.3	77.3	40.3	155.7	31.1	164.8	VERIF.	4.6	VERIF.
44834	1162.9	173.2	80.0	44.8	170.1	32.2	179.0	VERIF.	4.7	VERIF.
44837	1163.7	173.3	42.6	37.6	147.8	17.2	150.8	VERIF.	4.7	VERIF.
44836	1163.9	173.3	4.4	34.9	139.3	1.8	139.4	VERIF.	4.7	VERIF.
44835	1163.4	173.2	34.4	36.6	144.7	13.9	146.7	VERIF.	4.7	VERIF.
45176	1162.2	173.1	73.7	42.9	164.2	29.7	172.0	VERIF.	4.6	VERIF.
47123	1153.0	171.7	78.6	45.2	171.2	31.6	179.7	VERIF.	4.6	VERIF.
46545	1154.5	171.9	41.9	38.1	149.3	16.9	152.1	VERIF.	4.6	VERIF.
46546	1155.3	172.0	4.2	35.5	141.0	1.7	141.0	VERIF.	4.6	VERIF.
46547	1155.5	172.1	34.3	37.2	146.3	13.8	148.3	VERIF.	4.6	VERIF.
46544	1155.1	172.0	73.4	43.5	165.8	29.6	173.5	VERIF.	4.6	VERIF.
44660	1153.5	171.8	79.9	45.8	173.1	32.2	181.9	VERIF.	4.6	VERIF.
44663	1157.1	172.3	42.3	38.5	150.3	17.0	153.2	VERIF.	4.6	VERIF.
44662	1159.8	172.7	3.1	35.8	142.0	1.2	142.0	VERIF.	4.6	VERIF.
44661	1161.8	173.0	37.4	37.8	148.4	15.1	150.7	VERIF.	4.6	VERIF.
44834	1163.1	173.2	79.1	44.8	170.1	31.9	178.8	VERIF.	4.7	VERIF.
47137	1140.4	169.8	77.9	45.9	172.9	31.3	181.2	VERIF.	4.6	VERIF.
47124	1144.7	170.5	41.1	38.7	150.7	16.5	153.3	VERIF.	4.6	VERIF.
47125	1148.2	171.0	2.4	36.1	142.7	1.0	142.7	VERIF.	4.6	VERIF.
47126	1151.0	171.4	37.8	38.2	149.3	15.2	151.6	VERIF.	4.6	VERIF.
47123	1153.0	171.7	79.2	45.2	171.2	31.9	179.9	VERIF.	4.6	VERIF.
44383	1136.5	169.2	63.5	46.0	173.3	25.6	178.8	VERIF.	4.5	VERIF.
44382	1141.8	170.0	33.9	40.9	157.6	13.6	159.4	VERIF.	4.6	VERIF.
44381	1146.6	170.7	1.9	39.1	151.9	0.8	151.9	VERIF.	4.6	VERIF.
44380	1150.8	171.4	32.3	40.6	156.8	13.0	158.5	VERIF.	4.6	VERIF.
44660	1154.5	171.9	68.4	45.8	173.2	27.5	179.6	VERIF.	4.6	VERIF.

47138	1120.2	166.8	61.0	45.5	171.3	24.6	176.5	VERIF.	4.5	VERIF.
47139	1126.3	167.7	32.2	40.7	156.3	13.0	157.9	VERIF.	4.5	VERIF.
47140	1131.8	168.5	0.7	38.9	151.1	0.3	151.1	VERIF.	4.5	VERIF.
47141	1136.7	169.3	33.1	40.6	156.4	13.3	158.1	VERIF.	4.5	VERIF.
47137	1141.1	169.9	68.9	45.9	172.9	27.7	179.5	VERIF.	4.6	VERIF.
44630	1098.4	163.6	60.7	41.6	158.4	24.4	163.9	VERIF.	4.4	VERIF.
44281	1108.7	165.1	29.2	35.7	140.4	11.8	141.8	VERIF.	4.4	VERIF.
44280	1118.2	166.5	6.1	34.1	135.9	2.5	135.9	VERIF.	4.5	VERIF.
44279	1126.8	167.8	45.2	37.4	146.3	18.2	149.7	VERIF.	4.5	VERIF.
44383	1134.7	169.0	87.9	46.0	173.2	35.4	183.7	VERIF.	4.5	VERIF.
47002	1077.9	160.5	57.8	40.4	154.1	23.3	159.3	VERIF.	4.3	VERIF.
46964	1089.2	162.2	27.4	34.8	137.1	11.0	138.4	VERIF.	4.4	VERIF.
46965	1099.7	163.8	7.4	33.4	133.2	3.0	133.3	VERIF.	4.4	VERIF.
46966	1109.3	165.2	45.9	36.9	144.1	18.5	147.6	VERIF.	4.4	VERIF.
47138	1118.2	166.5	88.1	45.5	171.2	35.5	181.9	VERIF.	4.5	VERIF.
44650	1042.1	155.2	34.5	27.8	114.2	13.9	116.7	VERIF.	4.2	VERIF.
44633	1056.4	157.3	7.4	25.1	106.2	3.0	106.3	VERIF.	4.2	VERIF.
44632	1070.0	159.3	24.2	26.1	109.7	9.7	111.0	VERIF.	4.3	VERIF.
44631	1082.8	161.3	59.9	31.4	126.5	24.1	133.3	VERIF.	4.3	VERIF.
44630	1095.1	163.1	99.9	41.6	158.3	40.2	172.9	VERIF.	4.4	VERIF.
47019	1017.2	151.5	32.0	26.2	108.4	12.9	110.7	VERIF.	4.1	VERIF.
46999	1032.5	153.8	5.9	23.7	101.1	2.4	101.2	VERIF.	4.1	VERIF.
47000	1047.2	155.9	24.9	24.9	105.1	10.0	106.6	VERIF.	4.2	VERIF.
47001	1061.1	158.0	60.3	30.2	122.2	24.3	129.2	VERIF.	4.2	VERIF.
47002	1074.3	160.0	99.9	40.4	154.0	40.2	169.1	VERIF.	4.3	VERIF.
45102	979.5	145.9	2.1	8.4	52.2	0.9	52.2	VERIF.	3.9	VERIF.
44653	994.5	148.1	20.6	9.5	56.0	8.3	57.8	VERIF.	4.0	VERIF.
44652	1008.9	150.2	43.9	12.8	66.8	17.7	73.4	VERIF.	4.0	VERIF.
44651	1022.9	152.3	71.2	18.8	85.7	28.6	99.0	VERIF.	4.1	VERIF.
44650	1036.5	154.3	102.4	27.8	114.1	41.2	134.6	VERIF.	4.1	VERIF.
47200	950.8	141.6	3.5	6.7	46.1	1.4	46.1	VERIF.	3.8	VERIF.
47020	966.6	143.9	21.4	7.9	50.2	8.6	52.4	VERIF.	3.9	VERIF.
47021	982.0	146.2	43.9	11.2	61.0	17.7	68.3	VERIF.	3.9	VERIF.
47022	996.9	148.5	70.9	17.2	79.9	28.5	94.0	VERIF.	4.0	VERIF.
47019	1011.5	150.6	101.8	26.2	108.2	41.0	129.4	VERIF.	4.0	VERIF.
45870	868.3	129.3	4.1	27.8	109.5	1.7	109.6	VERIF.	3.5	VERIF.
45105	894.0	133.1	25.3	25.6	103.4	10.2	104.9	VERIF.	3.6	VERIF.
45104	919.2	136.9	53.3	19.6	85.4	21.5	93.1	VERIF.	3.7	VERIF.
45103	944.2	140.6	88.6	8.6	52.0	35.7	80.8	VERIF.	3.8	VERIF.
45102	968.9	144.3	131.6	8.4	51.9	53.0	105.4	VERIF.	3.9	VERIF.
47356	833.7	124.1	5.8	28.5	110.8	2.3	110.9	VERIF.	3.3	VERIF.
47201	860.8	128.2	24.5	26.4	105.0	9.9	106.4	VERIF.	3.4	VERIF.
47202	887.6	132.2	51.4	20.6	87.8	20.7	94.8	VERIF.	3.6	VERIF.
47203	914.0	136.1	86.4	10.0	55.4	34.8	81.9	VERIF.	3.7	VERIF.
47200	940.3	140.0	129.1	6.7	45.8	52.0	101.0	VERIF.	3.8	VERIF.
46126	769.0	114.5	19.8	55.8	194.0	8.0	194.5	VERIF.	3.1	VERIF.
45873	792.1	117.9	35.3	52.5	184.1	14.2	185.8	VERIF.	3.2	VERIF.
45872	815.0	121.4	54.2	47.0	167.7	21.8	172.0	VERIF.	3.3	VERIF.
45871	837.7	124.7	77.1	38.9	143.3	31.1	153.1	VERIF.	3.4	VERIF.
45870	860.3	128.1	104.5	27.8	109.3	42.1	131.4	VERIF.	3.4	VERIF.
47366	729.2	108.6	18.5	54.8	189.7	7.5	190.1	VERIF.	2.9	VERIF.
47357	753.6	112.2	32.5	51.8	181.1	13.1	182.5	VERIF.	3.0	VERIF.
47358	777.9	115.8	50.5	46.8	166.1	20.3	169.8	VERIF.	3.1	VERIF.
47359	802.0	119.4	73.4	39.2	143.2	29.5	152.1	VERIF.	3.2	VERIF.
47356	825.9	123.0	100.8	28.5	110.6	40.6	131.1	VERIF.	3.3	VERIF.
47039	663.3	98.8	8.8	68.1	229.3	3.5	229.3	VERIF.	2.7	VERIF.
46132	689.4	102.7	4.6	67.9	229.4	1.9	229.4	VERIF.	2.8	VERIF.
46131	715.2	106.5	20.4	66.1	224.5	8.2	224.9	VERIF.	2.9	VERIF.
46130	740.8	110.3	38.8	62.3	213.2	15.6	214.9	VERIF.	3.0	VERIF.

46126	766.3	114.1	60.3	55.8	193.9	24.3	198.4	VERIF.	3.1	VERIF.
48956	617.1	91.9	12.0	64.9	218.0	4.8	218.1	VERIF.	2.5	VERIF.
47367	644.9	96.0	3.8	65.2	219.6	1.5	219.6	VERIF.	2.6	VERIF.
47368	672.4	100.1	18.1	63.9	216.4	7.3	216.8	VERIF.	2.7	VERIF.
47369	699.7	104.2	35.2	60.6	207.0	14.2	208.5	VERIF.	2.8	VERIF.
47366	726.7	108.2	55.5	54.8	189.6	22.3	193.5	VERIF.	2.9	VERIF.
47284	576.9	85.9	30.5	66.7	222.5	12.3	223.6	VERIF.	2.3	VERIF.
47042	598.9	89.2	20.7	68.6	229.1	8.3	229.5	VERIF.	2.4	VERIF.
47041	620.6	92.4	9.6	69.6	232.7	3.9	232.8	VERIF.	2.5	VERIF.
47040	641.9	95.6	2.8	69.5	232.9	1.1	232.9	VERIF.	2.6	VERIF.
47039	663.0	98.7	16.7	68.1	229.3	6.7	229.6	VERIF.	2.7	VERIF.
48982	524.5	78.1	33.2	61.8	206.1	13.4	207.3	VERIF.	2.1	VERIF.
48957	548.2	81.6	24.2	64.1	213.6	9.7	214.3	VERIF.	2.2	VERIF.
48958	571.5	85.1	13.7	65.4	218.5	5.5	218.7	VERIF.	2.3	VERIF.
48959	594.4	88.5	3.5	65.8	220.1	1.4	220.1	VERIF.	2.4	VERIF.
48956	617.0	91.9	15.0	64.9	218.0	6.0	218.2	VERIF.	2.5	VERIF.
47376	523.3	77.9	28.0	63.2	210.1	11.3	211.0	VERIF.	2.1	VERIF.
47287	535.7	79.8	24.0	64.3	214.1	9.7	214.8	VERIF.	2.1	VERIF.
47286	548.4	81.7	19.7	65.3	217.6	7.9	218.0	VERIF.	2.2	VERIF.
47285	560.9	83.5	14.9	66.1	220.4	6.0	220.6	VERIF.	2.2	VERIF.
47284	572.4	85.2	10.8	66.7	222.4	4.3	222.5	VERIF.	2.3	VERIF.
50689	467.6	69.6	23.4	57.7	191.7	9.4	192.4	VERIF.	1.9	VERIF.
48983	480.8	71.6	19.8	59.0	196.1	8.0	196.6	VERIF.	1.9	VERIF.
48984	494.4	73.6	16.4	60.2	200.0	6.6	200.3	VERIF.	2.0	VERIF.
48985	507.7	75.6	14.3	61.1	203.3	5.8	203.6	VERIF.	2.0	VERIF.
48982	520.1	77.4	14.7	61.8	205.9	5.9	206.2	VERIF.	2.1	VERIF.
48930	425.4	63.3	51.8	50.1	167.1	20.9	171.0	VERIF.	1.7	VERIF.
47379	450.7	67.1	44.6	54.6	181.5	17.9	184.1	VERIF.	1.8	VERIF.
47378	475.6	70.8	36.2	58.3	193.7	14.6	195.3	VERIF.	1.9	VERIF.
47377	499.9	74.4	26.8	61.2	203.3	10.8	204.2	VERIF.	2.0	VERIF.
47376	523.9	78.0	16.3	63.2	210.1	6.5	210.4	VERIF.	2.1	VERIF.
51876	366.6	54.6	48.8	44.2	146.9	19.7	150.8	VERIF.	1.5	VERIF.
50686	391.2	58.3	42.2	48.5	161.1	17.0	163.8	VERIF.	1.6	VERIF.
50687	416.4	62.0	34.0	52.3	173.6	13.7	175.2	VERIF.	1.7	VERIF.
50688	442.2	65.9	24.1	55.4	183.9	9.7	184.7	VERIF.	1.8	VERIF.
50689	468.6	69.8	12.7	57.7	191.7	5.1	191.9	VERIF.	1.9	VERIF.
49036	304.0	45.3	81.7	22.2	77.1	32.9	95.8	VERIF.	1.2	VERIF.
48933	334.5	49.8	72.9	31.0	105.2	29.3	116.8	VERIF.	1.3	VERIF.
48932	365.3	54.4	62.6	38.7	129.9	25.2	137.0	VERIF.	1.5	VERIF.
48931	396.5	59.0	50.7	45.1	150.7	20.4	154.8	VERIF.	1.6	VERIF.
48930	427.9	63.7	37.4	50.1	167.2	15.1	169.2	VERIF.	1.7	VERIF.
52360	246.8	36.8	69.6	18.2	63.1	28.0	79.6	VERIF.	1.0	VERIF.
51877	276.5	41.2	65.6	25.9	87.8	26.4	99.0	VERIF.	1.1	VERIF.
51878	306.7	45.7	58.5	33.0	110.6	23.6	117.9	VERIF.	1.2	VERIF.
51879	337.5	50.3	48.6	39.2	130.7	19.6	135.0	VERIF.	1.4	VERIF.
51876	368.8	54.9	36.1	44.2	147.0	14.5	149.1	VERIF.	1.5	VERIF.
49040	154.5	23.0	27.3	0.0	4.1	11.0	19.5	VERIF.	0.6	VERIF.
49039	201.3	30.0	68.8	3.9	17.4	27.7	51.0	VERIF.	0.8	VERIF.
49038	241.3	35.9	85.5	9.8	37.0	34.4	70.2	VERIF.	1.0	VERIF.
49037	275.8	41.1	83.1	16.4	58.4	33.4	82.2	VERIF.	1.1	VERIF.
49036	306.0	45.6	67.3	22.2	77.1	27.1	90.3	VERIF.	1.2	VERIF.
52365	175.7	26.2	42.3	0.0	4.7	17.0	29.8	VERIF.	0.7	VERIF.
52361	192.6	28.7	55.2	3.8	16.8	22.2	42.0	VERIF.	0.8	VERIF.
52362	210.3	31.3	63.8	8.4	31.6	25.7	54.6	VERIF.	0.8	VERIF.
52363	229.3	34.1	65.8	13.4	47.6	26.5	66.2	VERIF.	0.9	VERIF.
52360	250.1	37.2	58.7	18.2	63.2	23.6	75.3	VERIF.	1.0	VERIF.
50396	262.1	39.0	79.8	0.0	7.0	32.1	56.1	VERIF.	1.0	VERIF.
50394	332.0	49.4	101.0	7.0	30.7	40.7	76.8	VERIF.	1.3	VERIF.
50393	383.9	57.2	106.4	15.0	56.8	42.8	93.5	VERIF.	1.5	VERIF.

50392	422.5	62.9	100.5	23.0	82.6	40.5	108.4	VERIF.	1.7	VERIF.
50391	452.4	67.4	87.9	30.2	105.8	35.4	122.3	VERIF.	1.8	VERIF.
57147	314.7	46.9	87.1	0.0	8.4	35.1	61.3	VERIF.	1.3	VERIF.
57143	331.3	49.3	93.1	6.9	30.3	37.5	71.6	VERIF.	1.3	VERIF.
57144	348.6	51.9	96.5	14.2	53.4	38.9	85.9	VERIF.	1.4	VERIF.
57145	367.0	54.7	95.7	21.6	76.8	38.5	101.7	VERIF.	1.5	VERIF.
57142	386.6	57.6	88.8	28.7	99.3	35.8	117.1	VERIF.	1.5	VERIF.

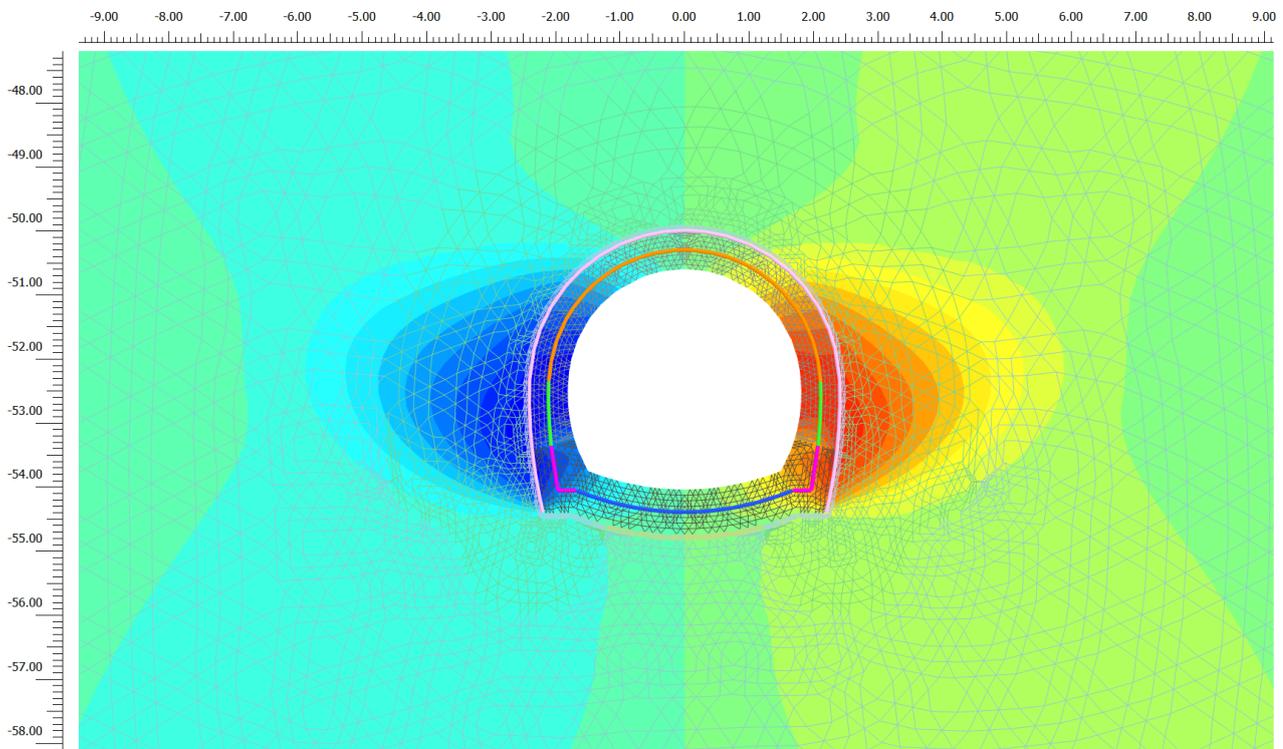
## Fase 8



### Total displacements $u_y$ (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.04052 m (Element 8922 at Node 50660)

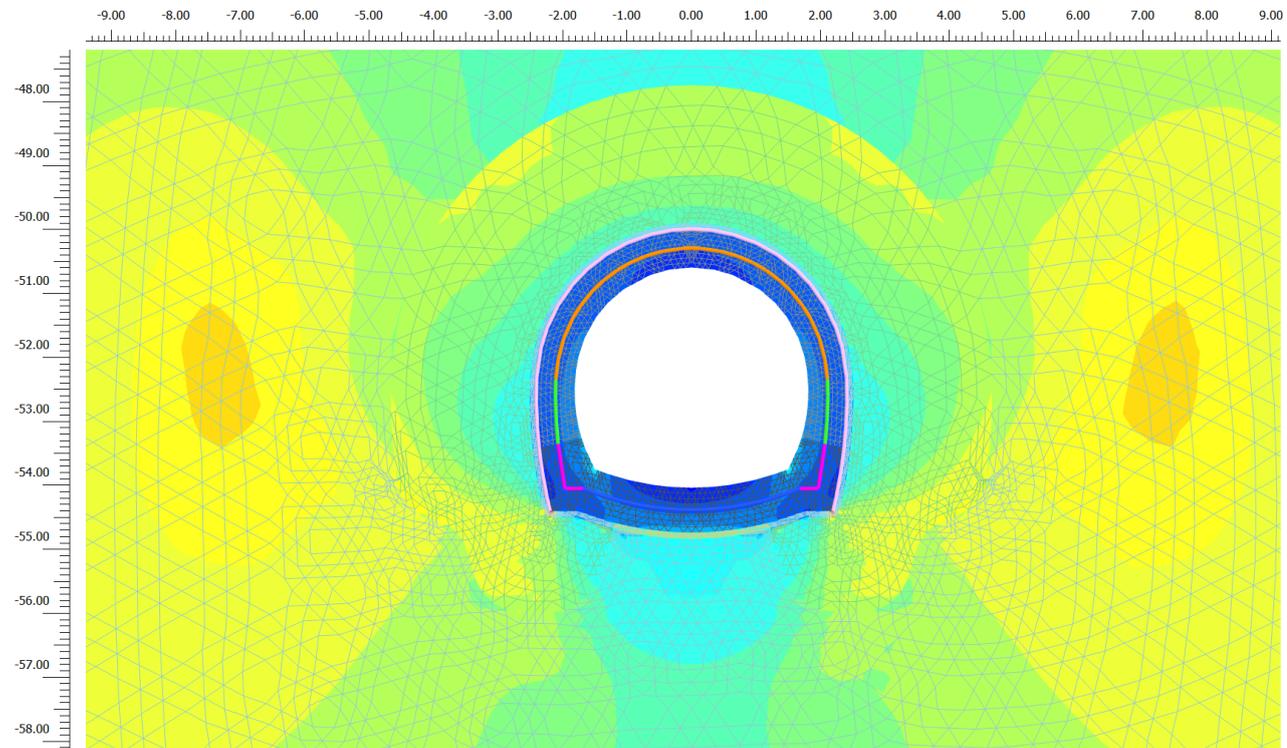
Minimum value = -0.03740 m (Element 7832 at Node 47123)



### Total displacements $u_x$ (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.04982 m (Element 7835 at Node 46132)

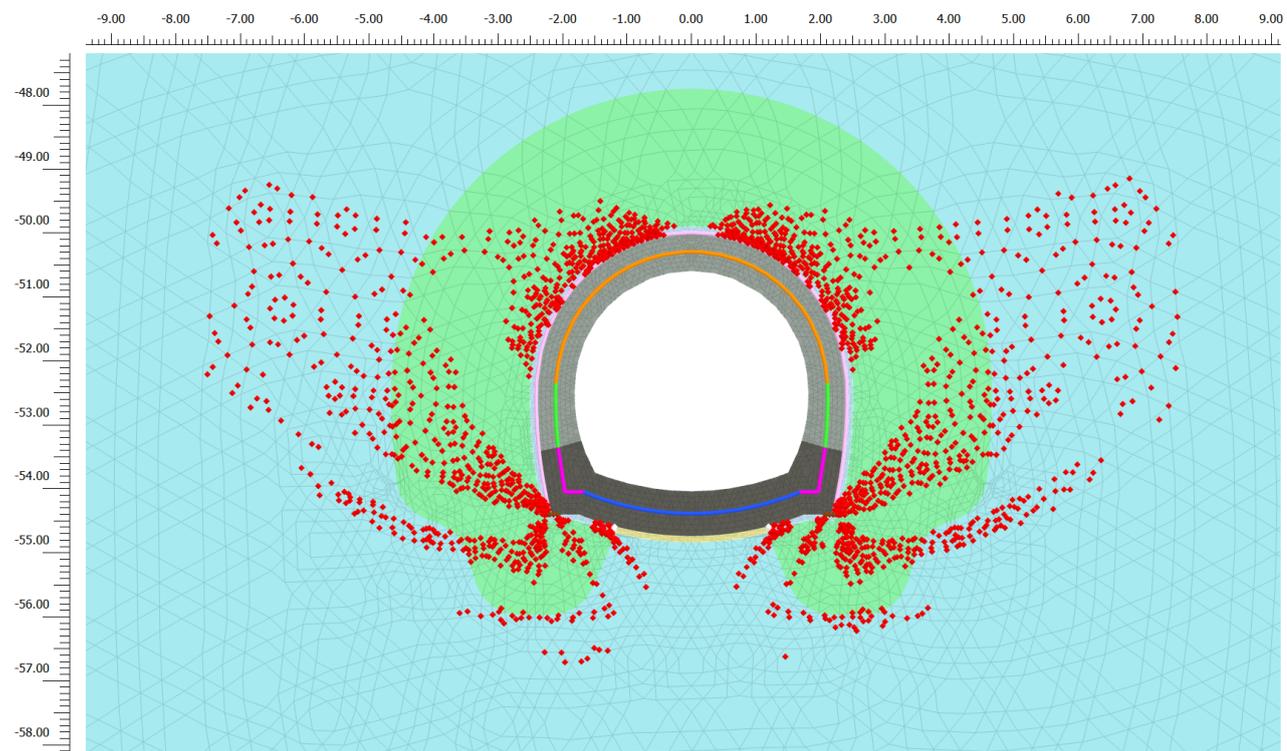
Minimum value = -0.04991 m (Element 7833 at Node 47367)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $1.00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value = 6.579 kN/m<sup>2</sup> (Element 8922 at Node 50660)

Minimum value = -7012 kN/m<sup>2</sup> (Element 8687 at Node 52475)

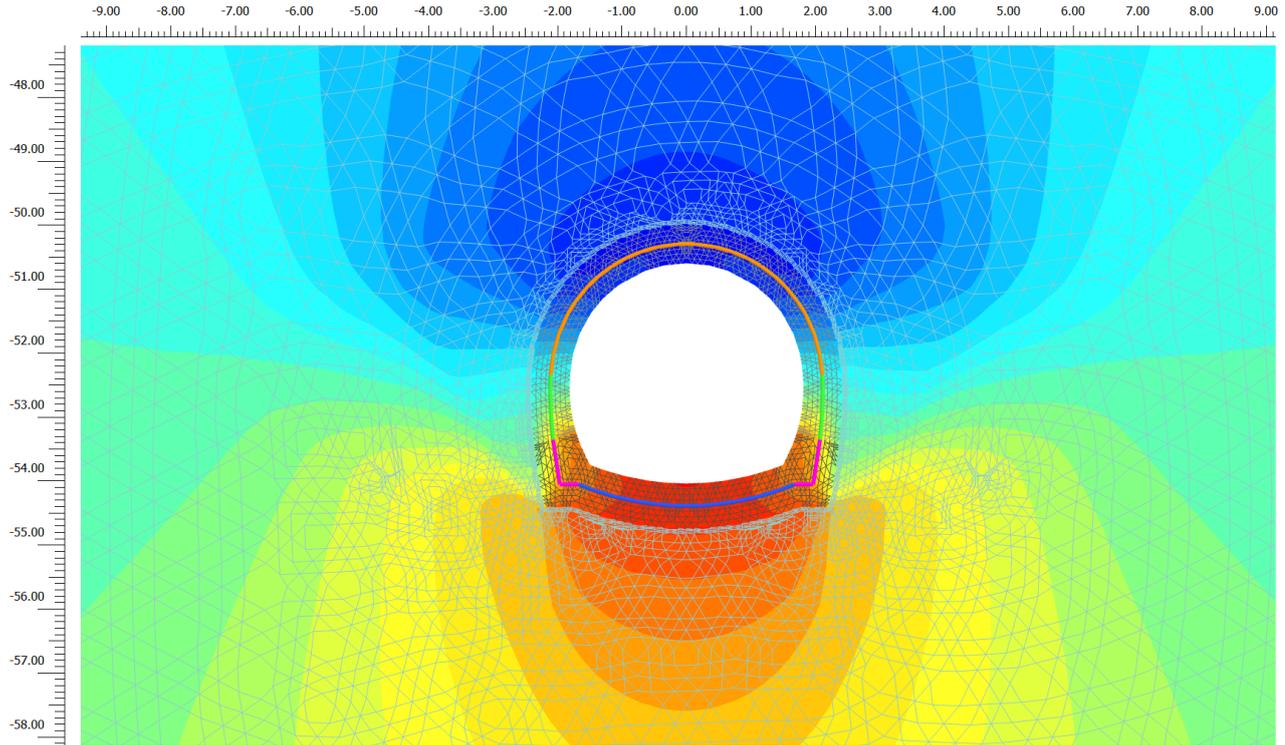


**Plastic points (scaled up 0.00 times)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point

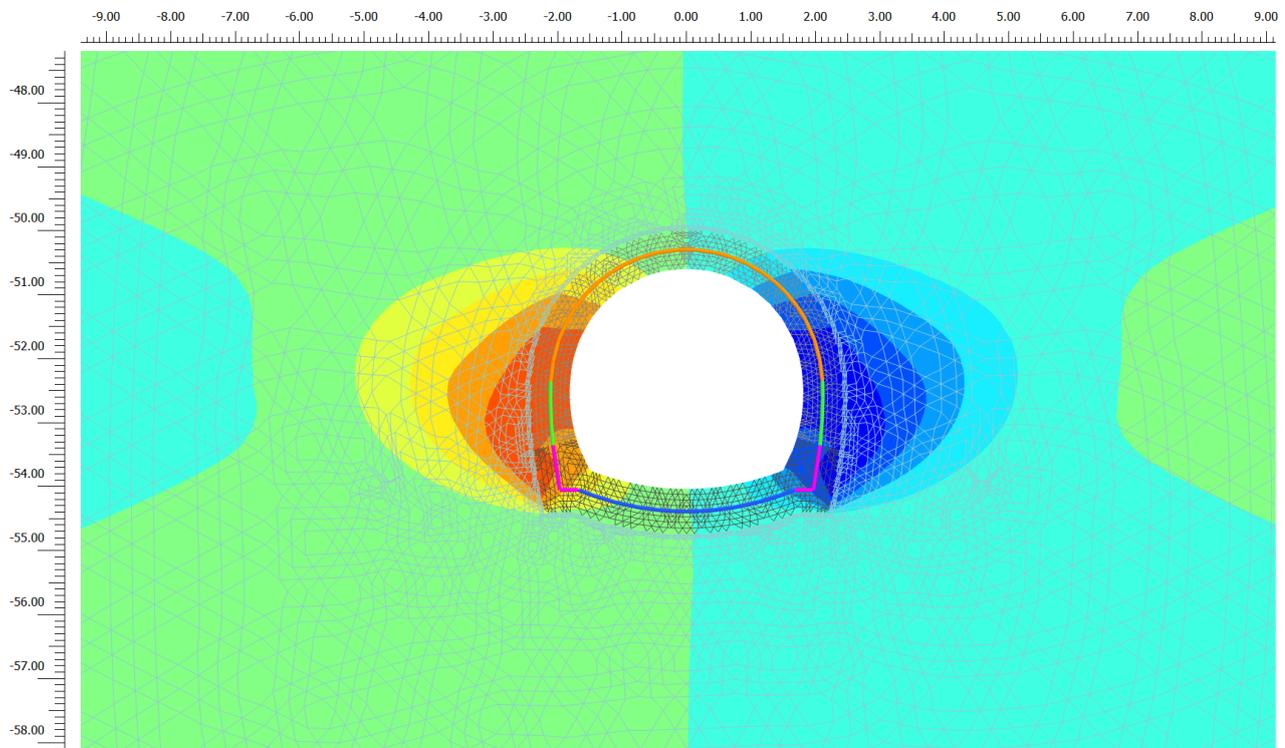
## Fase 10



**Total displacements  $u_y$  (scaled up 50.0 times) (Time  $49.92 \cdot 10^6$  s)**

Maximum value = 0.04011 m (Element 8922 at Node 49960)

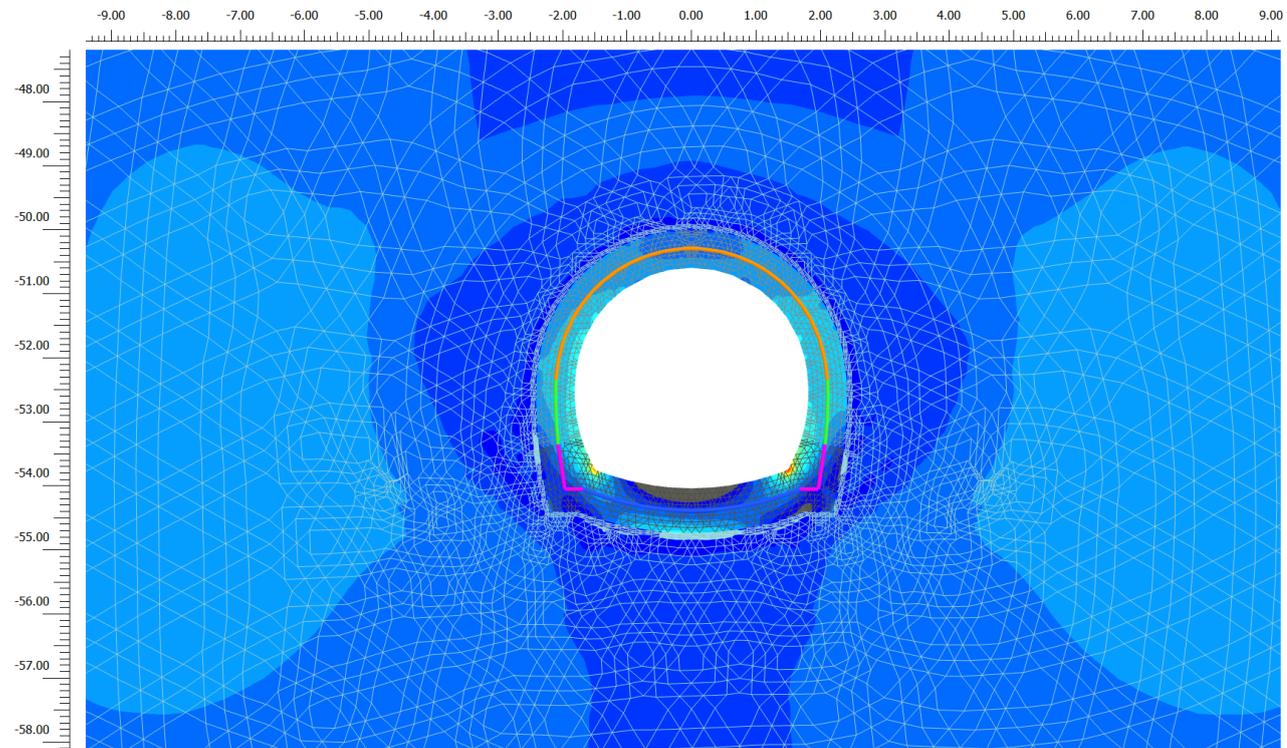
Minimum value = -0.03860 m (Element 7831 at Node 44834)



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 50.0 times) (Time  $49.92 \cdot 10^6$  s)**

Maximum value = 0.05019 m (Element 7835 at Node 46132)

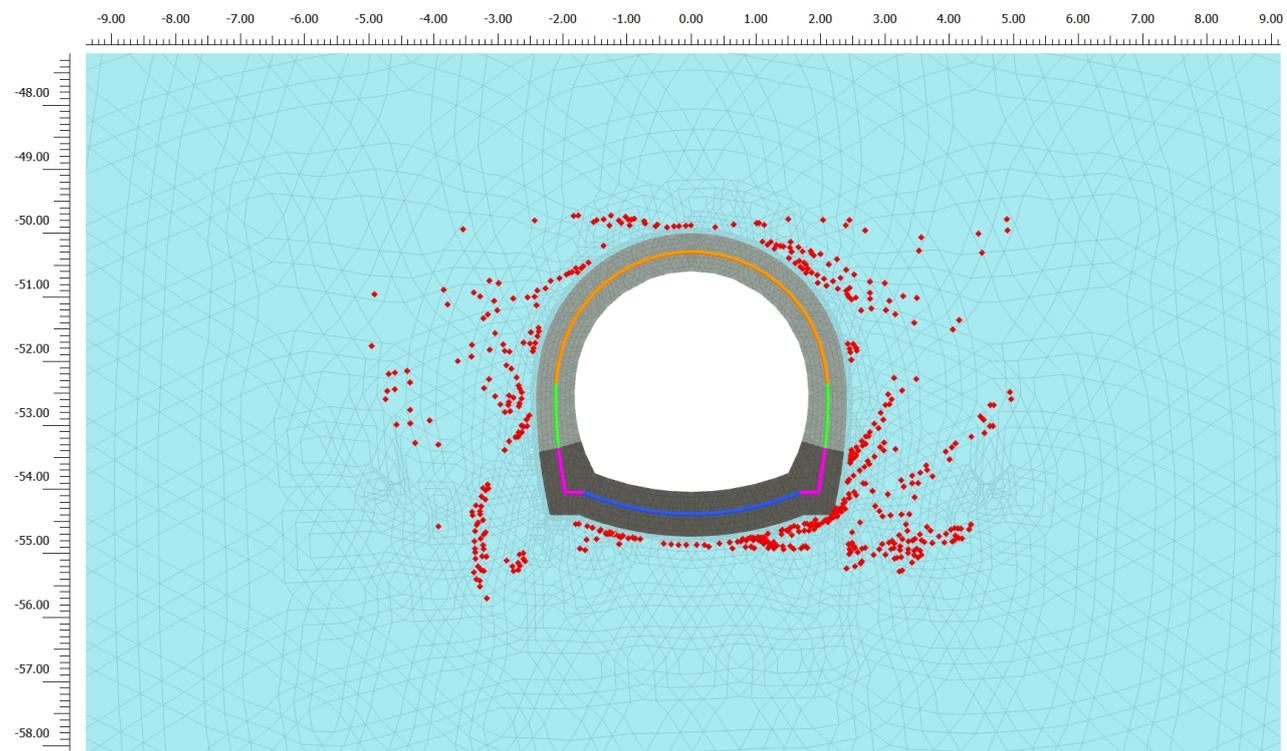
Minimum value = -0.04976 m (Element 7833 at Node 47367)



**Principal total stress  $\sigma_1$  (scaled up  $0.500 \cdot 10^{-3}$  times) (Time  $49.92 \cdot 10^6$  s)**

Maximum value = 29.81 kN/m<sup>2</sup> (Element 8922 at Node 50660)

Minimum value =  $-14.63 \cdot 10^3$  kN/m<sup>2</sup> (Element 8920 at Node 50268)



**Plastic points (scaled up 0.00 times) (Time  $49.92 \cdot 10^6$  s)**

■ Failure point

□ Tension cut-off point