

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. GALLERIE

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA (LOTTO 4A)

Galleria Salso

Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

SCALA:

-

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

RS3U 40 D 07 CL GN0200 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	A. Scuderi A. Scuderi U.O. GALLERIE Dott. Ing. Alessandro Scuderi Ordine degli Ingegneri di Roma n° 19848
B	EMISSIONE ESECUTIVA	ROCKSOIL 	Febbraio 2020	S.Vagnozzi 	Febbraio 2020	A.Barreca 	Febbraio 2020	

File: RS3U40D07CLGN020001B.doc

n. Elab.: 07_70

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 2 di 124

INDICE

1	PREMESSA	5
2	SCOPO DEL DOCUMENTO	5
3	NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO	6
4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	6
4.1	DOCUMENTI CORRELATI	7
5	ALLEGATI	7
6	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO	7
7	DESCRIZIONE DELL'OPERA	10
7.1	LA GALLERIA SALSO	10
7.2	OPERE PER LA SICUREZZA IN GALLERIA	13
7.3	OPERE TECNOLOGICHE	15
7.4	INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO	16
8	FASE CONOSCITIVA	17
8.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	17
8.1.1	<i>Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato</i>	17
8.2	INDAGINI GEOTECNICHE	17
8.3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	19
8.4	FORMAZIONE TRV	21
	PARAMETRI NON DRENATI	30
8.5	VALORI CARATTERISTICI UTILIZZATI NELLE ANALISI	33
9	FASE DI DIAGNOSI	34
9.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO	34
9.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO	35

9.2.1	Analisi con il metodo delle linee caratteristiche	35
	Analisi della stabilità del fronte	39
9.3	DEFINIZIONE DELLE TRATTE A COMPORTAMENTO TENSIO-DEFORMATIVO OMOGENEO.....	43
10	FASE DI TERAPIA	44
10.1	SCELTA DEL METODO DI SCAVO.....	44
10.2	SCAVO MECCANIZZATO	44
10.3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI.....	46
10.4	ANALISI E VERIFICA DEGLI INTERVENTI AL FRONTE E DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI	48
	10.4.1 Criteri di verifica.....	49
	Definizione dell'azione sismica di progetto	51
	Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale	54
	Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione longitudinale.....	55
10.5	ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO	56
	10.5.1 Requisiti conci rivestimento.....	57
	10.5.2 Requisiti miscela bicomponente	57
	10.5.3 Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 45 cm	59
	10.5.4 Verifiche statiche in fase definitiva : modelli di calcolo e criteri di verifica.....	78
	10.5.5 Requisiti Stati limite	81
10.6	VERIFICHE STATICHE: PRESENTAZIONE E RISULTATI	88
	10.6.1 Modelli assialsimmetrici – Criteri di verifica	90
	10.6.2 Modelli assialsimmetrici - Valutazione delle spinte massime di esercizio della TBM e dei fattori di rilascio dello stato tensionale.....	93
	10.6.3 Modelli piani	94
	10.6.4 Verifica dei giunti - pressioni di contatto.....	97
	10.6.5 Verifica delle pressioni di contatto.....	97
	10.6.6 Verifica alle trazioni indotte.....	98
	10.6.7 Analisi n. 4 -	101

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	4 di 124

10.6.8	Analisi n. 5 -	113
	Azioni di mitigazione dei potenziali rischi.....	121
11	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO.....	122
11.1	CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO	122
11.2	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA	122
12	CONCLUSIONI	124

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 5 di 124

1 PREMESSA

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

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Nel presente documento si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione della galleria naturale “Salso”, ubicata fra le progressive km 7+701.82 (imbocco lato Ovest) e km 11+548.50 (imbocco lato Est), per una lunghezza di circa 3846.68 m km. Per la descrizione delle opere di imbocco e dei tratti di galleria artificiale si rimanda alla “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco”.

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [15]), si è articolata nelle seguenti fasi:

1. Fase conoscitiva: è finalizzata allo studio e all’analisi del contesto geologico e geotecnico in cui sarà realizzata la galleria; i risultati dello studio geologico sono descritti nella specifica “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica” (Rif. [12]) a cui si rimanda per l’illustrazione del modello geologico; lo studio geotecnico con la definizione del modello geotecnico di sottosuolo e dei parametri di progetto è illustrata nel Capitolo 7.2.
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.0). Le soluzioni progettuali sono state analizzate per verificarne l’adeguatezza: nel capitolo 0 sono illustrati metodi e risultati delle analisi condotte per la verifica della stabilità globale della cavità, per il dimensionamento/verifica degli interventi di stabilizzazione e dei rivestimenti, nelle diverse fasi costruttive e in condizioni di esercizio, e per la valutazione dei risentimenti attesi in superficie.
4. Fase di verifica e messa a punto: il progetto è completato dal piano di monitoraggio da predisporre ed attuare nella fase realizzativa (Cap 11). Nel piano di monitoraggio sono individuate le grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d’opera per controllare la risposta deformativa dell’ammasso al procedere dello scavo, verificare la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le soluzioni progettuali nell’ambito delle variabilità previste in progetto.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 6 di 124

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;
- Rif. [11] Italferr - Dossier dati e requisiti di base.
- Nel presente documento si fa inoltre riferimento ai seguenti elaborati allegati al progetto:
- Rif. [12] Rif. [12] U.O. Geologia - [RS3G30R69RHGE0005001B] “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica”
- Rif. [13] Rif. [13] U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità - [inserire codifica] “Elaborati specialistici”
- Rif. [14] Rif. [14] U.O. Impiantistica industriale - “Elaborati specialistici”
- Rif. [15] U.O. Gallerie, doc. RS3U40D07RHGN0000001B “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo”;
- Rif. [16] U.O. Gallerie, doc. RS3U40D07CLGA0000002A “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco”;
- Rif. [17] U.O. Gallerie, doc RS3U40D07F5GN0300002B “Profilo geotecnico Galleria Salso”.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 7 di 124

4.1 Documenti Correlati

Rif. [15] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.).

Rif. [16] Bernaud D., Benamar I., Rousset G. (1994). La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques – Revue Francaise de Géotechnique, N° 68.

Rif. [17] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l’étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60.

Rif. [18] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy.

Rif. [19] Broms B.B., Bennermark H. (1967). Stability of a clay at a vertical opening. J.Soil Mech. Found. Div. ASCE

5 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

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

All. [2] “Analisi numerica”;

6 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

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

7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

7.1 La galleria Salso

La lunghezza totale del tracciato della tratta Lercara-Caltanissetta Xirbi, è di circa 46.7 km, e si sviluppa in sotterraneo per una lunghezza complessiva di circa 20.96 km, mediante 7 gallerie naturali denominate: Santa Catena, Nuova Marianopoli, Trabona, Salito 1, Salito 2, Masareddu, Xirbi.

La galleria Salso è costituita da un tratto in naturale di 3735.70 m e da due tratti in artificiale in corrispondenza dei due imbocchi (lato Palermo e lato Catania) di lunghezza complessiva pari a 39.58 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 71.40 m per l'imbocco lato Catania. L'opera interessa due tbm sul lato Catania, estratte sull'imbocco lato Palermo; essa pertanto un tratto di lunghezza complessiva pari a 3846.68 m, dal km 7+701.82 al km 11+548.50. Partendo dall'imbocco lato Palermo, posto ad una quota di 318.30 m s.l.m., il tracciato procede in salita con pendenza del 5.5%, fino a raggiungere l'imbocco lato Catania, posto ad una quota di 338.63 m s.l.m.. Il tracciato prevede il passaggio in punti a basse coperture, in corrispondenza delle progressive km 8+260 circa. Lo scavo viene effettuato all'interno della litologia del TRV (e nel tratto in cui si attraversa TRVa e AV) con metodo meccanizzato per tutta la lunghezza della galleria. La copertura massima è di circa 200 metri.

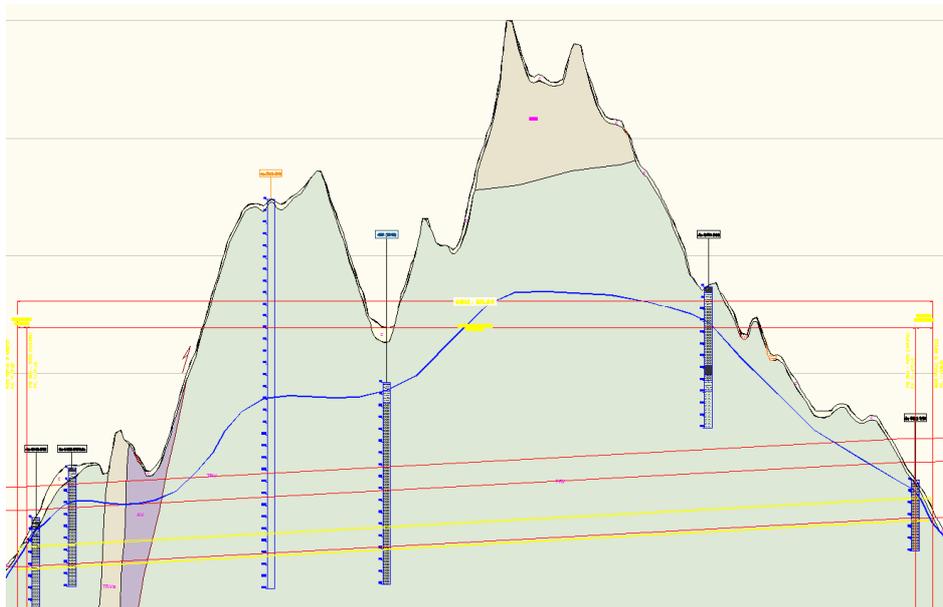


Figura 1 - Profilo geologico galleria Salso

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 1 Progressive delle gallerie Salso

Gallerie di linea	WBS	Opera	PK inizio	PK fine	Lunghezza parziale [m]	Lunghezza totale [m]
Salso	GA04	Galleria Artificiale e Portale di Imbocco - lato Palermo	7+701.82	7+741.40	39.58	3846.68
Salso	GN02	Galleria naturale	7+741.40	11+477.10	3735.7	
Salso	GA05	Galleria Artificiale e Portale di Imbocco - lato Catania	11+477.10	11+548.50	71.4	

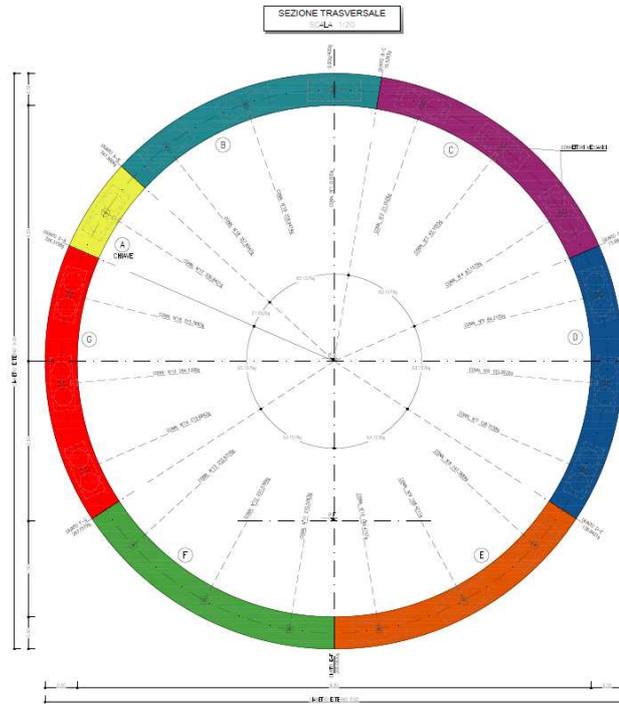
La galleria è progettata per consentire il transito del Gabarit C (PMO n°5) (Rif. [11]).

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

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

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	12 di 124



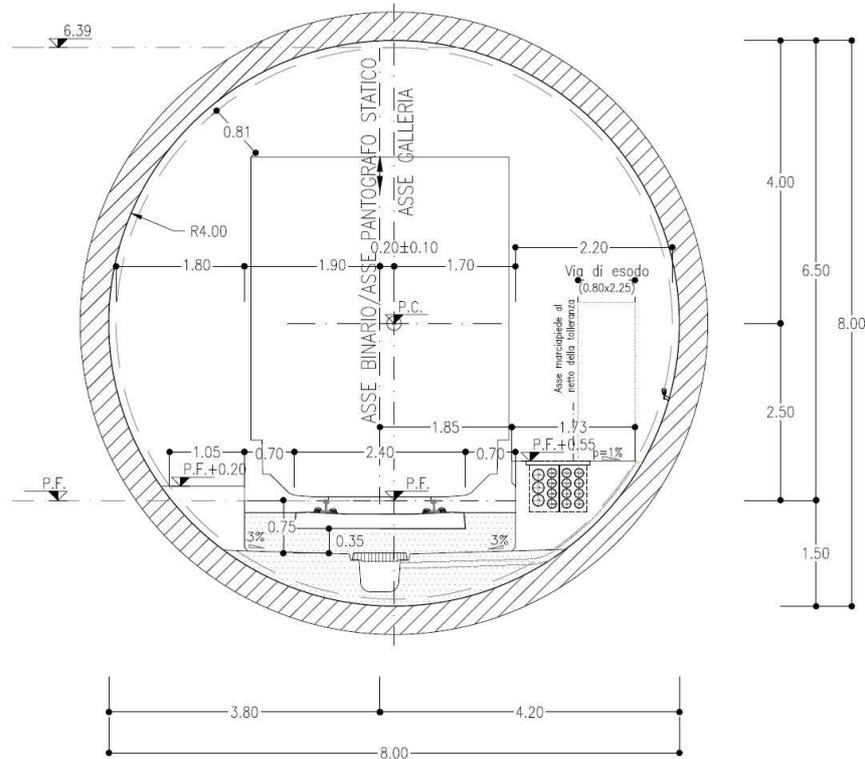


Figura 2 – Sezione di intradosso galleria di linea a singolo binario in scavo meccanizzato (sezione corrente)

7.2 Opere per la sicurezza in galleria

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

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

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

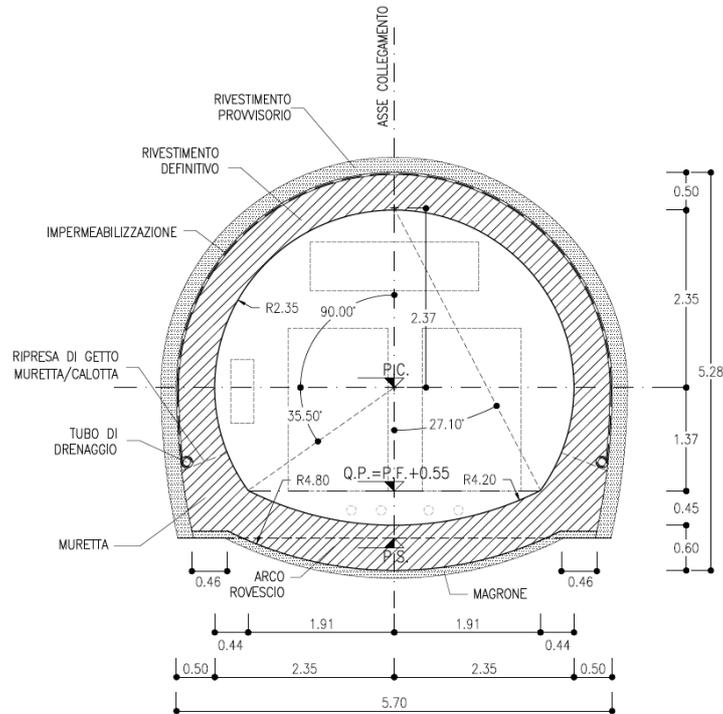


Figura 3 - Sezione di intradosso bypass pedonale (sezione corrente)

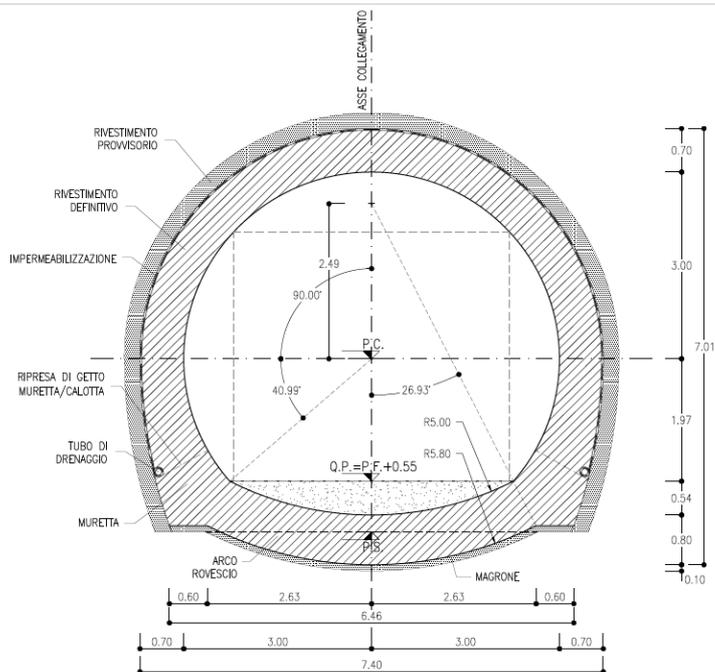


Figura 4 - Sezione di intradosso bypass carrabile (sezione corrente)

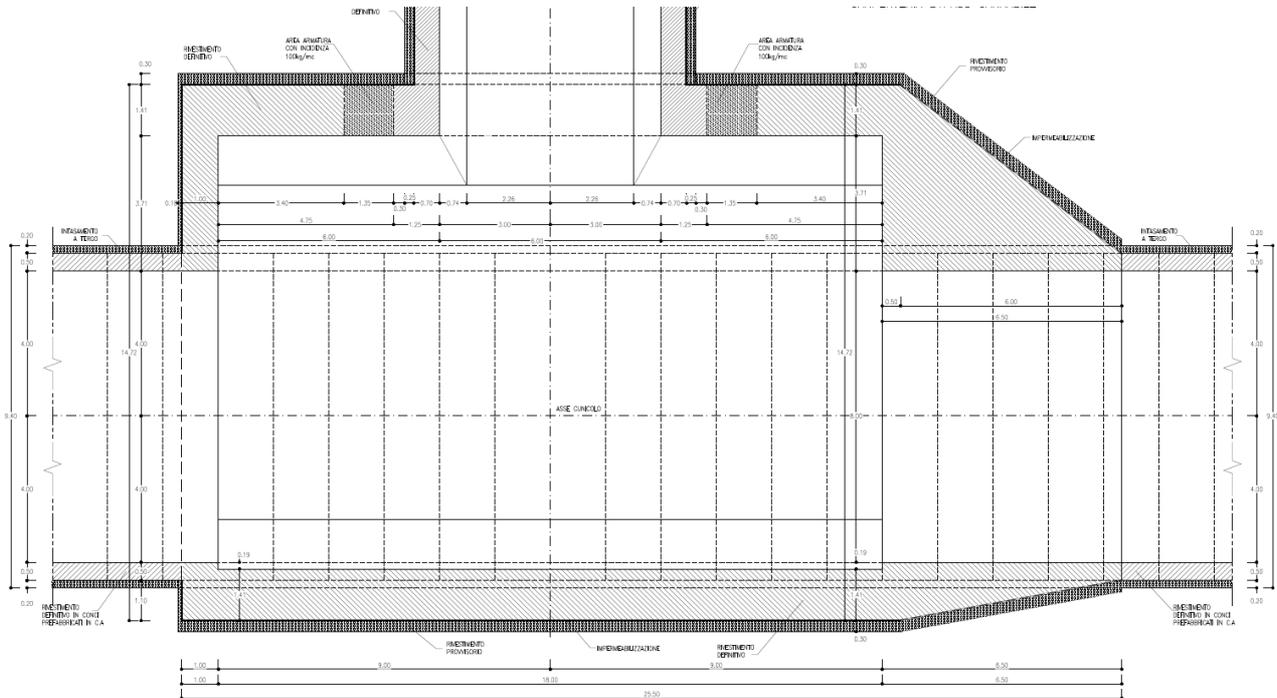


Figura 5 Innesto bypass carrabile su cunicolo parallelo (pianta)

7.3 Opere tecnologiche

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

Per quanto riguarda le gallerie di linea sono presenti:

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 16 di 124

7.4 Interferenze lungo il tracciato

Dall'analisi della cartografia di progetto è stato possibile appurare che nel tracciato della galleria naturale Salso non vi siano interferenze con opere preesistenti a coperture di sicurezza inferiori a 100m per cui si escludono fenomeni di interazione degli scavi con le preesistenze.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 17 di 124

8 FASE CONOSCITIVA

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

8.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

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

8.1.1 Assetto geologico e geomorfologico lungo il tracciato

La galleria interferisce con la ormazione Terravecchia (TRVa) (Tortoniano superiore - Messiniano inferiore) costituito da argille, arenarie e conglomerati; prevalenti argille, argille sabbiose e marne grigie e grigio verdastre o azzurrognole; si riscontrano lenti metriche di sabbie e arenarie da giallastre a grigie, con stratificazione incrociata, alternate con peliti e lenti conglomeratiche.

Per una dettagliata descrizione del modello geologico del sito si rimanda al documento “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica” (Rif. [12]).

8.2 Indagini geotecniche

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

Per la fase progettuale definitiva sono stati eseguiti:

- n. 179 sondaggi a carotaggio continuo (profondità variabili tra 30 m e 250 m dal piano campagna), attrezzati con piezometri ed inclinometri (laddove previsti);
- n. 80 prove dilatometriche/pressiometriche nei fori di sondaggio;
- n. 129 prove di permeabilità di tipo Lefranc e Lugeon;
- n. 31 prospezioni sismiche MASW.
- n. 44 prove sismiche in foro tipo down-hole;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 19 di 124

Il numero totale dei campioni analizzati nella tratta di interesse e sottoposti a prove di laboratorio è di 177. Sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove meccaniche:

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

Nel corso della campagna di indagini eseguita nel 2018, complessivamente nel Lotto 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”.

8.3 Caratterizzazione geotecnica

I risultati delle indagini geotecniche, in situ e di laboratorio, hanno permesso di definire il modello geotecnico rappresentativo delle condizioni stratigrafiche e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni/rocce interessati dall'opera in sottoterraneo lungo il suo tracciato. L'ubicazione dei sondaggi ed il modello geotecnico sono rappresentati nell'elaborato “Profilo geotecnico” (0). Nei paragrafi che seguono si riepilogano in sintesi i risultati



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

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	20 di 124

della caratterizzazione e modellazione geotecnica per ciascuna delle formazioni interessate dallo scavo delle gallerie.

8.4 Formazione TRV

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

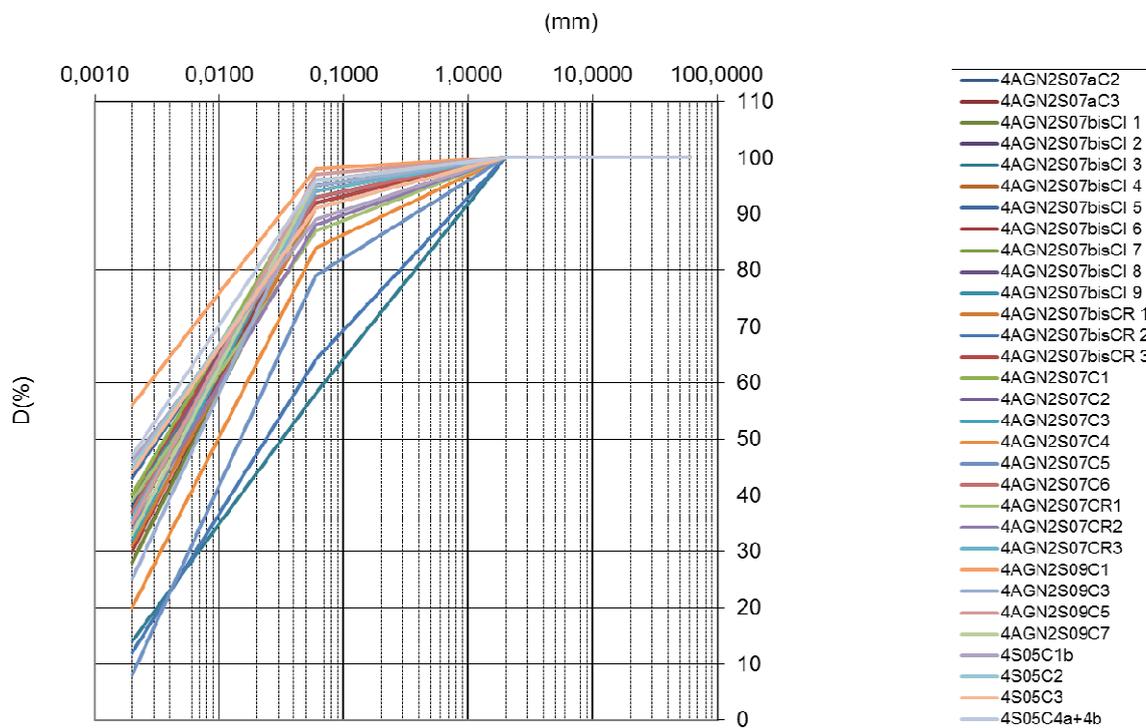


Figura 6: Galleria Salso – TRV – fuso granulometrico

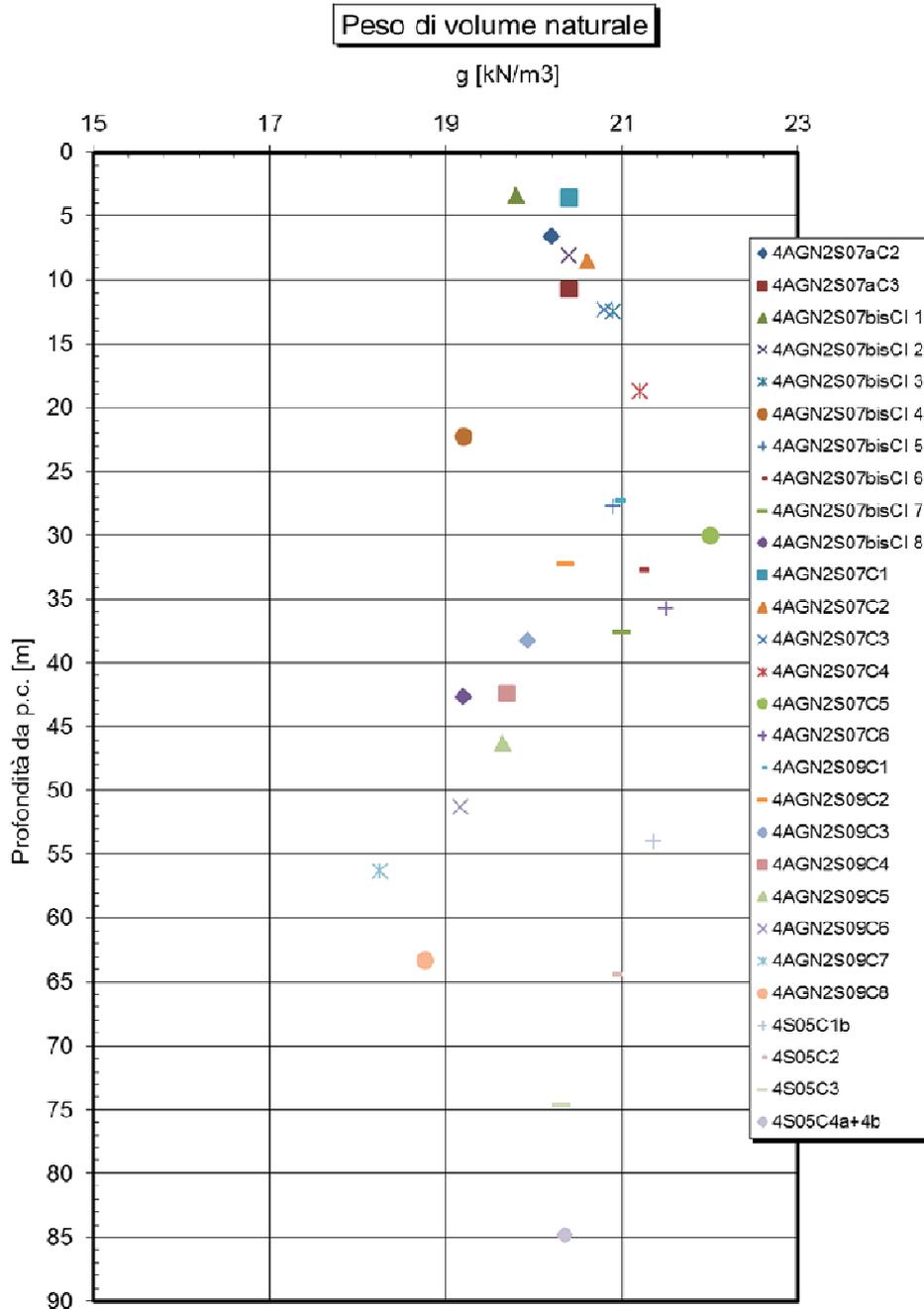


Figura 7: Galleria Salso - TRV - peso dell'unità di volume

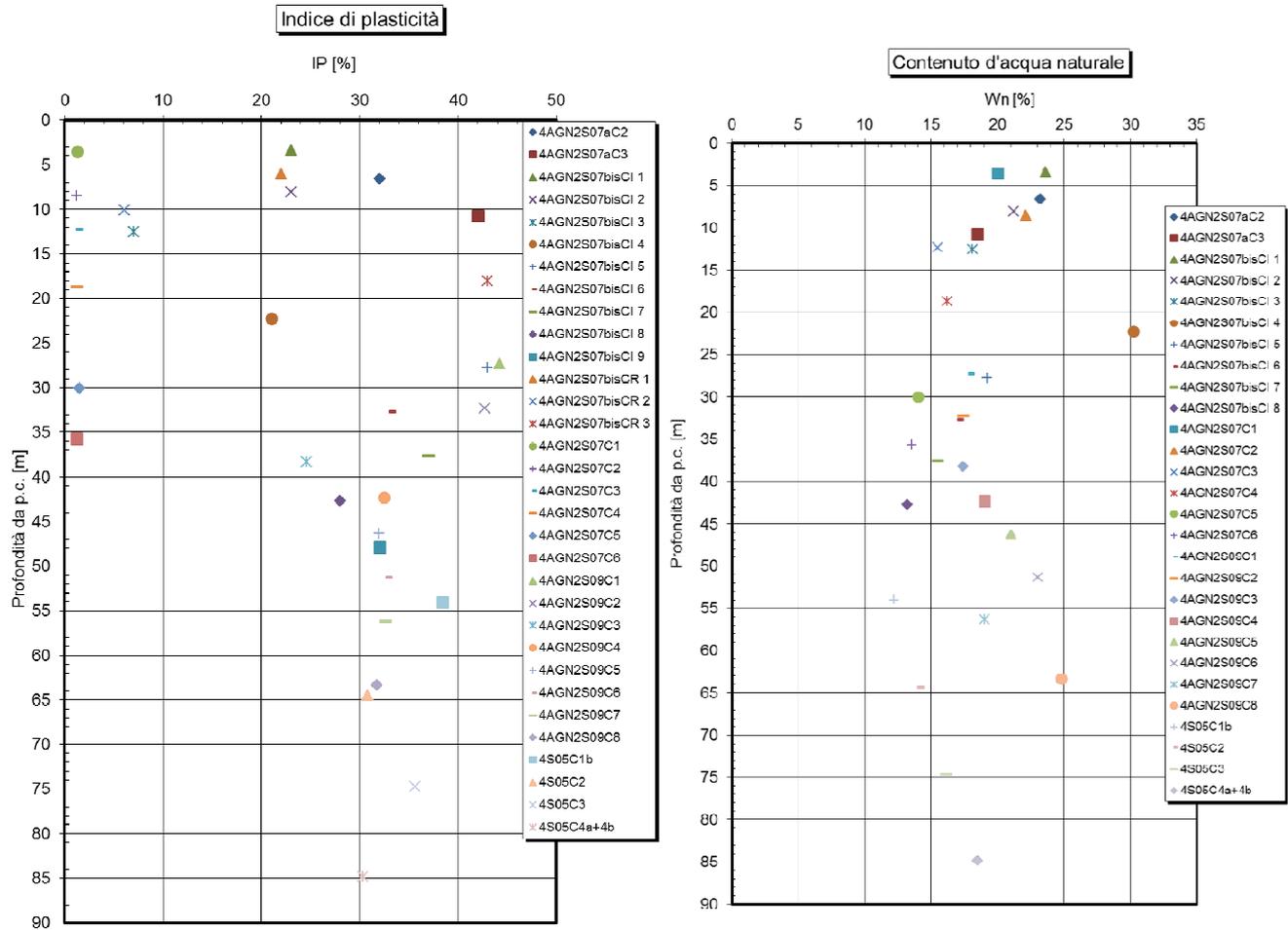


Figura 8: Galleria Salso - TRV – indice di plasticità e contenuto d'acqua naturale

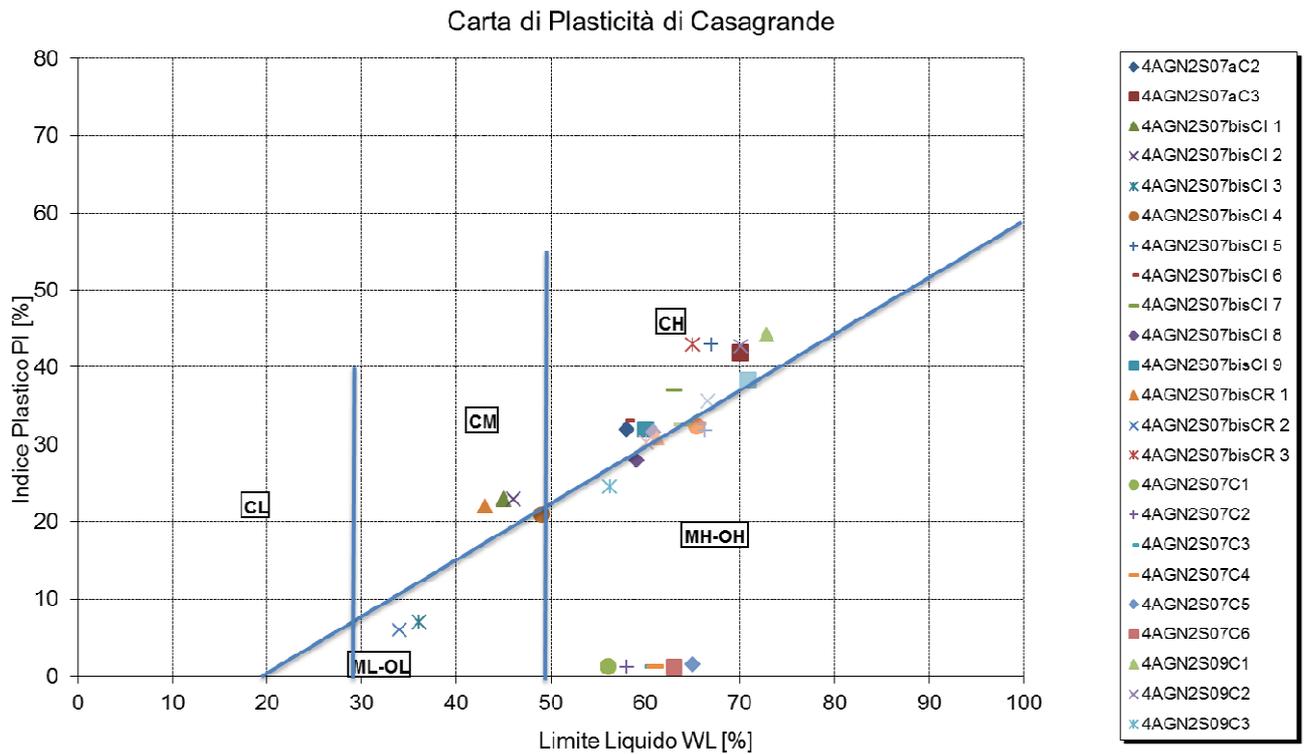


Figura 9: Galleria Salso - TRV – carta di plasticità di Casagrande

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	25 di 124

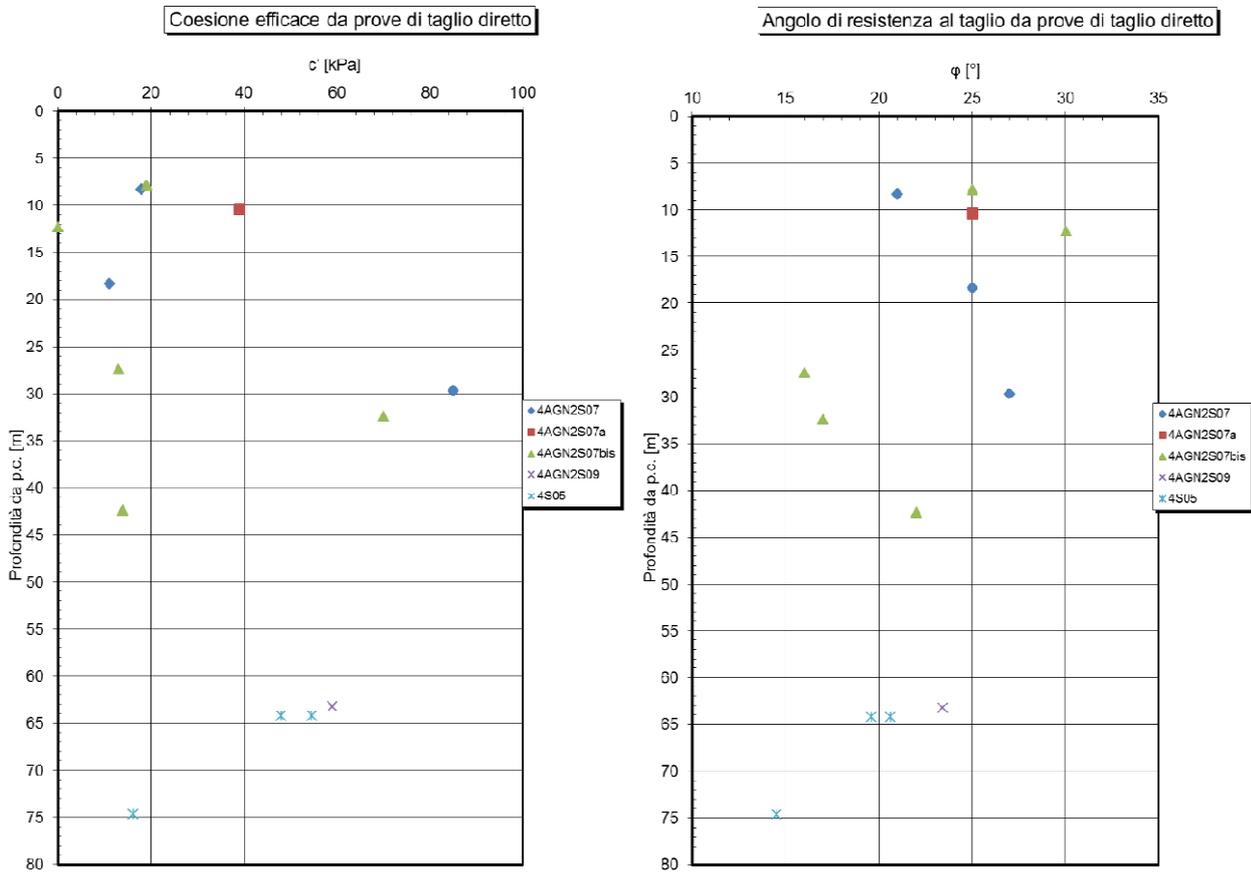


Figura 10: Galleria Salso - TRV – coesione e angolo di resistenza al taglio da prove di taglio diretto

Coesione non drenata da prove SPT

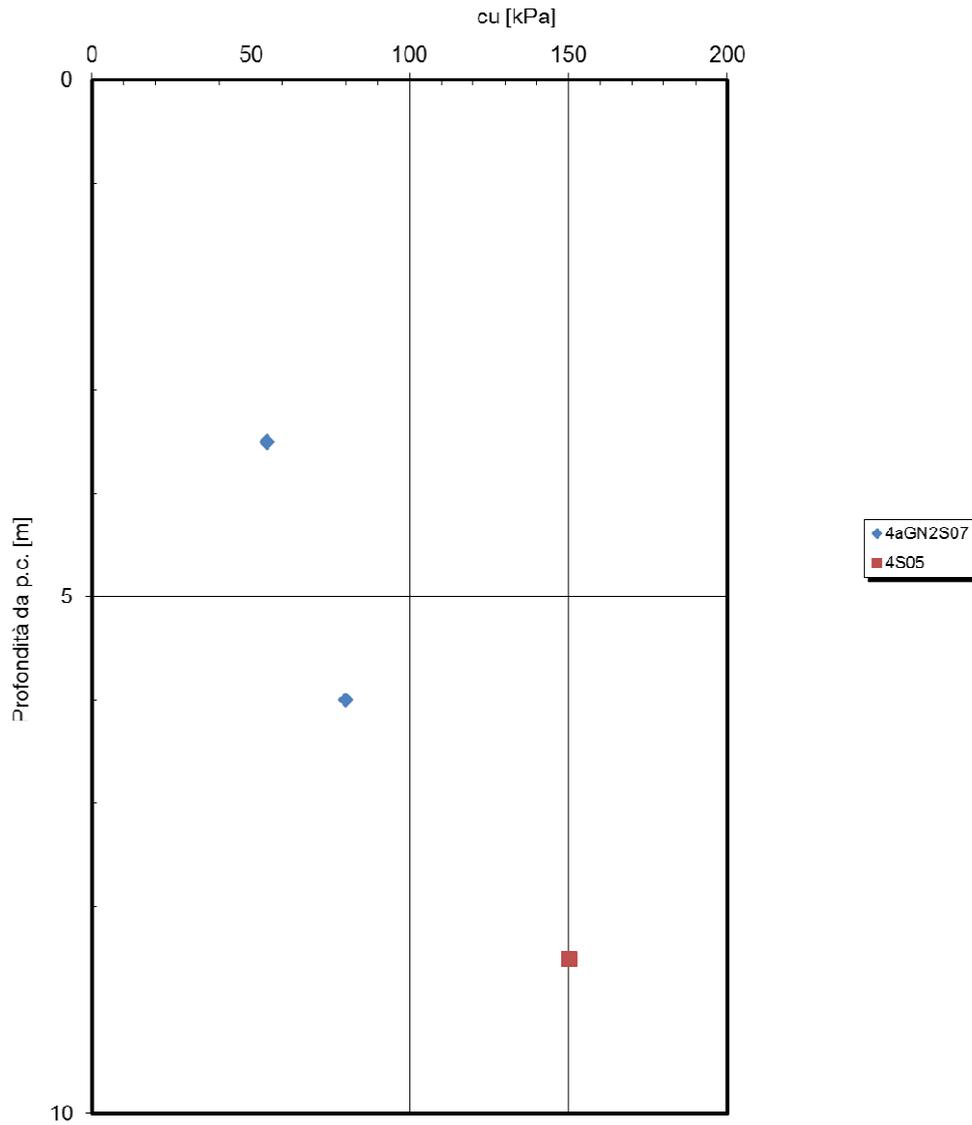


Figura 11: Galleria Salso - TRV – coesione non drenata da prove SPT

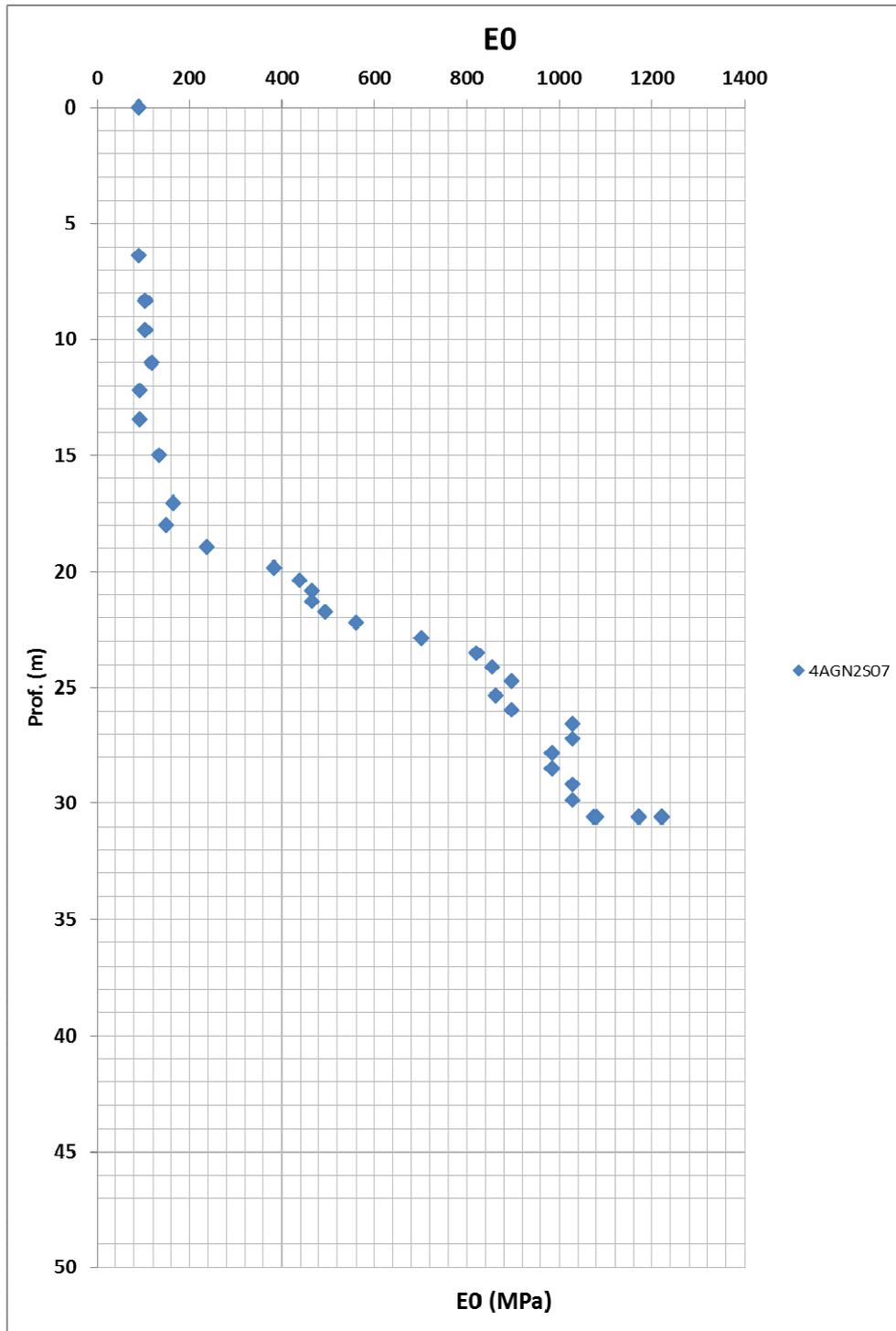


Figura 12: Galleria Salso - TRV – modulo di Young da sismiche

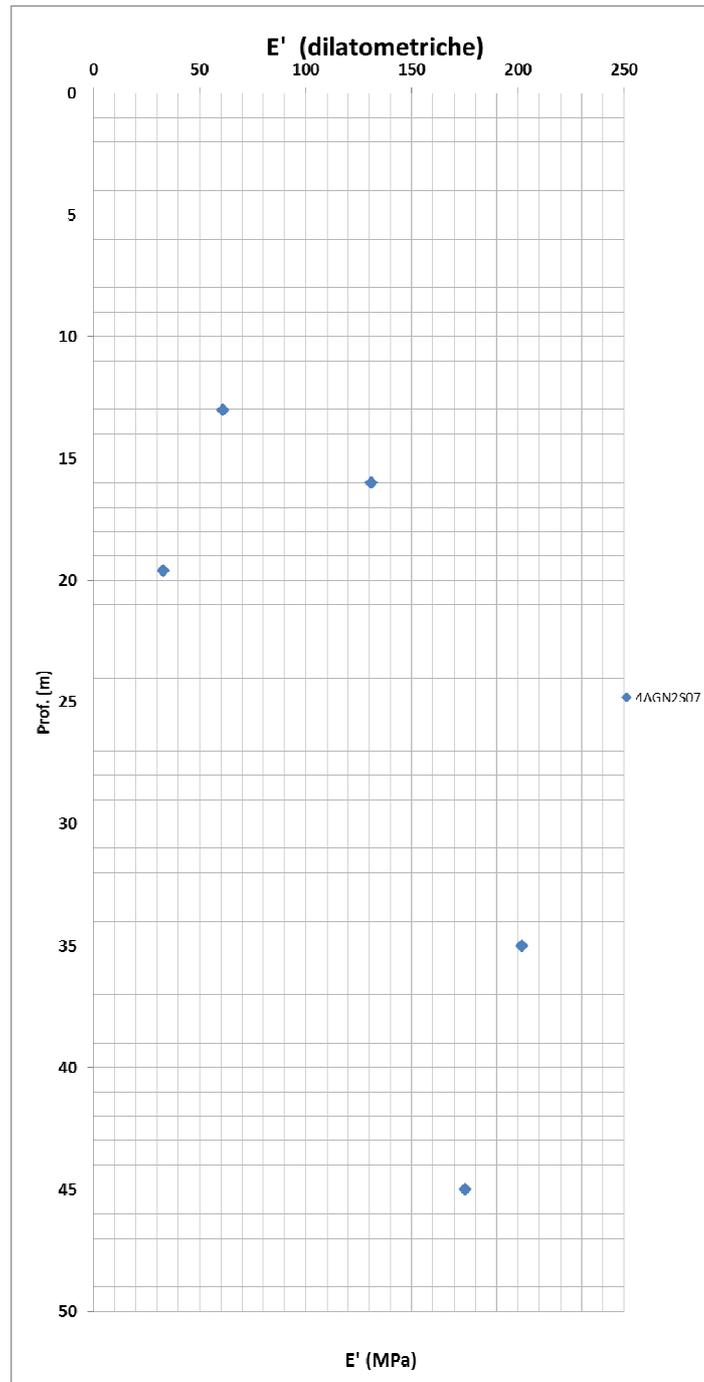


Figura 13: Galleria Salso – TRV – modulo di Young da prove dilatometriche

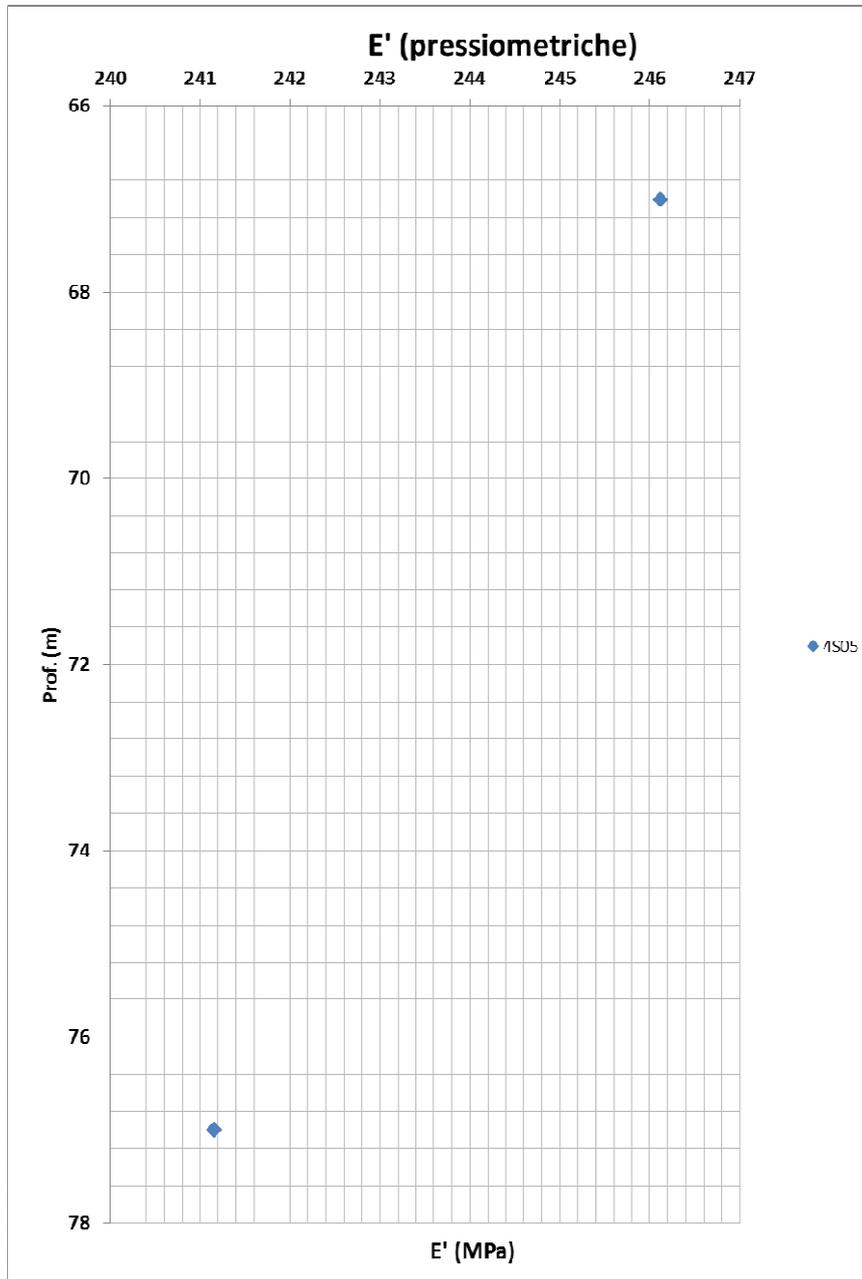


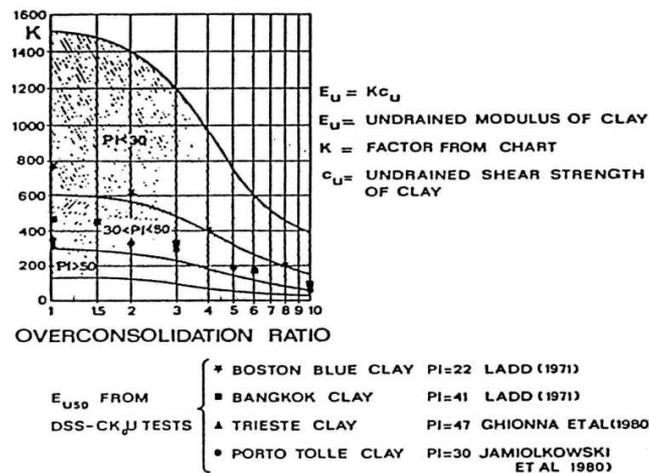
Figura 14: Galleria Salso – TRV – modulo di Young da prove pressiometriche

Parametri non drenati

Per la determinazione dei valori sperimentali di C_u sono stati considerate prevalentemente le prove in situ, soprattutto ad elevate profondità, perché ritenute più affidabili e meno affette dal disturbo del campione che nella formazione in esame è risultato essere a volte particolarmente evidente. Pertanto si sono elaborate le prove pressiometriche ma anche quelle dilatometriche più profonde le quali hanno consentito di valutare la modifica delle caratteristiche della formazione in esame con la profondità. In questo caso si è pensato di sfruttare le note correlazioni di letteratura con la pressione limite efficace p'_l (Amar e Jezequel, 1972): $C_u = (p_l - p_o) / 5.5$ (KPa). La determinazione di questa grandezza è risultata particolarmente delicata in quanto ad elevate profondità la dilatazione dello strumento non produce deformazioni prossime alla rottura; è stato necessario quindi effettuare una stima per interpolazione dei dati sperimentali. Nella tabella seguente si evidenziano i valori così determinati e riportati nei grafici precedenti.

prova	p'L (KPa)	Cu(KPa)
4a_GN3S17 104m	13476.6	1372.7
4a_GN1_S03 P3 114m	15369.4	1561.9
4a_GN3S17 116m	2573.9	282.4
Fog4a_GN3S17 142m	12951.0	1320.1
Fog4a_GN3S17 149m	34514.1	3476.4
Fog4a_GN3S17 156m	7527.8	777.8
4AGN03 S16 1DRT 223,5m	16515.8	1676.6
4AGN03 S16 2DRT 243m	33585.7	3383.6
Fog4a_GN3S17 3DRT 254m	33585.7	3383.6
Fog4a_GN3S17 4DRT 261m	8553.4	880.3

Per i parametri di resistenza non drenati quindi a coperture maggiori di 50m si è assunto un profilo linearmente crescente con la profondità pari a $C_u = 5.9z$ che interpola l'andamento con la profondità dei dati sperimentali. Il modulo non drenato è stato assunto proporzionale al valore di C_u secondo la correlazione sotto riportata assumendo $E_u = 500C_u$.



Parametri drenati

Dal momento che le prove di laboratorio in profondità sono meno numerose e gli stati tensionali di prova non sono rappresentativi degli elevati stati tensionali profondi, per i parametri di resistenza drenati si può utilizzare un inviluppo curvilineo dei dati sperimentali disponibili (vd. relazione Geotecnica generale), dal quale, è possibile calcolare i valori dei parametri meccanici di resistenza al variare dello stato tensionale, per argille OC. I risultati vengono mostrati nella figura sottostante.

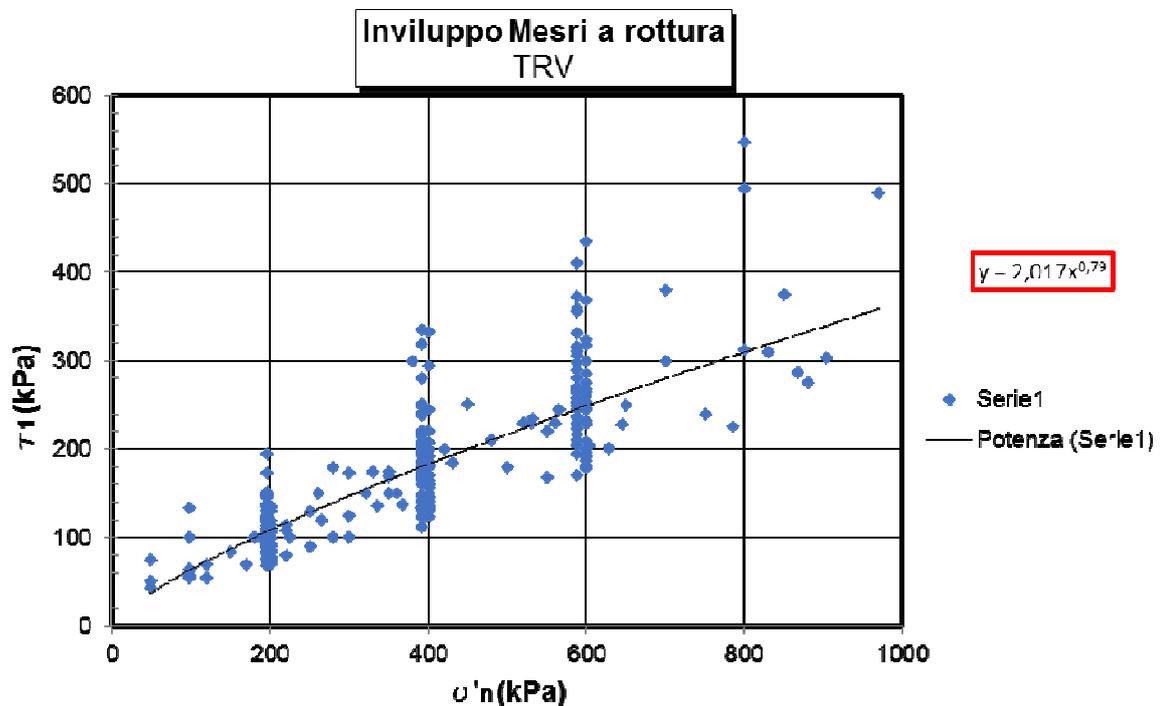


Figura 15: TRV - inviluppo di Mesri a rottura da prove di laboratorio

Per coperture molto elevate (400m e 600m) si è comunque tenuto conto di uno stato tensionale che risente dell'elevato rilascio tensionale indotto al contorno degli scavi ed imputabile anche all'ipotesi di sovrascavo adottata. Per i moduli elastici si è assunto un profilo cautelativo che comunque interpola i dati sperimentali pari a $E' = 3z$. per E_u si è assunto un valore proporzionale ai valori di C_u secondo la correlazione di Lancellotta $E_u = 500C_u$.

Pertanto dall'analisi dei valori delle prove eseguite e dalle assunzioni evidenziate in precedenza si possono ricavare i parametri riportati nella tabella seguente, con le precisazioni di seguito esplicitate.

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

COPERTURA	FORMAZIONE	γ	GSI	mi	σ_m	v	E'	c'	Cu	ϕ'
		[kN/m ³]			[MPa]		[GPa]	[kPa]	[kPa]	[°]
0-15	TRV	21	-	-	-	0.3	0.05-0.10	-	225	0
15-25	TRV	21	-	-	-	0.3	0.10-0.15	-	225	0
25-50	TRV	21	-	-	-	0.3	0.15-0.2	-	500	-
50-100	TRV	22	-	-	-	0.3	0.2-0.3	101	594	19
100-200	TRV	22	-	-	-	0.3	0.3-0.6	224	1188	16
300	TRV	22	-	-	-	0.3	0.9	421	1782	14
400	TRV	22	-	-	-	0.3	1.2	85	2970	22
600	TRV	22	-	-	-	0.3	1.8	85	3564	22

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

GSI = geological strength index

mi = costante del materiale

σ_m = resistenza a compressione monoassiale

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

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

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

8.5 Valori caratteristici utilizzati nelle analisi

Tabella 3 – Intervallo dei parametri geotecnici

Sezione di analisi	Unità	pk	Z ₀	h _w	σ _o	p _{w0}	p _{wR}	R _w	γ	c' _k	φ' _k	c _{u k}	E _k	E _{u k}
		[km]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN/m ³]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
D1	TRV		50	-	1,05	-	-	-	21	-	-	0,500	-	250
D2	TRV		100	81.5	2,2	0.815	-	-	22	121	19	0,594	300	297
D3	TRV		200	100	4,4	1	-	-	22	260	16	1,188	600	594

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

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

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 34 di 124

9 FASE DI DIAGNOSI

Nella fase di diagnosi, sulla base del modello geotecnico scaturito dagli studi e dalle indagini effettuati nella fase conoscitiva, si procede alla previsione della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione. La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS (Rif. [15]), di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

9.1 Classi di comportamento del fronte di scavo

Secondo l'approccio ADECO-RS (Rif. [15]) la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi, che forniscono indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. Dati sperimentali e analisi teoriche hanno dimostrato che il comportamento della cavità è significativamente condizionato, oltre che dalle caratteristiche geometriche della galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

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

Categoria A: nucleo-fronte stabile

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

Categoria B: nucleo-fronte stabile a breve termine

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 35 di 124

consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso perché mantenga un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano interventi, lo stato tensio-deformativo può evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in fase di realizzazione. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

Categoria C: nucleo-fronte instabile

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

9.2 Determinazione delle categorie di comportamento

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

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

La definizione delle sezioni analizzate è stata eseguita sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica (vedi § 0), 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 λ con cui è simulato l'effetto dello scavo in avanzamento; la curva caratteristica dei sostegni (o curva di confinamento) rappresenta l'evoluzione della loro convergenza radiale al crescere della pressione radiale agente sugli stessi.

L'intersezione tra la curva di convergenza e la curva di confinamento individua il punto di equilibrio rappresentativo dello stato finale della galleria rivestita.

Le ipotesi alla base del metodo rendono lo stesso adatto allo studio di gallerie profonde a sezione circolare.

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

Ove necessario, per la definizione del comportamento deformativo della galleria in funzione della distanza dal fronte, si è utilizzato il Nuovo Metodo Implicito (NMI) (Rif. [16], Rif. [17]).

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

Sezione di analisi	Unità	pk	Z ₀	h _w	σ _o	p _{w0}	p _{wR}	R _w	γ	c' _k	φ' _k	c _{u k}	E _k	E _{u k}
		[km]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN/m ³]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
D1	TRV		50	-	1,05	-	-	-	21	-	-	0,500	-	250
D2	TRV		100	81.5	2,2	0.815	-	-	22	121	19	0,594	300	297
D3	TRV		200	100	4,4	0.95	-	-	22	260	16	1,188	600	594

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

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

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

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

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

Sezione di analisi	Unità	pk	Z ₀	h _w	σ _o	p _{w0}	p _{wR}	R _w	γ	c' _k	φ' _k	c _{u k}	E _k	E _{u k}
		[km]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN/m ³]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
D1	TRV		50	-	1,05	-	-	-	21	-	-	0,500	-	250
D2	TRV		100	-	2,2	-	-	-	22	121	19	0,594	300	297
D3	TRV		200	-	4,4	-	-	-	22	260	16	1,188	600	594

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

□₀ = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

□ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

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

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

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

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

*drenaggi da galleria TBM in fase di scavo

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

Risultati delle analisi

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

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

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

Il comportamento allo scavo è instabile con tendenza all'instabilità a coperture maggiori e nelle tratte a comportamento drenato (TRVa)

Tabella 5 - Risultati delle analisi

Sezione di analisi	u _F	u _F / R _{eq}	R _{PF}	R _{PF} / R _{eq}	u _∞	R _P	Criterio u _F /R _{eq}	Criterio R _{pl F} /R _{eq}
	[m]	[%]	[m]	[-]	[m]	[m]		
D1	1.02	0.22	4.65	1	0.047	7.8	B	C
D2	4,33	0.93	8.3	1.8	20.77	17.7	C	C
D3	3,72	0.80	8.4	1.8	17.9	17.7	C	C

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

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. [18]) 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 16, 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

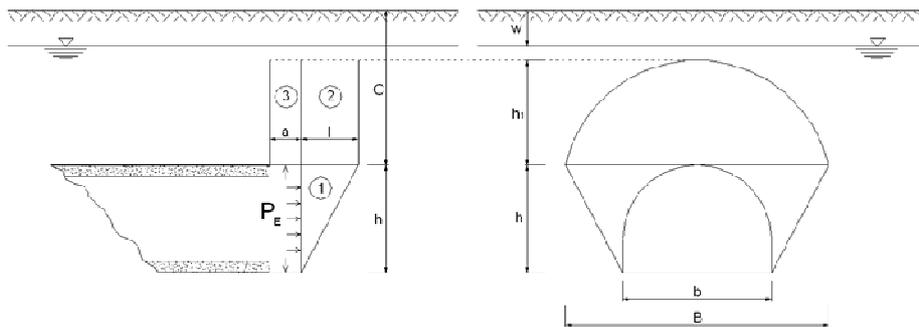


Figura 16 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984)

Talvolta la stabilità del solo prisma 3, gravante sulla zona di galleria non ancora sostenuta dal rivestimento, può risultare più critica rispetto all'insieme dei tre prismi; è definito in tal senso un secondo coefficiente di sicurezza FS₃, per cui ai fini della stabilità del fronte si assume il coefficiente di sicurezza minimo tra i due,

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

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

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

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

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

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

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,

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Metodo di Broms e Bennermark (1967)

Broms e Bennermark (Rif. [19]) 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 17).

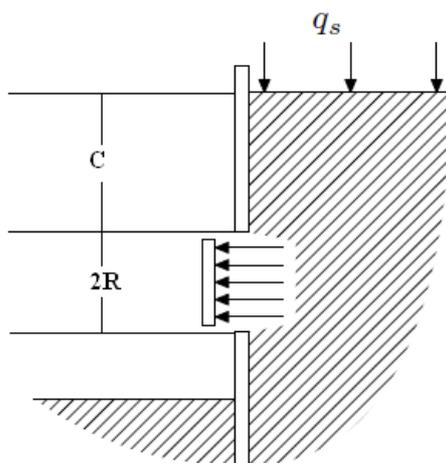


Figura 17 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Broms & Bennermark (Broms et al., 1967 (Rif. [19]))

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

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

dove:

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

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 6 - Relazione fra il numero di stabilità e le deformazioni attese

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

Sezioni analizzate

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

In Tabella 7 e

Tabella 8 sono riepilogati tutti i dati di input utilizzati nelle analisi.

Tabella 7 - Sezione analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

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

z = copertura rispetto alla calotta della galleria

b = larghezza dello scavo

h = altezza dello scavo

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

W = profondità superficie piezometrica da piano campagna

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

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

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

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

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

L'analisi è stata svolta considerando:

K₀ = coefficiente di spinta a riposo = 1 - sen φ'

K_a = coefficiente di spinta attiva = 1 - sin φ' / (1 + sen φ')

a = lunghezza non sostenuta = 0m

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 8 - Sezione analizzate col metodo di Broms e Bennermark per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

Sezione di calcolo	Formazione	pk.	z	σ_s	γ	σ_r	c_u
		[km]	[m]	[kPa]	[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]
1	TRV	-	15	0	21	0	225
2	TRV	-	25	0	21	0	225

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

Risultati delle analisi

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

Tabella 9: Criterio per la definizione della categoria di comportamento

FS = min (FSF; FS3)	<u>Classe di comportamento</u>
≥ 2	<u>A</u>
< 2 e $\geq 1,5$	<u>B</u>
$< 1,5$	<u>C</u>

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

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

Si rimanda in Allegato per maggiori informazioni.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 43 di 124

9.3 Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 44 di 124

10 FASE DI TERAPIA

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

10.1 Scelta del metodo di scavo

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

10.2 Scavo meccanizzato

Scelta della tipologia di TBM

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

Sezione di avanzamento

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

La sezione tipo ha le seguenti caratteristiche:

- raggio interno: 4,00 m
- raggio estradosso: 4.45 m
- diametro scavo: 4,65 m (in testa)
- macchina scudata dotata di conicità radiale centimetrica (differenza di raggio fra testa e coda)
- sovrascavo permanente max 50 mm (raggio) tramite gauge cutters (4.70m in testa)
- sovrascavo eccezionale in testa (tramite copy cutter): 5-10cm
- tipologia anello: universale
- numero conci: 6+1
- spessore conci: 45cm
- lunghezza conci: 1,5m

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 45 di 124

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

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

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

Per i conci prefabbricati è prevista una classe di resistenza del calcestruzzo RCK55 e un'incidenza dell'armatura di circa 80- 98 kg/m³ di rivestimento (2 classi di armatura, rispettivamente classe II ed I).

Modalità di avanzamento

Si prevede una modalità chiusa di avanzamento per tutta la galleria con range di pressioni compresa fra 1bar e 5 bar con il valore massimo alle massime coperture e/o in presenza di battente idraulico (ridotto rispetto a quello originario) massimo pari a 50m in presenza della facies denominata TRVa.

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

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

Tabella 10 - Avanzamento in modalità chiusa - Valori della contropressione al fronte

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 46 di 124

10.3 Caratteristiche dei materiali strutturali

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

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

Galleria	Copertura [m]	Classe CLS	Spessore [m]	As_circ [m ²]	Incidenza <u>totale</u>
Salso	≤100 m	45/55	0.45	14 Φ 14	80
Salso	≤200 m	55/67	0.45	14 Φ 16	98

Rivestimenti definitivi

Calcestruzzo per conci prefabbricati	
Classe di resistenza di calcolo	C 45/55
Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni	$f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1.5 = 25.5 \text{ MPa}$
Modulo elastico a 28 giorni	$E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 36283 \text{ MPa}$
Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018)	$\sigma_c = 0,6 f_{ck} = 27.4 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 20.5 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente

Calcestruzzo per conci prefabbricati	
Classe di resistenza di calcolo	C 55/67
Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni	$f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1.5 = 31.5 \text{ MPa}$
Modulo elastico a 28 giorni	$E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 37239 \text{ MPa}$
Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2018)	$\sigma_c = 0,6 f_{ck} = 33 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente

Acciaio per barre di armatura	
Tipo	B450C
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)	$\sigma_{iim} = 0,80 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

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

Le soluzioni progettuali descritte nel capitolo precedente sono state analizzate per verificarne adeguatezza ed efficacia, con riferimento al modello geotecnico illustrato nel capitolo 7.2 e nel rispetto delle indicazioni della normativa vigente (Rif. [1]).

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

Tabella 11 - Sezioni di analisi fasi di terapia – pressioni al fronte

Analisi n.	Sezione	progressiva	formazione	Condizione analisi
<i>1</i>	<i>Cc1</i>		<i>TRV</i>	<i>Curva caratteristica 50m – pressione fronte 1 bar</i>
<i>2</i>	<i>Cc2</i>		<i>TRV</i>	<i>Curva caratteristica 100m – pressione fronte 3 bar</i>
<i>3</i>	<i>Cc3</i>		<i>TRV</i>	<i>Curva caratteristica 200m – pressione fronte 5 bar</i>
<i>4</i>	<i>Tamez</i>		<i>TRV</i>	<i>15m – no pressione al fronte</i>
<i>5</i>	<i>Tamez</i>		<i>TRV</i>	<i>25m – no pressione al fronte</i>
<i>6</i>	<i>Broms e Bennermark</i>		<i>TRV</i>	<i>15m – no pressione al fronte</i>
<i>7</i>	<i>Broms e Bennermark</i>		<i>TRV</i>	<i>25m – no pressione al fronte</i>

In ogni caso l'esito della Terapia (analisi 1-6) in termini di analisi svolte con le Curve Caratteristiche o i Metodi di Tamez e Broms e Bennermark è riportata in Allegato.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 12 - Sezioni di analisi fasi di terapia – rivestimenti definitivi e spinte sullo scudo

Analisi n.	Sezione	progressiva	formazione	Condizione analisi
8	axiTRV100m	-	TRV	Assialsimmetrico copertura 100m
9	axiTRV200m_s	-	TRV	Assialsimmetrico copertura 200m – sovrascavo 5cm
10	TRV100m		TRV	<i>Piana copertura 100m</i>
11	TRV200m_s		TRV	<i>Piana copertura 200m – sovrascavo 5cm</i>

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

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

10.4.1 Criteri di verifica

Stabilità del fronte

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

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

Le pressioni applicate al fronte, sono simulate mediante un incremento di coesione equivalente del fronte (Δc) valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte (σ_3) secondo le seguenti relazioni:

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

con:

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 50 di 124

come sopra descritto può quindi essere applicato lo stesso coefficiente parziale previsto per la coesione dell'ammasso.

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

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

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

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

Interazione opera-terreno

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

- stati limite ultimi per raggiungimento della resistenza del terreno/ammasso roccioso interessato dallo scavo (stato limite ultimo di tipo GEO), con lo sviluppo di fenomeni di instabilità del fronte o di deformazioni e spostamenti elevati al contorno ed in superficie;
- stati limite ultimi relativi al raggiungimento delle resistenze degli elementi strutturali che costituiscono gli interventi di stabilizzazione, del rivestimento di prima fase e del rivestimento definitivo (stato limite ultimo di tipo STR);
- stati limite di esercizio.

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,

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 51 di 124

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

Per la verifica degli stati limite di esercizio (SLE) del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato, le analisi numeriche sono condotte con i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici, adottando le pertinenti combinazioni dei carichi per la verifica di fessurazione e la verifica delle tensioni di esercizio, secondo quanto previsto dal D.M. 17/01/2018 (Rif. [1]).

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

In tale tipologia di analisi lo scavo della galleria è simulato rilasciando in modo uniforme un sistema di forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo, tenendo conto della variazione del tasso di confinamento in funzione della distanza della sezione di calcolo dal fronte; in questo modo il problema tridimensionale dello scavo della galleria è ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

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

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

Interazione opera-terreno con analisi sismica pseudostatica

Definizione dell'azione sismica di progetto

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

In alternativa, l'effetto della risposta sismica locale può essere valutato con approccio semplificato (cfr. § 3.2.2 del DM 17/01/2018) basato sulla classificazione del sottosuolo in base ai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni risultino chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.3.II del DM 17/01/2018. In questo caso, il moto sismico in superficie è definito mediante l'accelerazione massima a_{max} attesa.

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

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

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

Dove:

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

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

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

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

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

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

con:

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

Il modello iperbolico, caratterizzato nel piano $\tau - \gamma$ dai parametri pendenza iniziale (G_{\max}) e asintoto (τ_{\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 \square_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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 53 di 124

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

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

Il metodo proposto è basato sulla stima delle deformazioni $\epsilon(z)$ 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.

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 13 Parametri per la definizione dell'azione sismica per le sezioni considerate

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

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

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

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

Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

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

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

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:

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

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

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

Analisi sismiche pseudo-statiche in direzione longitudinale

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

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

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

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

$$\varepsilon^b = r \frac{a_s}{C_s^2} \cos^3 \phi$$

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

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

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

Verifiche nei confronti di azioni eccezionali

Tra le azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale delle opere si considera quella di incendio. Per le verifiche di competenza si rimanda al documento specialistico di progetto. [Inserire riferimento all'elaborato di progetto in cui sono riportate le verifiche di resistenza al fuoco].

10.5 Analisi e Verifica delle sezioni tipo

Il rivestimento della galleria di linea è realizzato con anelli in conci prefabbricati in calcestruzzo: ogni anello è composto da 7 conci dello spessore di 45 cm con raggio interno di 4.0 m e raggio esterno di 4.45 m.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 57 di 124

La galleria ha un diametro di scavo pari a circa 9.30 m.

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

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

10.5.1 Requisiti conci rivestimento

I conci verranno realizzati in calcestruzzo C45/55 per coperture fino a 100m, mentre da 100 a 200m si utilizza la classe C55/67.

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

Le prescrizioni di progetto si riferiscono alle seguenti caratteristiche:

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

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

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

10.5.2 Requisiti miscela bicomponente

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

La miscela è costituita da:

- Una boiaccia a base cementizia, di consistenza estremamente fluida, stabile volumetricamente ed a lungo mantenimento della lavorabilità.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 58 di 124

- Un additivo accelerante, aggiunto alla boiaccia immediatamente prima della sua iniezione, in grado di provocare una sua veloce gelificazione.

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

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

Stato fresco

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

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

Stato indurito

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

24 h: > 0,5 MPa

28 gg: > 3,0 MPa

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 59 di 124

10.5.3 Verifiche statiche in fase transitoria – concio da 45 cm

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

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

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

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

Dopo un adeguato periodo di stoccaggio, allorché il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza caratteristica di progetto ($R_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$), si procede al trasporto in cantiere.

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

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

Scasseratura

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

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

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

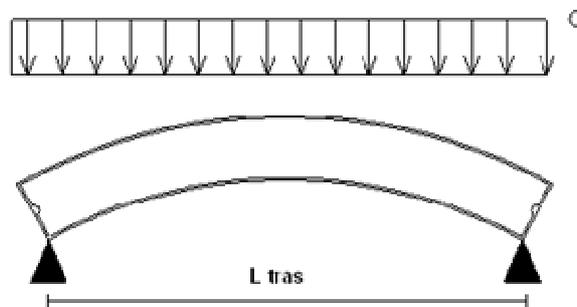
Si è ipotizzato che il concio venga agganciato e sollevato dai lati.

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

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

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

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



I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

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

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

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

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

Le sollecitazioni massime risultano:

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

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

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	61 di 124

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

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

Per quanto riguarda la verifica a flessione si ottiene:

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

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

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

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

in cui:

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

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

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

Si ottiene:

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

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Movimentazione

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

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

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

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

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

Le sollecitazioni massime risultano:

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

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

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

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

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

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

Stoccaggio dei conci dalla scasseratura alla completa maturazione

I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 4 elementi. Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10×8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

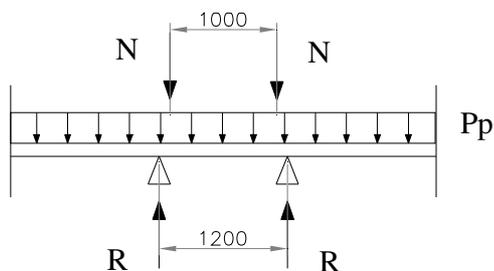
La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso dell'ultimo concio, per tener conto delle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

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

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

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

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



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

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

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

Sezione di appoggio

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

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

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	63 di 124

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

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

Sezione di carico

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

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

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

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

Mezzeria

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

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

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

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

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

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

Stoccaggio dei conci in cantiere

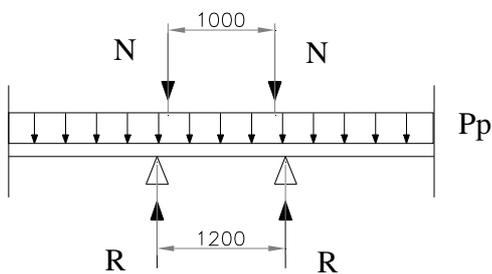
I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 7 elementi (un'anello completo). Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi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

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

Lo stoccaggio dei conci alla completa maturazione verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza R_{ck} di 50 N/mm².

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

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



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

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

Le sollecitazioni nel concio risultano:

Sezione di appoggio

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

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

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

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

Sezione di carico

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

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

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	65 di 124

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

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

Mezzeria

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

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

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

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

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

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

Montaggio dei conci

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

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

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

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

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

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

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

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

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

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

$$M_{sd1} = 89.3 \text{ kNm} < M_{cr} (R_{ck}=50 \text{ MPa}) = 177.2 \text{ kNm}$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Sforzi dovuti alla spinta dei martinetti

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

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

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

Verifica alla pressione di contatto – C45/55

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

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

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

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

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

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

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

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

$$b_2 = b_1 + 2s$$

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

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

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

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

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

- Verifiche in condizioni di spinta ordinaria

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

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

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.574 \times 30.4 \times 10^3 \times (0.648/0.574)^{0.5} = 18540 \text{ kN}$$

$$F_{max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 30.4 \times 10^3 \times 0.574 = 52350 \text{ kN}$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 67 di 124

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq Fr_{du} = 18540 \text{ kN} \leq F_{\max} = 52350 \text{ KN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

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

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

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

Verifica alla pressione di contatto – C55/67

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

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

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

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

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

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

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

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

$$b_2 = b_1 + 2s$$

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

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

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

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

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

- *Verifiche in condizioni di spinta ordinaria*

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

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

$$Fr_{du} = A_{c0} \cdot f_{cd2} \cdot (A_{c1} / A_{c0})^{0.5} = 0.574 \times 28.3 \times 10^3 \times (0.648/0.574)^{0.5} = 17280 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = 3 \cdot f_{cd2} \cdot A_{c0} = 3 \times 28.3 \times 10^3 \times 0.574 = 48733 \text{ KN}$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 68 di 124

$$N_u = 7894.7 \text{ kN} \leq Fr_{du} = 17280 \text{ kN} \leq F_{\max} = 48733 \text{ KN}$$

- *Verifiche in condizioni di spinta eccezionale*

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

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

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

Verifica di resistenza alle trazioni indotte

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

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

dove:

Z = forza di trazione risultante

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

d = altezza della sezione = 0.45 m

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

- *Verifiche in condizione di spinta ordinaria*

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

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

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

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

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

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

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

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

$$(100 \text{ cm} / 15 \text{ cm}) \times 2 A_s \text{Ø12} = 15.1 \text{ cm}^2$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 69 di 124

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- *Verifiche in condizione di spinta eccezionale*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 70 di 124

Sollecitazioni dovute al peso dell'anello completo

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

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

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

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

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

Elementi accessori del rivestimento

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

Guarnizioni di tenuta idraulica

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

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

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

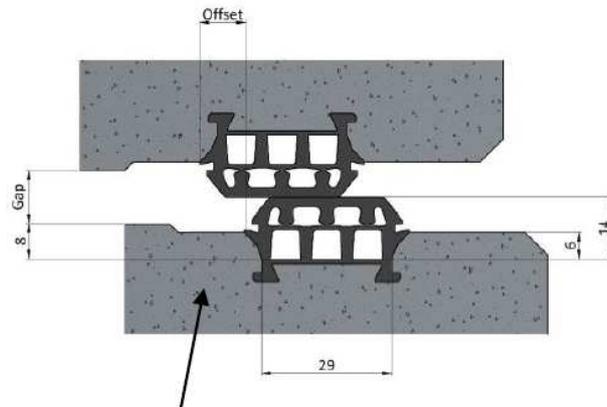
Siccome la prova effettuata dal fornitore è stata realizzata tra due facce aventi ringrosso di 2mm per parte, per definire la pressione idrostatica sostenibile dalla guarnizione attraverso il grafico seguente si definisce un gap totale

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	71 di 124

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

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



Con offset

Schema guarnizione con offset nella prova del fornitore

WATER TIGHTNESS TEST UG018A 70 SH CAVA

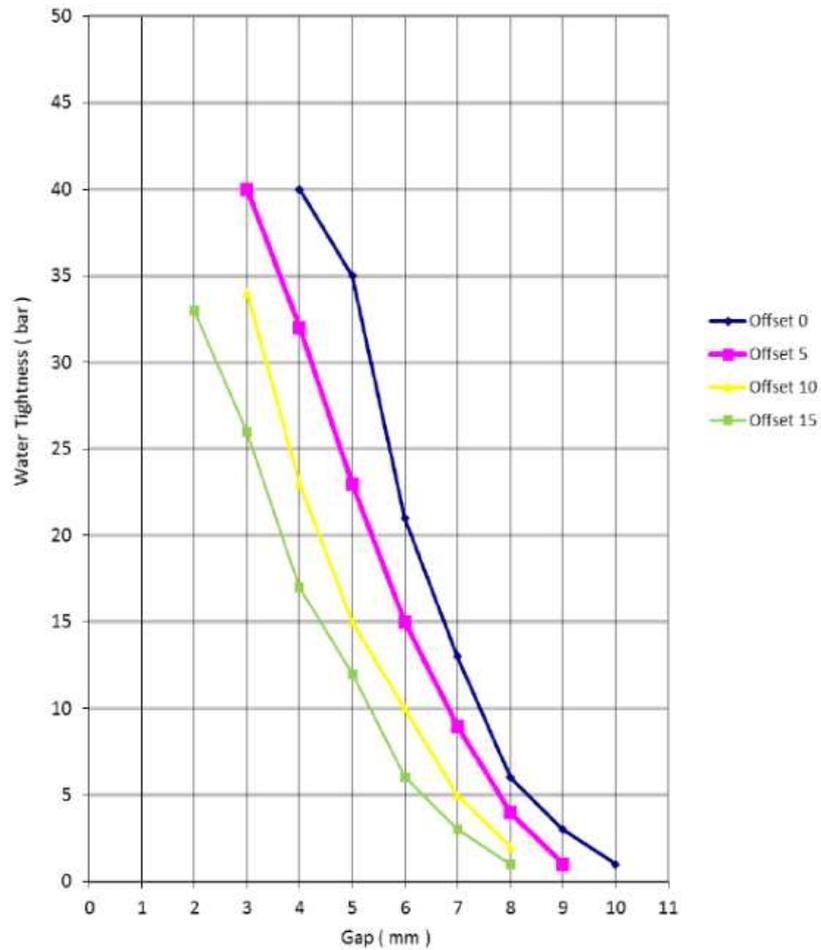


Diagramma di tenuta dell'acqua e geometrie della guarnizione di riferimento

LOAD DEFLECTION DIAGRAM FOR PROFILE UG018A

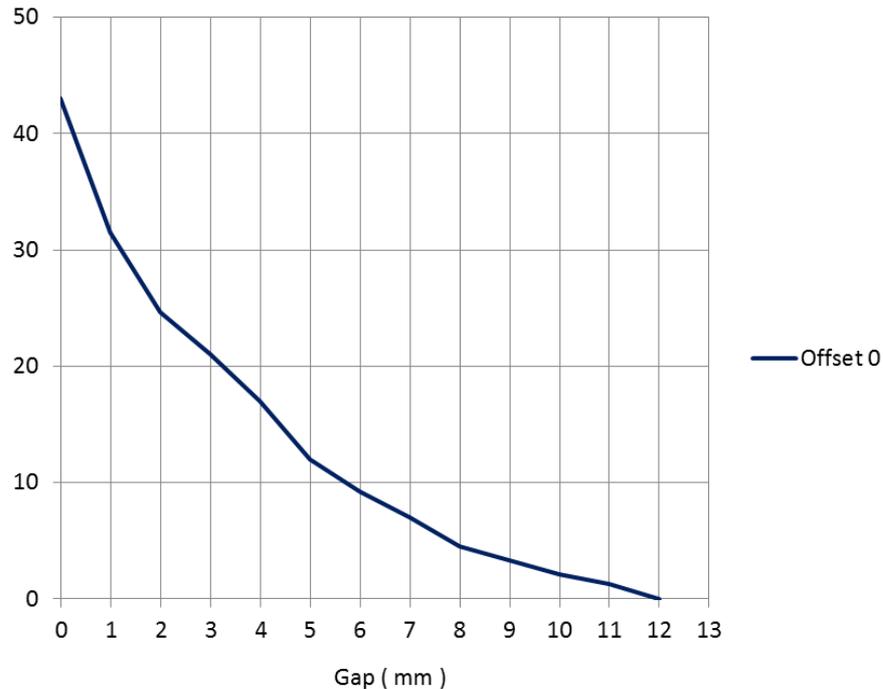


Diagramma di carico/deformazione profilo

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

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

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

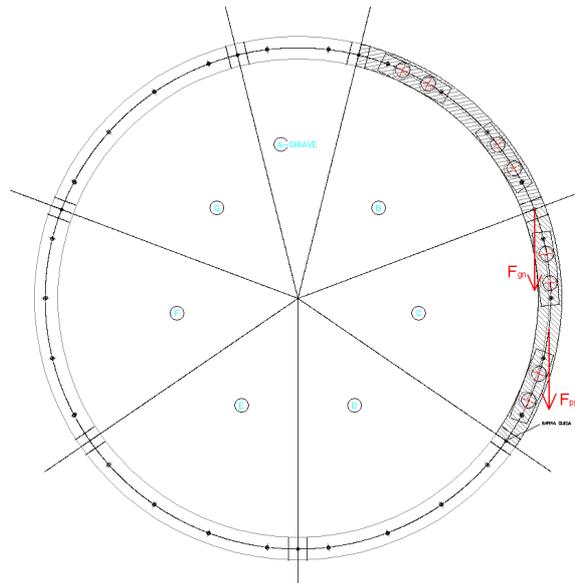
$$F_{g,an} = 25 \text{ kN/m} \cdot 4.19 \text{ m} = 104.75 \text{ kN}$$

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

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

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

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



Caso sfavorevole di verifica della guarnizione nei giunti longitudinali

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 75 di 124

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

dove:

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

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

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

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

Connettori meccanici

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

Resistenza a trazione:

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

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

Resistenza al taglio:

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

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

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

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Conseguentemente la forza di trazione competente a ciascun connettore è:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

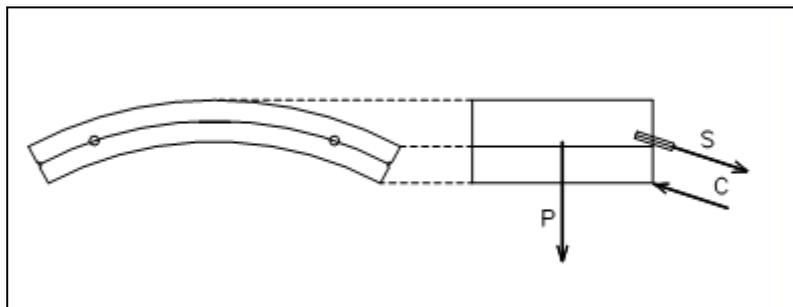
Il peso del concio è:

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

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

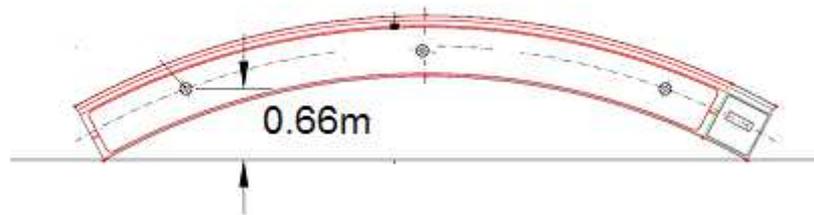
$$T = P/2 = 35.3 \text{ kN} < T_r$$

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



Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	77 di 124



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

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

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

Si ricava quindi la forza di trazione sul singolo connettore:

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

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

10.5.4 Verifiche statiche in fase definitiva : modelli di calcolo e criteri di verifica

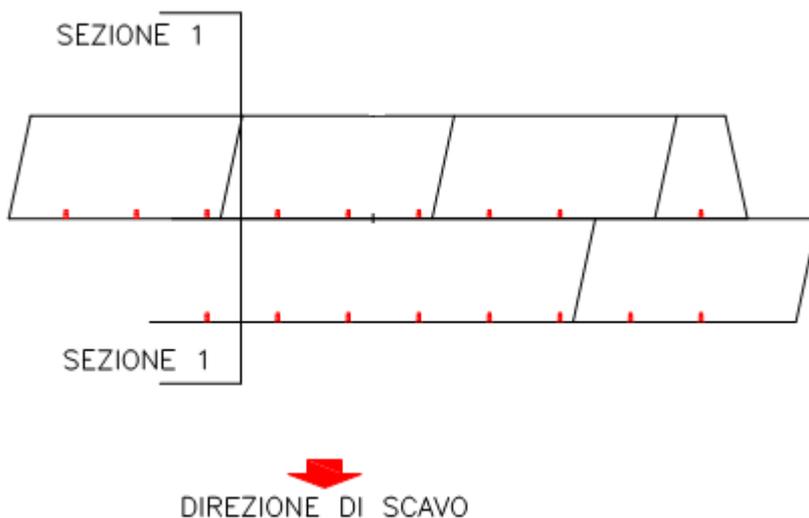
Nelle analisi numeriche effettuate in sede di progetto l’anello del rivestimento definitivo è stato simulato come elementi continui (beam), ossia in grado di trasferire momenti flettenti lungo tutto il perimetro di scavo.

Infatti i giunti tra concio e concio di due anelli contigui sono sfalsati in modo che ciascun anello può essere considerato come un involucro continuo cilindrico.

Il complesso dei conci sfalsati ha quindi un comportamento globale a “guscio”.

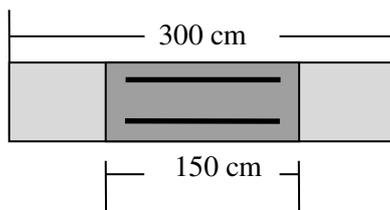
Nelle analisi, essendo rappresentato il rivestimento definitivo come costituito da conci discontinui e sfalsati, le caratteristiche meccaniche di ogni asta si riferiscono ad una sezione di anello di lunghezza unitaria.

A seguito delle analisi così condotte, l’anello del rivestimento definitivo in cls è stato verificato facendo riferimento alla sezione n°1 di Figura (sezione in prossimità del giunto), ossia considerando l’area di cls di due conci e l’armatura di uno soltanto.



Le sollecitazioni applicate sono quelle relative a due conci.

Per quanto riguarda le analisi e le verifiche condotte si considera quindi la sezione 1.



	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Al fine di integrare le verifiche di cui sopra, è stata analizzato il comportamento in corrispondenza del giunto per il quale sono state effettuate le opportune verifiche.

Definizione degli stati limite

Le verifiche sono eseguite mediante il metodo agli stati limite; preliminarmente vengono quindi trovate le sollecitazioni ultime alle quali l'anello di conci armato può resistere in termini di dominio Nu-Mu e di massima sollecitazione di taglio Tu; successivamente vengono calcolate le sollecitazioni di progetto Nd, Md, Td agenti nelle diverse fasi e verificata la loro appartenenza ai domini di resistenza.

Caratteristiche dei materiali

CALCESTRUZZO:

classe (resistenza caratteristica cubica): **C45/55 MPa**

resistenza caratteristica cilindrica: $f_{ck}=0.83 \times R_{ck}=45.65 \text{ MPa}$

resistenza caratteristica a trazione: $f_{ctk}=2.7 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 36416 \text{ MPa}$

massima deformazione di accorciamento: $\epsilon_c=3.5 \text{ ‰}$

classe (resistenza caratteristica cubica): **C55/67 MPa**

resistenza caratteristica cilindrica: $f_{ck}=0.83 \times R_{ck}= 55.6 \text{ MPa}$

resistenza caratteristica a trazione: $f_{ctk}=3 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 38325 \text{ MPa}$

massima deformazione di accorciamento: $\epsilon_c=3.5 \text{ ‰}$

ACCIAIO PER ARMATURA:

tipo: B450

tensione caratteristica di snervamento: $f_{yk}=450 \text{ MPa}$

modulo elastico: $E_s=210000 \text{ MPa}$

massima deformazione di allungamento $\epsilon_a=10 \text{ ‰}$

Coefficienti di sicurezza sulla resistenza dei materiali

Per il calcolo delle azioni resistenti allo SLU della sezione sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di sicurezza (a dividere i valori di resistenza dei materiali).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 80 di 124

- per la resistenza a compressione del cls.: $\gamma_c=1.5$
- per la resistenza a compressione del cls. in condizioni eccezionali: $\gamma_c=1.3$
- per la resistenza dell'acciaio: $\gamma_a=1.15$

per tenere conto della diminuzione della resistenza del calcestruzzo sottoposto a carichi di lunga durata, nelle verifiche in fase definitiva la resistenza caratteristica cilindrica (fck) viene opportunamente ridotta di un ulteriore coefficiente pari a 0.85.

I valori di calcolo delle resistenze del calcestruzzo e dell'acciaio risultano quindi:

CALCESTRUZZO

C45/55

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata):

$$f_{cd1}=0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 25.5 \text{ MPa}$$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata):

$$f_{cd2}=f_{ck} / \gamma_c = 30 \text{ MPa}$$

C55/67

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata):

$$f_{cd1}=0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 31.5 \text{ MPa}$$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata):

$$f_{cd2}=f_{ck} / \gamma_c = 37 \text{ MPa}$$

ACCIAIO

resistenza di calcolo a snervamento dell'acciaio:

$$f_{yd}=f_{yk} / \gamma_a = 391 \text{ MPa}$$

COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI:

Le sollecitazioni agenti sulla sezione nelle diverse condizioni di carico, sia in fase definitiva che in fase transitoria vengono amplificate secondo un coefficiente di sicurezza pari a $\gamma_{gtu}=1.3$ per le verifiche agli stati limite ultimi, mentre $\gamma_{gte}=1.0$ per le verifiche agli stati limite di esercizio.

Le sollecitazioni di calcolo sono quindi:

$$N_d = N_t \times \gamma_{gt}$$

$$M_d = M_x \times \gamma_{gt}$$

$$T_d = T_x \times \gamma_{gt}$$

10.5.5 Requisiti Stati limite

S.L.U. per tensioni normali in fase definitiva

Per la verifica a pressoflessione in fase definitiva si riporta il dominio di resistenza della sezione di due anelli consecutivi del rivestimento. Data la discontinuità del rivestimento posto in opera, dovuta alla presenza dei giunti tra gli anelli, le verifiche vengono effettuate considerando che il momento flettente possa essere assorbito, a livello di trazioni, soltanto dove è presente la continuità strutturale.

Le verifiche sono quindi condotte considerando due anelli consecutivi mentre l'armatura è quella relativa ad un solo anello.

Viste le 2 differenti classi di armatura, riportati nella tabella seguente, verranno definiti i 2 domini di rottura. Si riporteranno inoltre nello stesso grafico il dominio della sezione con le armature necessarie.

Classi di armatura	Estradosso	Intradosso
I	14 ϕ 16	14 ϕ 16
II	14 ϕ 14	14 ϕ 14

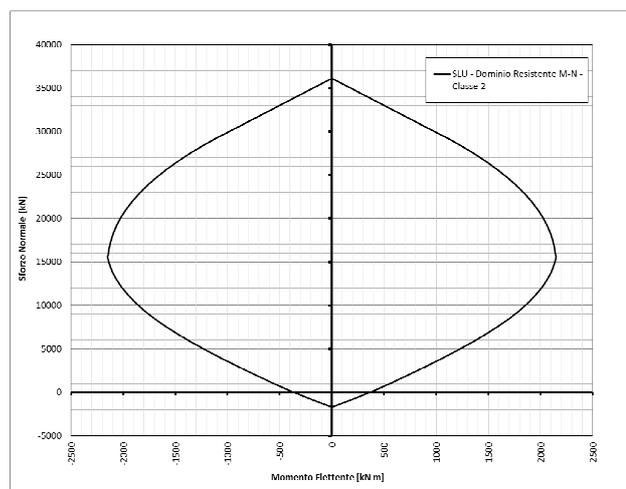
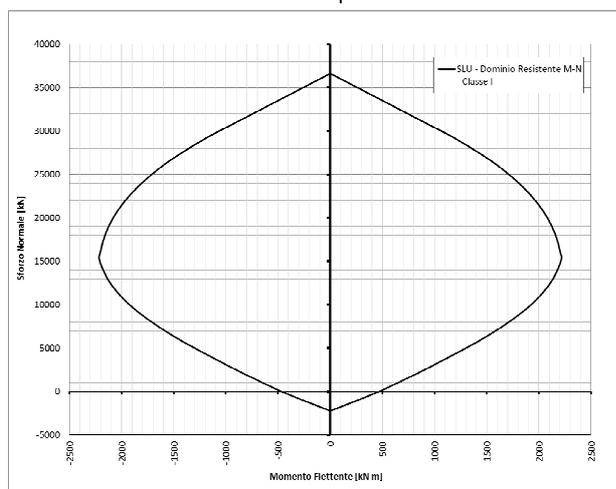


Figura 18 - Dominio resistente SLU (B=3, H = 0.45 m) – Classe 1 e 2 – C45/55

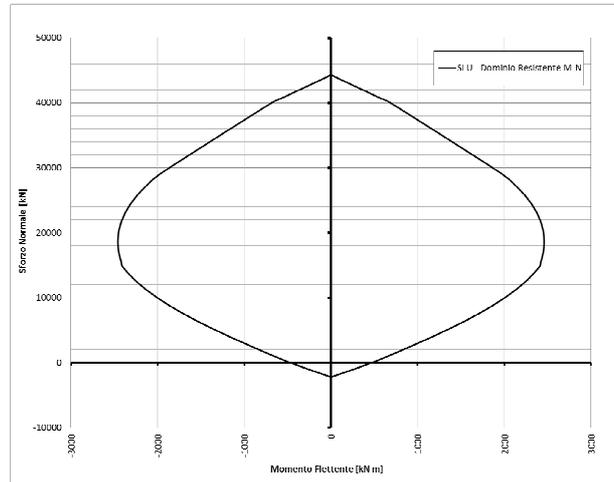


Figura 19 - Dominio resistente SLU (B=3, H = 0.45 m) – Classe 1 – C55/67

Per la valutazione delle resistenze ultime nei confronti di sollecitazioni taglianti (valido per elementi monodimensionali), è stato considerato quanto riportato di seguito.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p>					
<p>Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p>	<p>COMMESSA RS3U</p>	<p>LOTTO 40D 07</p>	<p>CODIFICA CL</p>	<p>DOCUMENTO GN 00001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 83 di 124</p>

S.L.U. per taglio in fase definitiva

La resistenza a taglio V_{Rd} degli elementi strutturali sprovvisti di specifica armatura a taglio è stata valutata, utilizzando formule di comprovata affidabilità, sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo.

La verifica di resistenza (SLU) si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove V_{Ed} è il valore di calcolo dello sforzo di taglio.

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza al taglio si valuta con:

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (4.1.14)$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d)$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale ($\leq 0,02$);

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$);

b_w è la larghezza minima della sezione (in mm).

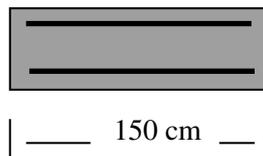
Nelle tabelle di sintesi delle verifiche è riportato il coefficiente di utilizzo della sezione ($V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1$), il quale deve risultare inferiore all'unità affinché la verifica risulti soddisfatta.

S.L.U. per tensioni normali in fase provvisoria

Per le verifiche a pressoflessione nelle fasi provvisorie che si verificano prima della messa in opera dell'anello di rivestimento a tergo della macchina TBM si riporta il dominio di resistenza della sezione un singolo concio.

Le verifiche riportate in seguito sono state svolte nelle condizioni più gravose, ovvero con la classe di armatura II.

Il momento resistente della sezione per un $N = 0$ è pari a 288.7 kN m



$b=150$ cm

$h=45$ cm

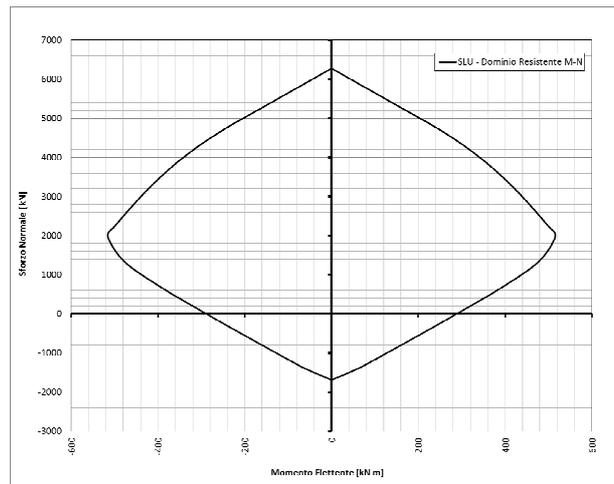


Figura 20 - Dominio resistente SLU (B=1,50, H = 0.45 m) - Classe 2 – C 16/20

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Stati limite di esercizio

S.L. per le tensioni di esercizio

Le condizioni ambientali più gravose per i conci si stabiliscono in fase definitiva con il rivestimento completato. Le massime tensioni tollerate nei materiali sono le seguenti:

CLS(C45/55)

σ_{\max} per combinaz. di carico rara $0.60 \cdot f_{ck} = 27 \text{ MPa}$

σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente $0.45 \cdot f_{ck} = 20.25 \text{ MPa}$

CLS(C55/67)

σ_{\max} per combinaz. di carico rara $0.60 \cdot f_{ck} = 33 \text{ MPa}$

σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente $0.45 \cdot f_{ck} = 24.7 \text{ MPa}$

ACCIAIO

σ_{\max} $0.8 \cdot f_{yk} = 360 \text{ MPa}$

Stato limite di fessurazione

Per assicurare la funzionalità e la durata delle strutture si deve:

- garantire un sufficiente ricoprimento delle armature con calcestruzzo di buona qualità e compattezza, bassa porosità e bassa permeabilità;
- non superare uno stato limite di fessurazione adeguato alle condizioni ambientali, alle sollecitazioni ed alla sensibilità delle armature alla corrosione;
- tener conto delle esigenze estetiche.

In ordine di severità decrescente si distinguono i seguenti stati limite di fessurazione:

- stato limite di decompressione nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0;
- stato limite di formazione delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

dove f_{ctm} rappresenta la resistenza a trazione media del cls.

- stato limite di apertura delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$w_1 = 0.2 \text{ mm}$ per combinazione quasi permanente

$w_2 = 0.3 \text{ mm}$ per combinazione frequente (considerata per le condizioni di carico provvisorie)

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 86 di 124

Lo stato limite di fessurazione è stato fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione. Le verifiche condotte per i diversi stati limite di fessurazione sono di seguito riportate.

Il valore di calcolo di apertura delle fessure (w_d) non deve superare i valori nominali w di progetto. Il valore di calcolo è dato da:

$$w_d = 1.7 w_m$$

dove w_m , rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

L'ampiezza media delle fessure w_m è calcolata come prodotto della deformazione media delle barre d'armatura ϵ_{sm} per la distanza media tra le fessure Δ_{sm} :

$$w_m = \epsilon_{sm} \times \Delta_{sm}$$

Per il calcolo di ϵ_{sm} , e Δ_{sm} vanno utilizzati criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica nel rispetto delle indicazioni fornite nel paragrafo C4.1.2.2.4.6 della Circolare 02/02/2009.

In assenza di dati più precisi, i parametri Δ_{sm} e ϵ_{sm} che definiscono w_m , possono valutarsi come segue, nell'ipotesi che le armature siano distribuite uniformemente sull'area efficace della sezione trasversale.

- la distanza media fra le fessure Δ_{sm} per la condizione di fessurazione stabilizzata in corrispondenza del livello baricentrico dell'armatura all'interno dell'area efficace e data da:

$$\Delta_{sm} = 2 (c+s/10)+k_2 k_3 \phi/\rho_r$$

c = copriferro netto armatura tesa (mm);

s = interasse tra i ferri, se $s > 14\Phi$ si adotterà $s = 14\Phi$ (mm);

Φ = diametro delle barre (mm);

$k_2 = 0.4$, per barre ad aderenza migliorata;

$k_3 = 0.125$, per diagramma delle σ triangolare, dovuto a flessione o pressoflessione;

$\rho_r = A_s/A_{c,eff}$;

A_s = area della sezione di acciaio posta nell'area $A_{c,eff}$.

- la deformazione unitaria media dell'armatura ϵ_{sm} può valutarsi secondo la seguente espressione che tiene conto della collaborazione del calcestruzzo teso che la circonda:

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	87 di 124

$$\varepsilon_{sm} = \sigma_s / E_s (1 - \beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2) \geq (0.4 \sigma_s / E_s)$$

σ_s = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la combinazione di azioni considerata;

σ_s = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la sollecitazione corrispondente al raggiungimento della resistenza a trazione f_{ctm} nella fibra di calcestruzzo più sollecitata nella sezione interamente reagente;

β_1 = 1.0 per barre ad aderenza migliorata;

β_2 = 0.5 nel caso di azioni di lunga durata o ripetute.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p>												
<p>Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p>	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>RS3U</td> <td>40D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 00001</td> <td>B</td> <td>88 di 124</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	88 di 124
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	88 di 124								

10.6 VERIFICHE STATICHE: PRESENTAZIONE E RISULTATI

Si riporta di seguito una tabella repilogativa delle analisi numeriche effettuate per l'analisi e la verifica degli scavi e dei rivestimenti.

Tabella 14 - Sezioni di analisi fasi di terapia

Analisi n.	Sezione	progressiva	formazione	Condizione analisi
1	axiTRV100m	-	TRV	Assialsimmetrico copertura 100m
2	axiTRV200m_s	-	TRV	Assialsimmetrico copertura 200m – sovrascavo 5cm
3	axiTRV100m_s	-	TRV	Assialsimmetrico copertura 100m – sovrascavo 5cm
4	TRV100m		TRV	<i>Piana copertura 100m</i>
5	TRV200m_s		TRV	<i>Piana copertura 200m – sovrascavo 5cm</i>

Ai fini di una corretta e completa valutazione della adeguatezza del dimensionamento effettuato, si ritengono sufficienti le verifiche statiche eseguite.

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	89 di 124

Modello geotecnico

Sezione di analisi	Unità	pk	Z ₀	h _w	σ _o	p _{w0}	p _{wR}	R _w	γ	c' _k	φ' _k	c _{u k}	E _k	E _{u k}
		[km]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN/m ³]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
D1	TRV	9200	50	-	1,05	-	-	-	21	-	-	0,500	-	250
D2	TRV	12050	100	81.5	2,2	0.815	-	-	22	121	19	0,594	300	297
D3	TRV	13100	200	100	4,4	1	-	-	22	260	16	1,188	600	594

Z₀ = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

h_w = carico idraulico

σ_o = tensione totale iniziale al livello del cavo

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

p_{wR} = pressione interstiziale sul profilo di scavo

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

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

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

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

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

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

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

	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA</p>												
<p>Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3U</td> <td>40D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 00001</td> <td>B</td> <td>90 di 124</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	90 di 124
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	90 di 124								

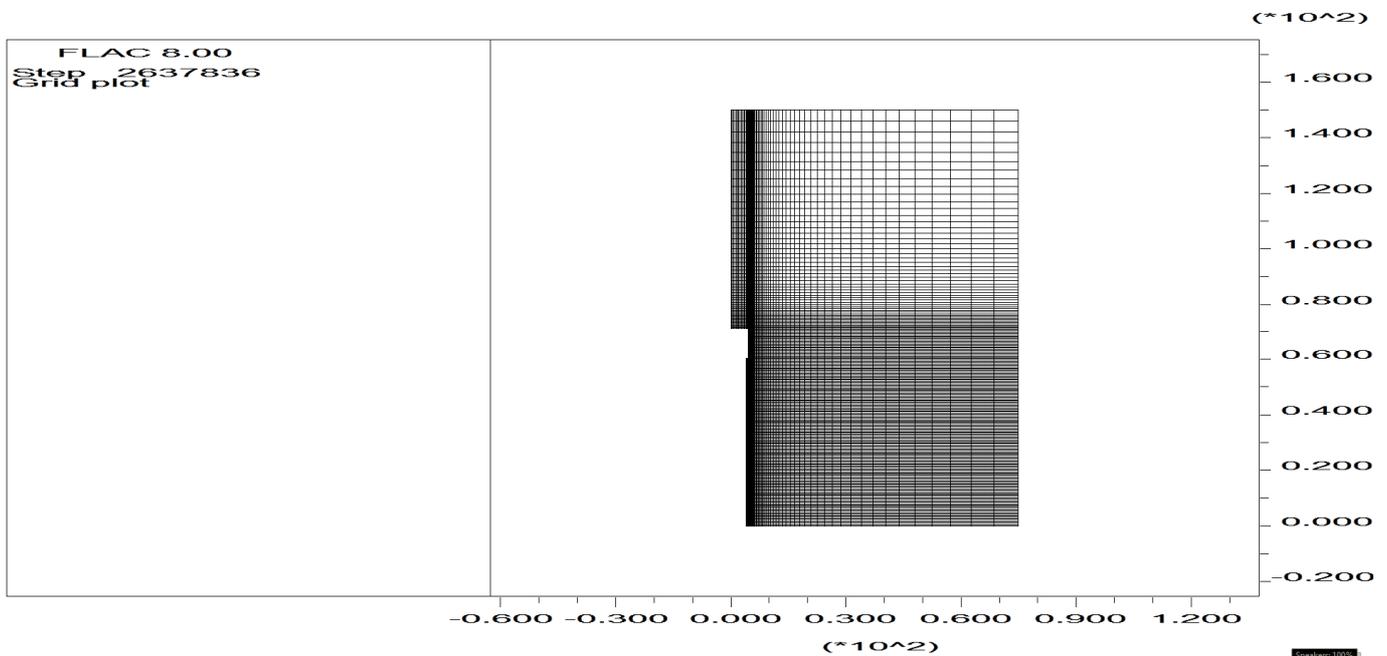
10.6.1 Modelli assialsimmetrici – Criteri di verifica

Si sono effettuate 6 analisi numeriche assialsimmetriche al fine di simulare il comportamento del terreno allo scavo e l'interazione del medesimo con gli interventi previsti (pressioni al fronte) nonché con lo scudo della TBM ed il rivestimento a tergo. In particolare l'analisi si prefigge lo scopo di stimare le pressioni del terreno sullo scudo, al fine di determinare la spinta totale necessaria negli scenari di seguito indicati, nonché il detensionamento del terreno al contorno dei conci, a debita distanza dal fronte (condizioni piane indisturbate), al fine di determinare il rilascio delle forze da imporre nelle analisi numeriche piane utilizzate per il dimensionamento e la verifica dei conci.

Modello geometrico

La mesh di calcolo è costituita da 71x200 di elementi rettangolari, opportunamente intensificati nelle zone di maggiore interesse in corrispondenza della galleria, in modo da seguire il più fedelmente possibile le geometrie locali delle strutture. Inferiormente il modello è vincolato con carrelli.

La griglia presenta un'estensione laterale di 75 m e un'altezza complessiva di 150 m. I bordi del modello numerico sono stati collocati sufficientemente lontani dalla galleria (a distanza >8D con D=diametro della galleria), in modo tale che le condizioni di vincolo ivi definite non influenzino la modellazione.



	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA												
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>RS3U</td> <td>40D 07</td> <td>CL</td> <td>GN 00001</td> <td>B</td> <td>91 di 124</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	91 di 124
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	91 di 124								

L'analisi si prefigge passo passo di simulare l'avanzamento sia dello scudo metallico che del rivestimento e relativo riempimento di miscela a tergo, simulando l'applicazione di una pressione al fronte e di un eventuale sovrascavo. Esso si realizza sia con la configurazione geometrica della macchina TBM (e cioè la differenza di raggio fra la testa e la coda rappresentata dalla conicità del mantello) e tramite gauge cutters che con un'ulteriore alesatura in testa attraverso il copy-cutter. Questo sovrascavo, sia in un caso che nell'altro, in terreni scadenti in relazione agli stati tensionali in gioco, spesso non viene compensato totalmente dal riempimento della miscela bicomponente a tergo, per cui si realizza un'ulteriore deconfinamento oltre a quello del fronte.

I rivestimenti e lo scudo sono simulati con elementi mesh. Lo sfondo virtuale di scavo è di 0.5m. il sovrascavo, nel caso in cui si decida di simularlo, è realizzato attraverso un gap dotato di interfacce e l'analisi è svolta in modalità a grandi deformazioni. Lo scudo ipotizzato di lunghezza 11m e spessore 5cm è simulato con un modello costitutivo elastico lineare; tutti gli altri elementi compreso il terreno è simulato con un legame elastoplastico con criterio di resistenza di Mohr Coulomb.

La seguente tabella riassume la successione delle fasi di calcolo delle analisi condotte:

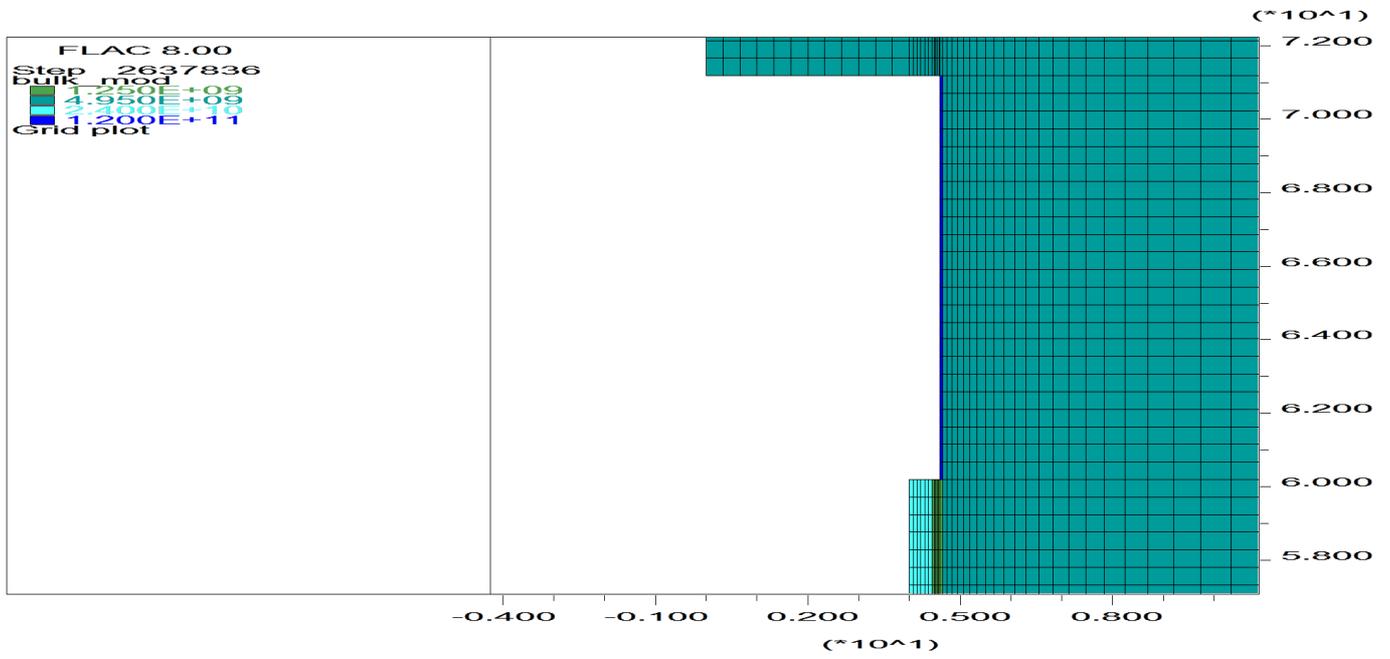
Tabella 2 - Fasi di analisi

Fase	Descrizione
0	Creazione della geometria del modello
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb)
3	Scavo iniziale corrispondente allo scudo TBM ed applicazione pressioni al fronte
4	Simulazione dello scavo in CND (Cu) a regime per sfondi limitati (con eventuale sovrascavo) avanzamento scudo metallico, applicazione della pressione al fronte e installazione del rivestimento definitivo e della miscela bicomponente
5	Scavo per una lunghezza totale finale di 75m, fino al centro della mesh; si valutano le pressioni sullo scudo e sul rivestimento definitivo a tergo

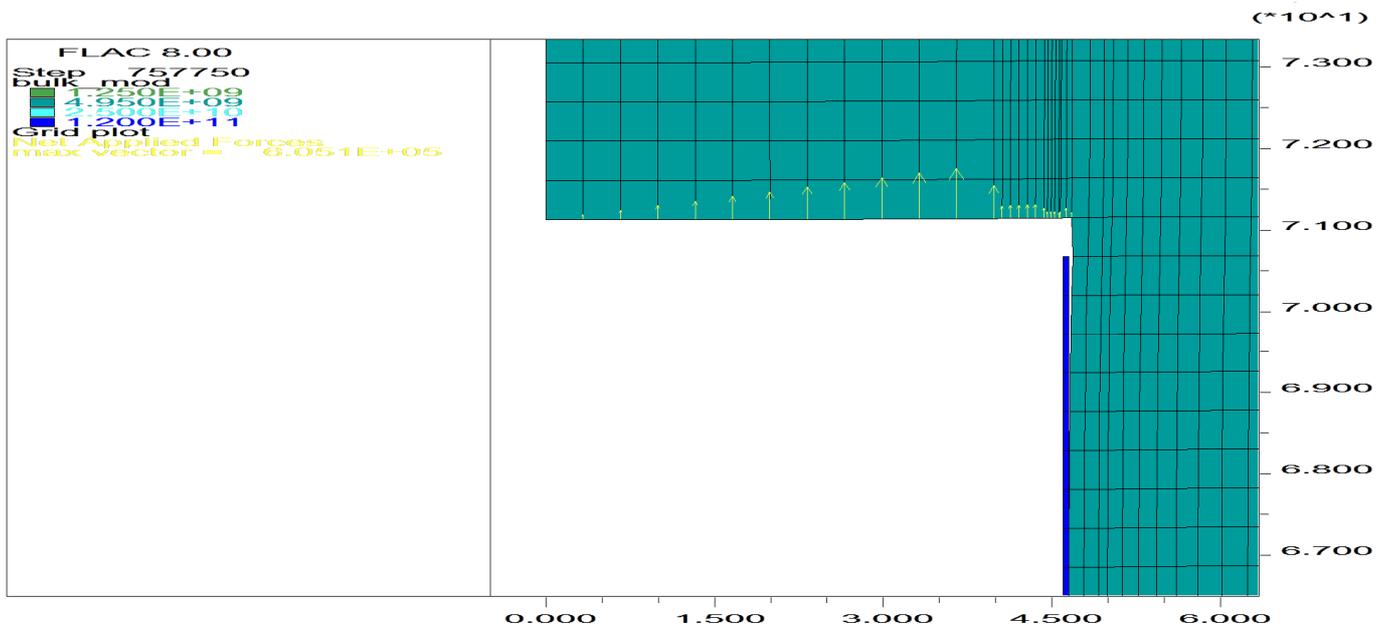
Si ipotizza un sovrascavo di circa 5cm da realizzarsi attraverso un'opportuna conicità dello scudo e/o attraverso l'ausilio del copycutter. Si sono svolte comunque anche analisi senza simulare il sovrascavo ipotizzando comunque un raggio di scavo pari a 4.65m.

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	92 di 124



Rappresentazione della mesh e degli elementi di sostegno (scudo in giallo, rivestimento in conci in rosso, miscela bicomponente in viola)



Particolare della mesh e degli elementi di sostegno (scudo in giallo e relativo gap con deformazione del terreno fino a toccare lo scudo, pressione al fronte)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

10.6.2 Modelli assialsimmetrici - Valutazione delle spinte massime di esercizio della TBM e dei fattori di rilascio dello stato tensionale

Di seguito si rappresenta l'esito delle analisi assialsimmetriche in forma sintetica

N	Id	Facies geotecnica	Tipologia analisi	Tipo di analisi	Pressione fronte (bar)	Relax preinstallazione conci (%)	Spinta su scudo (KN)
1	axiTRV100m	TRV	Assialsimmetrico copertura 100m	Non drenata	3	32	1650*
2	axiTRV200m_s	TRV	Assialsimmetrico copertura 200m–sovrascavo 5cm	Non drenata	5	42	22000
3	axiTRV100m_s	TRV	Assialsimmetrico copertura 100m–sovrascavo 5cm	Drenata	5	73	1649

*spinta sullo scudo valutata nel caso di sovrascavo di 5cm comunque dovuto ai cutter-edges

Dal punto di vista delle spinte le analisi più significative sono quelle che ipotizzano un sovrascavo permanente di 5cm dal momento che la macchina TBM è sempre progettata con una conicità radiale centimetrica e tramite gauge cutters. Nel dettaglio la spinta complessiva deve tenere conto di quattro singoli termini:

$$\Sigma W = W_{sh} + W_{sk} + W_{exc} + W_{sup}$$

W sh : Forza dovuta alla presenza delle spazzole e del cutting edge =584KN

W sk : Forza dovuta all'attrito ($\mu=0.2$) macchina-terreno (spinta massima prevista dal calcolo sullo scudo più peso totale macchina incluso backup stimato in 1200t) =34000 KN

W sup : Forza di pressione max da applicare al fronte=33900 KN

W exc : Forza necessaria allo scavo=9000KN

Le analisi svolte hanno condotto ai seguenti valori di progetto:

·Spinta di progetto max (avanzamento in condizioni ordinarie, in relazione al contesto geomeccanico e morfologico): 100.000 – 115.000 kN·

Extra Spinta di progetto (ripartenza fresa in condizioni eccezionali): 130.000 kN

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 94 di 124



Figura 21 – andamento delle tensioni efficaci post scavo normalizzate in funzione della distanza dal fronte

10.6.3 Modelli piani

Si sono effettuate 2 analisi numeriche piane al fine di simulare l'interazione del medesimo il rivestimento definitivo a tergo.

Modello geometrico

La mesh di calcolo è costituita da 71x200 di elementi rettangolari, opportunamente intensificati nelle zone di maggiore interesse in corrispondenza della galleria, in modo da seguire il più fedelmente possibile le geometrie locali delle strutture. Inferiormente il modello è vincolato con carrelli.

La griglia presenta un'altezza di 75 m e una larghezza complessiva di 150 m. I bordi del modello numerico sono stati collocati sufficientemente lontani dalla galleria (a distanza $>8D$ con D =diametro della galleria), in modo tale che le condizioni di vincolo ivi definite non influenzino la modellazione.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

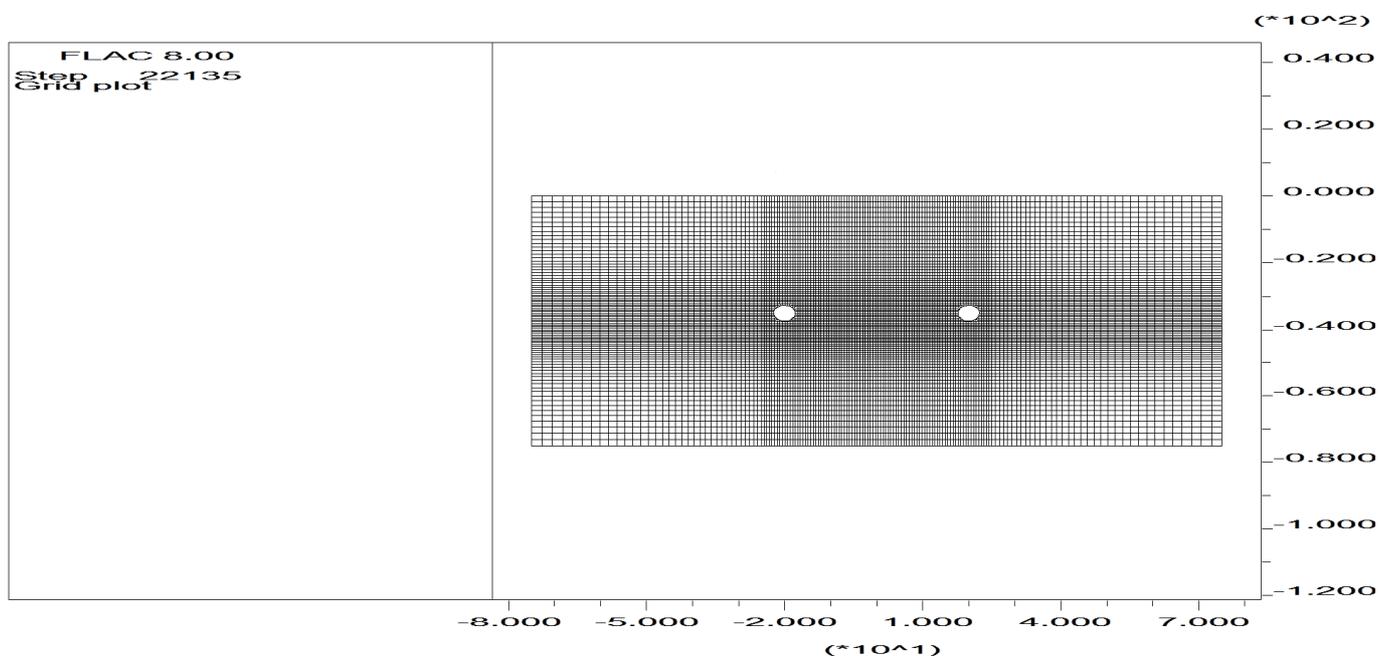


Figura 22 – Mesh di calcolo

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo. La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, determinato dalle analisi assialsimmetriche. Per il valore di K_0 in questo caso si è assunto il valore reale stimato nella caratterizzazione geotecnica.

La seguente tabella schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 2 - Fasi di analisi

Fase	Descrizione	Rilascio forze di scavo
0	Creazione della geometria del modello	-
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche	-
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb)	-
SCAVO CANNA DESTRA		

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	96 di 124

3	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu)	varie
4	Installazione dell'anello universale	1.0
SCAVO CANNA SINISTRA		
5	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra)	varie
6	Installazione dell'anello universale	1.0
LUNGO TERMINE		
7	Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati	1.0

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 97 di 124

10.6.4 Verifica dei giunti - pressioni di contatto

La trasmissione degli sforzi assiali lungo l'anello, in corrispondenza dei giunti tra conci successivi, avviene su una superficie di contatto ridotta rispetto alla sezione effettiva in relazione alla presenza degli smussi ai bordi. Pertanto, su tali sezioni sono state condotte le verifiche alla pressione di contatto e alle trazioni indotte per effetto di un carico concentrato.

Le verifiche descritte nel seguito fanno riferimento al dettaglio della geometria dei giunti e dello schema di diffusione delle pressioni di contatto nei giunti tra concio e concio.

Per quanto riguarda le sollecitazioni, i momenti agenti in corrispondenza del giunto sono stati opportunamente ridotti.

10.6.5 Verifica delle pressioni di contatto

La verifica SLU, condotta in base al punto 5.4.8.1 dell'Eurocodice 2, è soddisfatta essendo:

$$N_d < F_{rdu} \leq F_{max}$$

dove:

$$F_{rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot (A_{c1}/A_{c0}) \cdot 0.5$$

$$A_{c0} = b_0 \cdot l_0$$

$$A_{c1} = b_1 \cdot l_1$$

$$F_{max} = 3.3 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}$$

Nelle relazioni sopra riportate risulta:

A_{c0} = area caricata della sezione di verifica in esame, essendo b_0 l'altezza di sezione reagente a compressione, con riferimento alle sollecitazioni di presso-flessione determinate con l'analisi per differenze finite per la condizione di carico considerata, ed l_0 la larghezza del concio decurtata degli smussi presenti sul bordo;

A_{c1} = massima area corrispondente geometricamente ad A_{c0} avente lo stesso baricentro ed inscritta nella sezione del concio, essendo b_1 l'altezza del prisma sostitutivo per carico eccentrico, corrispondente al valore di b_0 prima definito, quindi dedotta dall'altezza di sezione reagente a compressione, ed l_1 la larghezza del concio.

Per il cls le tensioni nel calcestruzzo, nel caso di SLU a $0.85f_{ck}/\gamma_c$

Le verifiche risultano soddisfatte essendo $N_d < F_{rdu} \leq F_{max}$.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 98 di 124

10.6.6 Verifica alle trazioni indotte

Il carico concentrato determina inoltre una forza di divaricamento sul concio in direzione radiale che può essere stimata secondo la formula proposta da Leonhardt:

$$F_t = 0.3 \times (N_d) \times (1 - b_0/b_1)$$

in cui b_0 e b_1 sono rispettivamente l'altezza della superficie di contatto e la dimensione del prisma sostitutivo per carico eccentrico, precedentemente determinate.

Allo scopo di assorbire la forza di trazione indotta, verranno disposte lungo la faccia del singolo concio un'area complessiva pari a:

Tipo I: 14 ϕ 16

Tipo II: 14 ϕ 14

La massima forza di trazione resistente risulta pari a:

SLU:

Tipo I: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

Tipo II: $F_{t,res} = A_s \times f_{yd}$

In entrambi i casi, le verifiche risultano soddisfatte essendo $F_t < F_{t,res}$.

Analisi 4 - TRV - Verifiche delle pressioni di contatto – Assenza di sovrascavo – 100 m di copertura – C45/55 – Classe II

CANNA destra

	100m TRV			
	Nsle	Msle	N	M
1	5383.00	138.80	5383.00	138.80
48	6340.00	-173.60	6340.00	-173.60
33	5735.00	161.30	5735.00	161.30
18	6409.00	-176.20	6409.00	-176.20

Step di calcolo	Sezione	NSLE	MSLE	M _{joint}	Eccentr	H/6	b ₁	d ₁	A _{c0}	b ₂	d ₂	A _{c1}
		[kN]	[kNm]	[kNm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[cm ²]
100m TRV	1	8074.5	-208.2	-145.7	3.8	5.83	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	48	9510.0	260.4	182.3	3.9	5.83	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	33	8602.5	-242.0	-169.4	4.0	5.83	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	18	9613.5	264.3	185.0	3.9	5.83	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364

CLS				ACCIAIO			
N _{SLU}	F _{rdu}	F _{max}	VERIF.	F _{td}	A _{smin}	F _{t,res}	VERIF.
[kN]	kN	kN		[kN]	[cm ²]	[kN]	
10497	16995	49211	OK	586	15.0	969.3	OK
12363	16995	49211	OK	690	17.6	969.3	OK
11183	16995	49211	OK	624	16.0	969.3	OK
12498	16995	49211	OK	698	17.8	969.3	OK

CANNA sinistra

	100m TRV			
	Nsle	Msle	N	M
128	5388.00	137.90	5388.00	137.90
112	6396.00	-171.00	6396.00	-171.00
97	5740.00	157.60	5740.00	157.60
81	6343.00	-172.70	6343.00	-172.70
	6500		6500.00	

Step di calcolo	Sezione	NSLE	MSLE	M _{joint}	Eccentr	H/6	b ₁	d ₁	A _{c0}	b ₂	d ₂	A _{c1}
		[kN]	[kNm]	[kNm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[cm ²]
100m TRV	128	8082.0	-206.9	-144.8	3.8	5.8	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	112	9594.0	256.5	179.6	3.9	5.8	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	97	8610.0	-236.4	-165.5	3.9	5.8	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	81	9514.5	259.1	181.3	3.9	5.8	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364
	0	9750.0	0.0	0.0	2.0	5.8	35.0	140.0	4 900	43.0	148.0	6364

CLS				ACCIAIO			
N _{SLU}	F _{rdu}	F _{max}	VERIF.	F _{td}	A _{smin}	F _{t,res}	VERIF.
[kN]	kN	kN		[kN]	[cm ²]	[kN]	
10507	16995	49211	OK	586	15.0	969.3	OK
12472	16995	49211	OK	696	17.8	969.3	OK
11193	16995	49211	OK	625	16.0	969.3	OK
12369	16995	49211	OK	690	17.7	969.3	OK
12675	16995	49211	OK	707	18.1	1978.2	OK

*per il significato delle grandezze nelle tabelle si veda il paragrafo “verifica delle pressioni di contatto”

Le verifiche risultano soddisfatte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

10.6.7 *Analisi n. 4 -*

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

Stratigrafia di calcolo		C	Superficie piezometrica	γ	c'_k	ϕ'_k	E'	K_0
<i>Formazione</i>	<i>Profondità da p.c.</i>							
[-]	[m da pc]	[m]	[m] da calotta	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
TRV	In tutto il modello	100	81.5	22	121	19	300	0.67

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

Caratteristiche	Conci dell'anello universale
Spessore dei conci di cls	45 cm
Classe di calcestruzzo utilizzato	C45/55
Modulo elastico	36000 MPa
Inerzia della sezione di cls	7.6E-3 m ²

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 103 di 124

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

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

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C45/55 e armatura costituita da 14 ϕ 14 sia in intradosso che in estradosso.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

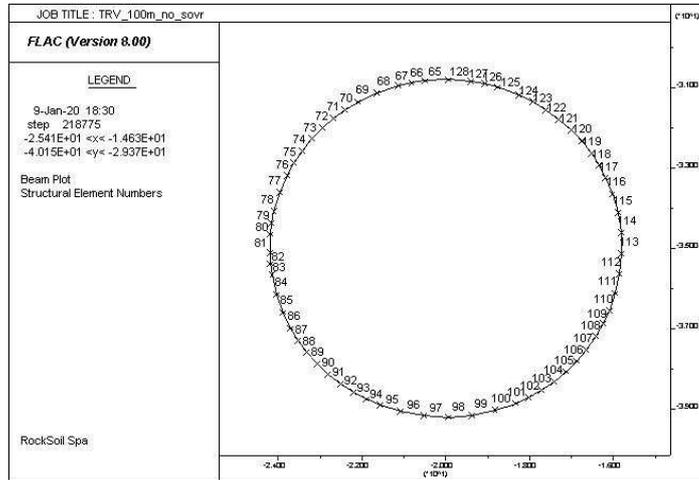


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

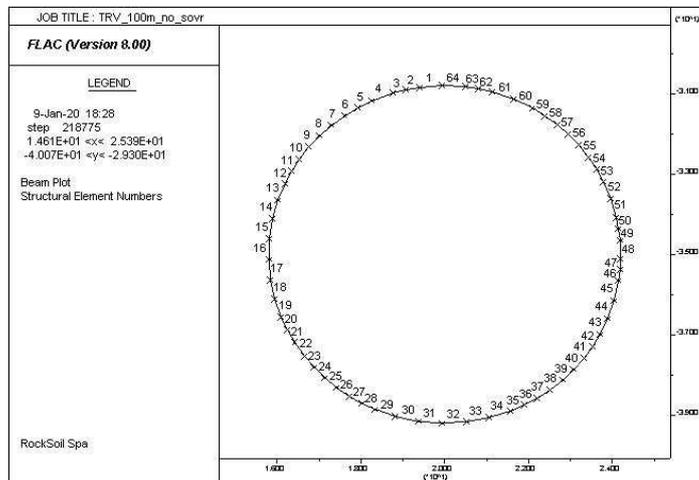


Figura 6 - Elementi liner canna destra

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

GALL Sx	ELE	NODO 1	NODO 2	Sollecitazioni da analisi numerica				Sollecitazioni di verifica			
				N	M1	M2	Mmax	N	M1	M2	Mmax
Calotta	128	128	65	5388.00	137.90	-136.20	137.9	21013.20	537.81	-531.18	537.81
piedritto dx	112	112	113	6396.00	-171.00	168.00	171.0	24944.40	-666.90	655.20	666.90
arco rovescio	96	96	97	5734.00	152.10	-158.30	158.3	22362.60	593.19	-617.37	617.37
piedritto sx	81	81	82	6343.00	-172.70	170.80	172.7	24737.70	-673.53	666.12	673.53

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

GALL Dx	ELE	NODO 1	NODO 2	Sollecitazioni da analisi numerica				Sollecitazioni di verifica			
				N	M1	M2	Mmax	N	M1	M2	Mmax
Calotta	1	1	2	5383.00	138.80	-142.80	142.8	20993.70	541.32	-556.92	556.92
piedritto dx	48	48	49	6340.00	-173.60	176.10	176.1	24726.00	-677.04	686.79	686.79
arco rovescio	33	33	34	5735.00	161.30	-154.50	161.3	22366.50	629.07	-602.55	629.07
piedritto sx	18	18	19	6409.00	-176.20	169.50	176.2	24995.10	-687.18	661.05	687.18

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 70 mm.

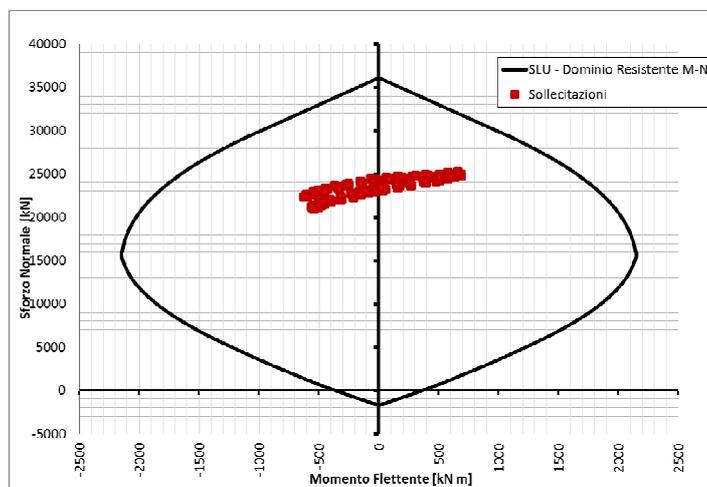


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.45 m) - Classe 2 - C45/55

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

Sollecitazioni da Analisi		Sollecitazioni di Verifica	
T	N	T	N
[N/m]	[N/m]	[N]	[N]
9.237E+04	6.272E+06	3.602E+05	1.882E+07

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	106 di 124

Geometria della sezione		
b_w	1500.00	mm
h	450.00	mm
c	63.00	mm
d	387.00	mm
A_c	675000	mm ²
b_w d	580500	mm ²
k	1.72	

Armatura longitudinale		
∅	14	mm
A_{∅l}	154	mm ²
s_l	100.00	mm
n° strati	1	
n°∅/strato	15	
A_{sl,tot}	2309	mm ²
ρ_l	0.00398	

Materiali					
Cl_s :		Acciaio :			
R_{ck}	55.00	MPa	f_{yk}	450.00	MPa
f_{ck}	45.65	MPa	f_{yd}	391.3	MPa
f_{cd}	30.4	MPa	γ_s	1.15	
γ_c	1.50				

Sollecitazioni (SLU)		
N_{sd}	18816.0	kN
σ_{cp}	6.09	MPa

Resistente al taglio per Cl _s		
V_{Rd}^{min}	839.4	kN
V_{Rd}	844.7	kN

Verifiche di resistenza

V_{Ed}	360.24	kN
-----------------------	---------------	----

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad e \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{\min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	108 di 124

VERIFICA SLE

(Positive soll. di trazione)

VERIFICA PRESSO - FLESSIONE

elem		Vo x Cv		Mo x CM		No x CN		d	d'	X	σ cls	σ f	σ' f	TEST
		kN		kNm	kN	cm	cm							
1	0.00	0.0		321.6	17 415.0	38.10	6.90				-15.28	-153.76	-215.56	SI
48	0.00	0.0		365.4	19 575.0	38.10	6.90				-17.21	-172.45	-242.67	SI *
33	0.00	0.0		378.9	18 405.0	38.10	6.90				-16.51	-158.75	-231.56	SI *
18	0.00	0.0		372.6	19 689.0	38.10	6.90				-17.36	-172.97	-244.57	SI *
128	0.00	0.0		300.6	17 454.0	38.10	6.90				-15.12	-156.19	-213.95	SI
112	0.00	0.0		353.4	19 686.0	38.10	6.90				-17.18	-174.78	-242.69	SI *
96	0.00	0.0		348.3	18 444.0	38.10	6.90				-16.26	-162.10	-229.03	SI *
81	0.00	0.0		359.1	19 572.0	38.10	6.90				-17.15	-173.03	-242.03	SI *

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI = tensioni inferiori alle ammissibili
SI * = tensioni inferiori alle Max. in esercizio (0.4 - 0.6 fck)

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Analisi in condizione sismiche e incrementi delle azioni interne del rivestimento definitivo

Nel seguito si riportano gli incrementi di sollecitazioni sismiche stimate con la formulazione di Wang (Figura 18) nelle due ipotesi di scorrimento libero e perfetta aderenza all'interfaccia terreno-rivestimento (nel caso di momento flettente esse coincidono):

Tabella 5 – Parametri di input – Wang (1993)

RISPOSTA DELLA GALLERIA A DEFORMAZIONI IN DIREZIONE TRASVERSALE (OVALIZATION)

GEOTECHNICAL PARAMETERS

Formazione			
peso specifico	γ	[kN/m ³]	22
coeff. Poisson terreno	ν	[-]	0.3
coesione	c'	[kPa]	
densità	ρ	[kNs ² /m ⁴]	2.24
copertura	h	[m]	100
coefficiente di riduzione	-	[-]	5
modulo elastico statico	E_0	[MPa]	300
modulo elastico dinamico	Em dinamico	[MPa]	1500.00
		[kPa]	1500000.0

STRUCTURAL PARAMETERS

diametro	D	[m]	8.4
spessore rivestimento	t	[m]	0.45
E_{cls}	E_c	[MPa]	36283
coeff. Poisson cls	ν_{cls}	[-]	0.2
defomaz ammissibile cls	ϵ	[-]	0.003
G_{cls}	G_c	[MPa]	15117.91667
inerzia	I_c	[m ⁴]	0.00759375
area per unità di larghezza	A_l	[m ²]	0.45

EARTHQUAKE PARAMETERS

accelerazione di progetto max	a_{max}	[g]	0.177688767
PGV/PGA	PGV/ a_{max}	[cm/s/g]	87
riduzione	rid	[-]	0.7
peak ground velocity	PGV	[m/s]	0.1540
vel app. propagazione onde taglio	C_m	[m/s]	800
max deformazione taglio TAO max	γ_{max}	[-]	0.000191
Accelerazione di progetto	a_g	[g]	0.126921
Amplificazione classe di suolo	S_c	-	1.4
Amplificazione topografica	S_T	-	1
Periodo T_c	T_c	[s]	0.552113
max deformazione taglio	γ_{max}	[-]	0.000192
τ_{max} sisma	τ_{max}	[kPa]	273.64
G_{max} da V_s	G_{max}	[-]	1435270

TR [anni]	a_g [g]	F0	T*C [s]	SS	ST
2193.269146	0.126921	2.705688	0.552113	1	1

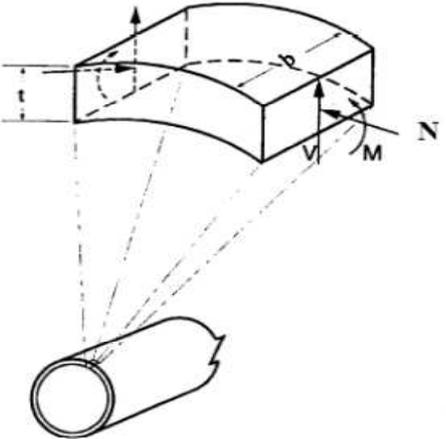
Tabella 5 – Soluzioni – Wang (1993)

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	110 di 124

SOLUZIONE DI WANG (1993)

coeff. di compressibilità	C	[-]	0.712349
coeff. di flessibilità	F	[-]	49.64280086
coeff. di risposta rivestimento	K1	[-]	0.081962733



NO SLIP

coeff. di risposta rivestimento	K2	[-]	1.055568012
---------------------------------	----	-----	-------------

$\pm N_{max}$	$\pm M_{max}$	$s(\theta)$
[kN]	[kNm]	[MPa]
384.20	53.01	2.42

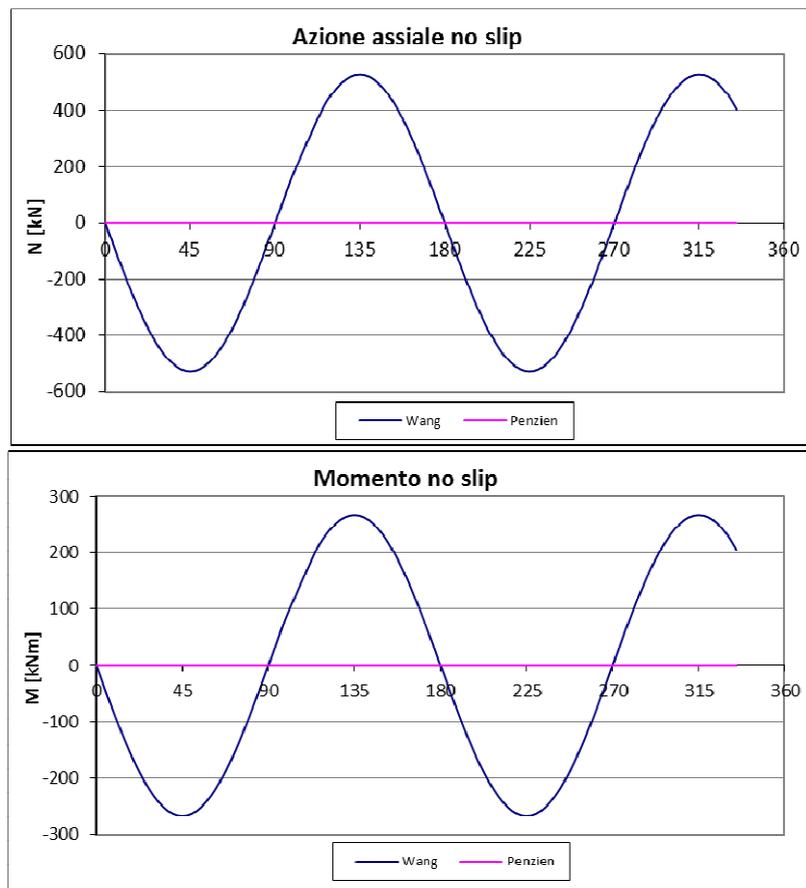


Figura 18 - Analisi sismica pseudo-statica in forma chiusa – incrementi di sforzo assiale e momento flettente

Gli incrementi di sollecitazioni sismiche si sommano, per ogni punto lungo la circonferenza definita dal rivestimento della TBM, alle sollecitazioni statiche (SLE) derivanti dall'ultima fase di calcolo statica.

Nel seguito si riportano i domini di resistenza, per entrambe le canne, per la sezione del rivestimento definitivo considerando le sollecitazioni statiche maggiorate degli incrementi sismici (sono considerate quattro combinazioni nelle quali si alternano i segni di sforzo normale e momento flettente):

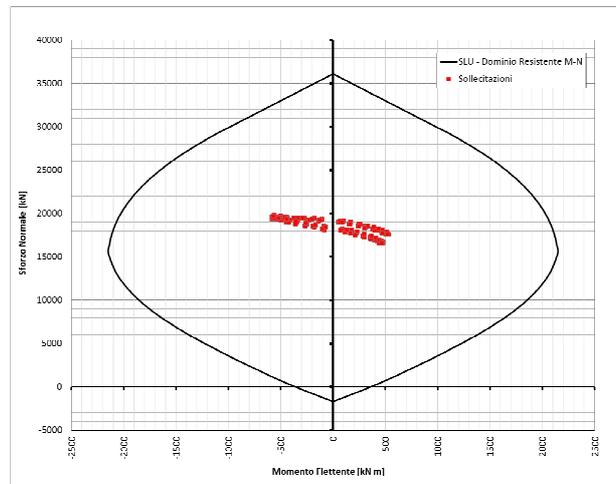


Figura 19 - Dominio resistente SLV (B = 3,00 m, H = 0.45 m) - Classe 2 - C45/55

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLV

Sollecitazione di analisi		Sollecitazione di verifica	
T	N	T	N
[N/m]	[N/m]	[N]	[N]
9.24E+04	6.27E+06	4.07E+05	1.85E+07

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	112 di 124

Geometria della sezione		
b_w	1500.00	mm
h	450.00	mm
c	63.00	mm
d	387.00	mm
A_c	675000	mm ²
$b_w d$	580500	mm ²
k	1.72	

Armatura longitudinale		
ϕ	14	mm
$A_{\phi 1}$	154	mm ²
s_1	100.00	mm
n° strati	1	
$n^\circ \phi / \text{strato}$	15	
$A_{sl, tot}$	2309	mm ²
ρ_1	0.00398	

Materiali					
<u>Cls :</u>		<u>Acciaio :</u>			
R_{ck}	55.00	MPa	f_{yk}	450.00	MPa
f_{ck}	45.65	MPa	f_{yd}	391.3	MPa
f_{cd}	30.4	MPa	γ_s	1.15	
γ_c	1.50				

Sollecitazioni (SLU)		
N_{sd}	18432.0	kN
σ_{cp}	6.09	MPa

Resistente al taglio per Cls		
V_{Rd}^{min}	839.4	kN
V_{Rd}	844.7	kN

Verifiche di resistenza

V_{Ed}	440.69	kN
----------	---------------	----

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad \text{e} \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Come si evince dai domini sopra riportati, le sollecitazioni incrementate del contributo sismico non comportano una modifica del progetto delle armature e delle relative incidenze previsto per le condizioni statiche.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

10.6.8 *Analisi n. 5 -*

Modello geotecnico

Il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza della sezione di analisi è caratterizzato dalla Formazione TRV costituita prevalentemente da Argilla.

La Figura 1 riassume i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per l'analisi numerica. Per dettagli in merito ai valori assunti si rimanda al capitolo 8

Figura 1 - Sezione geotecnica di calcolo

Stratigrafia di calcolo		C	Superficie piezometrica	γ	c'_k	ϕ'_k	E'	K_0
<i>Formazione</i>	<i>Profondità da p.c.</i>							
[-]	[m da pc]	[m]	[m] da calotta	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
TRV	In tutto il modello	200	100	22	260	16	600	0.72

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 E' = modulo elastico
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Modello geometrico

Per le caratteristiche della mesh si rinvia al Capitolo 10.6.3 – “Modelli Piani”.

Il rivestimento della galleria è stato simulato utilizzando elementi tipo “liner”, aventi modello costitutivo elastico lineare.

Si riportano di seguito le caratteristiche del rivestimento:

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 1 - Definizione delle caratteristiche del rivestimento della galleria

Caratteristiche	Conci dell'anello universale
Spessore dei conci di cls	45 cm
Classe di calcestruzzo utilizzato	C55/67
Modulo elastico	37000 MPa
Inerzia della sezione di cls	7.6E-3 m ²

Fasi e percentuali di rilascio

Al fine di tener conto della natura tridimensionale del problema, nelle analisi svolte in condizioni di deformazione piana lo scavo della galleria è stato simulato con il metodo delle forze di scavo equivalenti. In particolare, l'effetto dell'avanzamento dello scavo viene modellato rilasciando un sistema di forze applicate sul contorno del profilo di scavo). La riduzione delle forze di scavo a partire dalla condizione originaria è definita tramite un fattore di rilascio, funzione della distanza dal fronte ("rilascio forze di scavo").

L'analisi svolta mira a definire la massima sollecitazione possibile agente sui rivestimenti.

Per la descrizione delle fasi di analisi si rinvia al capitolo 10.6.3 – "Modelli Piani"

Analisi e commento dei risultati

Sono di seguito illustrati e commentati i risultati delle fasi di scavo, relative alla sezione di scavo in meccanizzato analizzata. I risultati dell'analisi numerica sono riportati in allegato per la fase di calcolo finale. In particolare, l'allegato illustra le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, le plasticizzazioni al contorno del cavo e la tensione principale massima con le direzioni delle tensioni principali. Per le fasi pertinenti, riporta inoltre le caratteristiche della sollecitazione negli elementi strutturali del modello (liner).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 115 di 124

Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

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

I rivestimenti definitivi delle gallerie di linea sono realizzati con elementi prefabbricati aventi classe di resistenza del calcestruzzo C55/67 e armatura costituita da 14 ϕ 16 sia in intradosso che in estradosso.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, nelle zone significative del rivestimento definitivo della galleria. Le tabelle riportano le sollecitazioni derivanti dall'analisi numerica a metro di galleria, prive di fattori amplificativi, e le sollecitazioni adottate nelle verifiche strutturali: queste ultime risultano moltiplicate per il coefficiente $\gamma_E=1.3$ (allo SLU) e per la lunghezza di due conci consecutivi $2b=3.0$ m.

Considerate le sollecitazioni agenti su due conci adiacenti di due anelli consecutivi consente di condurre verifiche strutturali cautelative, tenendo conto del trasferimento del carico da un anello a quello adiacente. Nelle verifiche, pur considerando le sollecitazioni e l'area di calcestruzzo di due conci consecutivi, si considera in zona tesa e compressa l'armatura di un solo concio; questo metodo consente di tenere in conto della presenza del giunto tra due conci adiacenti e dunque la non perfetta collaborazione delle armature dei suddetti nell'assorbimento delle sollecitazioni.

Le verifiche strutturali del rivestimento definitivo sono state condotte per la fase finale e per entrambe le canne o comunque considerando la massima sollecitazione agente.

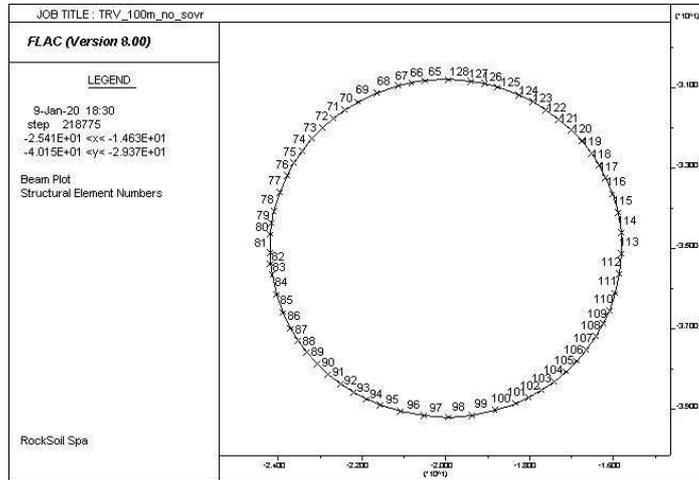


Figura 5 - Elementi liner canna sinistra

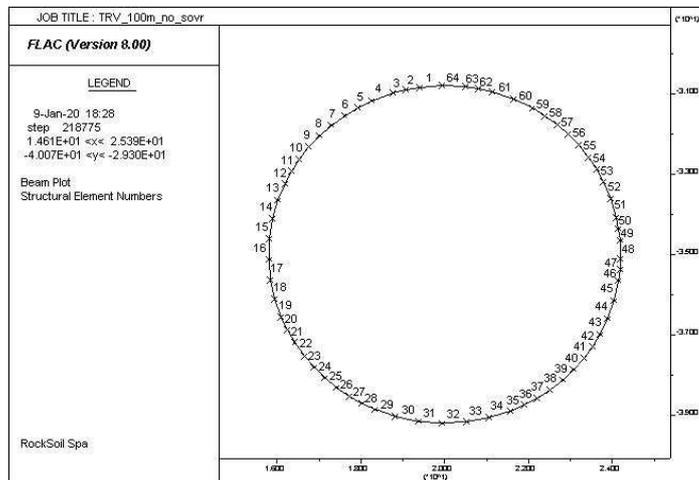


Figura 6 - Elementi liner canna destra

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
	Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B

Tabella 4- Sollecitazioni nel rivestimento della canna sinistra

GALL Sx	ELE	NODO 1	NODO 2	Sollecitazioni da analisi numerica				Sollecitazioni di verifica			
				N	M1	M2	Mmax	N	M1	M2	Mmax
Calotta	128	128	65	6997.00	11.93	-13.10	13.1	27288.30	46.53	-51.09	51.09
pedritto dx	112	112	113	7711.00	-76.09	64.91	76.1	30072.90	-296.75	253.15	296.75
arco rovescio	96	96	97	7478.00	53.27	-64.18	64.2	29164.20	207.75	-250.30	250.30
pedritto sx	81	81	82	7595.00	-117.60	112.20	117.6	29620.50	-458.64	437.58	458.64

Tabella 5 - Sollecitazioni nel rivestimento della canna destra

GALL Dx	ELE	NODO 1	NODO 2	Sollecitazioni da analisi numerica				Sollecitazioni di verifica			
				N	M1	M2	Mmax	N	M1	M2	Mmax
Calotta	1	1	2	6987.00	34.33	-43.29	43.3	27249.30	133.89	-168.83	168.83
pedritto dx	48	48	49	7701.00	-111.60	126.40	126.4	30033.90	-435.24	492.96	492.96
arco rovescio	33	33	34	7455.00	76.56	-73.49	76.6	29074.50	298.58	-286.61	298.58
pedritto sx	18	18	19	8109.00	-96.30	101.70	101.7	31625.10	-375.57	396.63	396.63

Le verifiche sono state condotte considerando una distanza tra il baricentro dell'armatura principale e il lembo più esterno della sezione pari a 7 mm.

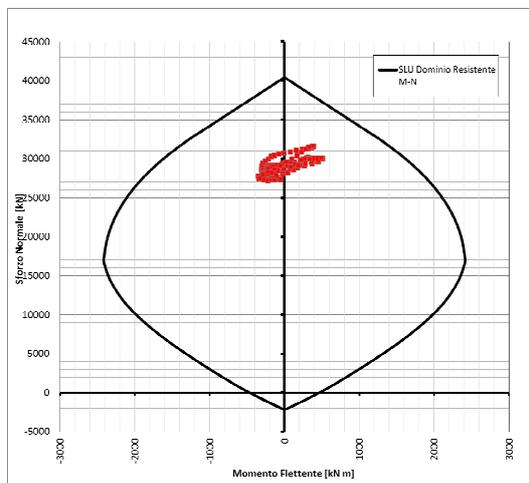


Figura 7 - Dominio resistente SLU (B = 3,00 m, H = 0.45 m) - Classe 1 – C55/67

Per le verifiche a taglio si mostra solo la verifica nel punto di massima sollecitazione

Tabella 5 – Sollecitazione Massima e verifica a taglio SLU

Sollecitazioni da analisi		Sollecitazioni di verifica	
T	N	T	N
[N/m]	[N/m]	[N]	[N]
7.27E+04	7.58E+06	2.84E+05	2.28E+07

Geometria della sezione		
b_w	1500.00	mm
h	450.00	mm
c	63.00	mm
d	387.00	mm
A_c	675000	mm ²
b_w d	580500	mm ²
k	1.72	

Armatura longitudinale		
ø_l	16	mm
A_{ø_l}	201	mm ²
s_l	100.00	mm
n° strati	1	
n° ø/strato	15	
A_{sl,tot}	3016	mm ²
ρ_l	0.00520	

Materiali			
Cls :		Acciaio :	
R_{ck}	67.00 MPa	f_{yk}	450.00 MPa
f_{ck}	55.61 MPa	f_{yd}	391.3 MPa
f_{cd}	37.1 MPa	γ_s	1.15
γ_c	1.50		

Sollecitazioni (SLU)		
N_{Sd}	22752.0	kN
σ_{cp}	7.41	MPa

Resistente al taglio per Cls		
V_{Rd}^{min}	987.1	kN
V_{Rd}	1013.0	kN

Verifiche di resistenza

V_{Ed} 283.65 kN

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad \text{e} \quad V_{Rd} > V_{Rd}^{\min}$$

OK, Sezione non armata verificata

Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40D 07	CL	GN 00001	B	120 di 124

VERIFICHE SEZIONE

VERIFICA TENSIONI AMMISSIBILI (Positive soll. di trazione)

elem	Vo x Cv	Mo x CM	No x CN	d	d'	VERIFICA PRESSO - FLESSIONE				TEST	
						X	σ_{cls}	σ_f	σ'_f		
	kN	kNm	kN	cm	cm	cm	Mpa	Mpa	Mpa	PR./ FL.	
6	0.00	0.0	261.1	21 105.0	38.00	7.00		-17.08	-196.23	-245.16	SI
50	0.00	0.0	392.7	23 109.0	38.00	7.00		-19.67	-204.85	-278.45	SI *
35	0.00	0.0	219.7	22 035.0	38.00	7.00		-17.35	-209.83	-251.01	SI
19	0.00	0.0	305.7	24 324.0	38.00	7.00		-19.73	-225.71	-283.00	SI *
69	0.00	0.0	222.5	21 129.0	38.00	7.00		-16.75	-200.09	-241.80	SI
111	0.00	0.0	246.9	23 178.0	38.00	7.00		-18.40	-219.23	-265.51	SI
97	0.00	0.0	204.8	22 488.0	38.00	7.00		-17.53	-215.97	-254.35	SI
81	0.00	0.0	352.8	22 785.0	38.00	7.00		-19.08	-205.20	-271.32	SI *

Ast. Min = armatura a taglio Min. di regolamento
Ast. Pro. = armatura a taglio di Progetto

X nullo = sezione interamente reagente

SI = tensioni inferiori alle ammissibili
SI * = tensioni inferiori alle Max. in esercizio (0.4 - 0.6 fck)

Gli elementi risultano interamente compressi per cui non ci si attende apertura di fessure, le verifiche agli SLE risultano soddisfatte

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 121 di 124

Azioni di mitigazione dei potenziali rischi

Le azioni di mitigazione dei potenziali rischi individuati nella fase conoscitiva sono state descritte nei paragrafi precedenti e sono di seguito riepilogate:

Rischi potenziali

Sono di seguito descritte le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico, geotecnico e ambientale, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie, e le conseguenti azione di mitigazione previste in progetto. La mappatura dei diversi rischi è illustrata nell'elaborato "Profilo geotecnico" di ogni singola galleria e generale (0). Oltre alle criticità di seguito riportate, che riguardano l'intero Lotto, si rimanda ai paragrafi precedenti in cui si sono descritte le criticità specifiche per le singole tratte delle gallerie di linea e imbocchi.

Presenza di acquiferi produttivi

Corpi idrici produttivi e caratterizzati da permeabilità media relativamente alta sono localizzati all'interno della Formazione di Terravecchia, in particolare nel membro sabbioso-conglomeratico (complesso idrogeologico CSC, $1E-07 < k < 1E-05$).

Presenza di gas

Dati bibliografici integrati con le osservazioni di terreno e misurazioni fatte in sondaggio sia nella presente fase progettuale sia in fase di progettazione preliminare confermano che la potenziale presenza di gas in galleria, metano in particolare, rappresenta un rischio non trascurabile.

Manifestazioni gassose che danno origine a vulcani di fango (le cosiddette "maccalube") sono note nell'area di Caltanissetta, alla cui periferia est si trova un campo di emanazioni gassose attivo. Da dati bibliografici sono considerate suscettibili alla presenza di gas metano la Formazione Terravecchia, il Flysch Numidico e le Argille Variegate. Dati storici riportano anche la presenza di emanazioni superficiali di gas nei pressi di Marianopoli, mentre i rilievi di gas metano effettuati a boccaforo in alcuni sondaggi del PP hanno confermato la presenza di metano nel sottosuolo.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 122 di 124

11 FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO

11.1 Criteri generali per l'applicazione delle sezioni tipo

Nel caso di scavo meccanizzato, la flessibilità in fase di avanzamento, in risposta alle condizioni riscontrate, è garantita dalla variabilità dei parametri operativi di controllo della TBM.

Pertanto, sulla base dei dati macchina raccolti durante l'avanzamento e le risultanze del monitoraggio geotecnico e topografico in superficie e in galleria, i parametri macchina (ad es.: contropressione al fronte) saranno modificati operando all'interno della variabilità prevista in fase progettuale.

In merito ai valori di contropressione al fronte da applicare durante l'avanzamento della TBM, nella presente fase progettuale sono forniti dei range ricavati mediante verifiche di stabilità puntuali lungo il tracciato per sezioni rappresentative. Nella progettazione esecutiva sarà redatto il profilo dettagliato delle pressioni operative da applicare lungo tutte le tratte previste con avanzamento in scavo meccanizzato in modalità chiusa, definendo altresì le relative soglie di attenzione e allarme e le corrispondenti azioni da intraprendere al superamento delle stesse.

11.2 Monitoraggio in corso d'opera

Nella fase realizzativa dovrà essere posto in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare le previsioni progettuali e ad affinare le soluzioni tecniche nell'ambito delle variabilità indicate in progetto.

Con riferimento alla realizzazione della galleria naturale il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

Si riportano di seguito alcuni esempi da valutare se pertinenti con l'opera in progetto

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

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

- il controllo dei principali parametri macchina desunti direttamente in fase di scavo dalla fresa tra cui: pressione di supporto del fronte di scavo, densità del materiale nella camera di scavo, pressione e volume del materiale di intasamento iniettato a tergo dei conci, peso e volume del materiale scavato, condizionamento del terreno;
- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche saldate sui ferri di armatura dei conci e celle di carico tra i giunti longitudinali degli stessi;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 123 di 124

- il monitoraggio degli spostamenti verticali assoluti e relativi dei terreni di copertura nelle tratte a bassa copertura mediante assestimetri;
- il monitoraggio piezometrico per la misura della variazione della quota di falda nelle tratte a bassa copertura;
- il monitoraggio inclinometrico per la misura degli spostamenti orizzontali nelle tratte a bassa copertura.

Il sistema di monitoraggio dovrà essere predisposto in modo tale da garantire l'esame tempestivo e continuativo dei dati rilevati e la trasmissione sistematica dei dati e delle elaborazioni, avendo precedentemente definito ed assegnato le responsabilità per la lettura, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati di monitoraggio, nonché per la loro distribuzione.

Le grandezze individuate come rappresentative dovranno essere rilevate e controllate con un sistema di misura che abbia un grado di precisione compatibile con i valori attesi per le grandezze sopra dette.

Per ulteriori dettagli riguardo le frequenze delle letture e gli altri aspetti legati al monitoraggio delle opere minori si rimanda agli elaborati specialistici allegati al progetto.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI – NUOVA ENNA					
Galleria Salso - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale	COMMESSA RS3U	LOTTO 40D 07	CODIFICA CL	DOCUMENTO GN 00001	REV. B	FOGLIO 124 di 124

12 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione della galleria Salso.

La progettazione delle opere in sotterraneo è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [15]), articolandosi nelle seguenti fasi:

1. Fase conoscitiva (cap. 8): questa fase è stata dedicata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico di inserimento in cui sarà realizzata la galleria, considerati anche i dati relativi alle precedenti fasi progettuali, ed ha portato alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo utilizzato per le successive fasi del progetto.

2. Fase di diagnosi (cap. 9): in questa fase è stata eseguita la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione, per la determinazione delle categorie di comportamento; sulla base delle analisi condotte, lungo il tracciato della galleria il comportamento del fronte allo scavo risulta sia di tipo stabile o stabile a breve termine (categorie A e B) sia di tipo instabile (categoria C).

3. Fase di terapia (cap. 10): si prevede di realizzare lo scavo sia con metodo meccanizzato che con metodo tradizionale. Entrambe le soluzioni progettuali sono state analizzate verificandone adeguatezza ed efficacia in tutte le fasi costruttive previste ed in condizioni di esercizio.

Il progetto è completato dal piano di monitoraggio (cap. 11) da predisporre ed attuare nella fase realizzativa, nel quale sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso e della galleria al procedere dello scavo e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.

ALLEGATO 1

TITOLO	
TIPO DI DOCUMENTO	Documento – Formato A4
CODIFICA	RS3U40D07CLGN0200001B
PAGINE	42
DATA	02-2020
SORGENTE	U.O. Gallerie Italferr S.p.A.
NOTE	-

Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

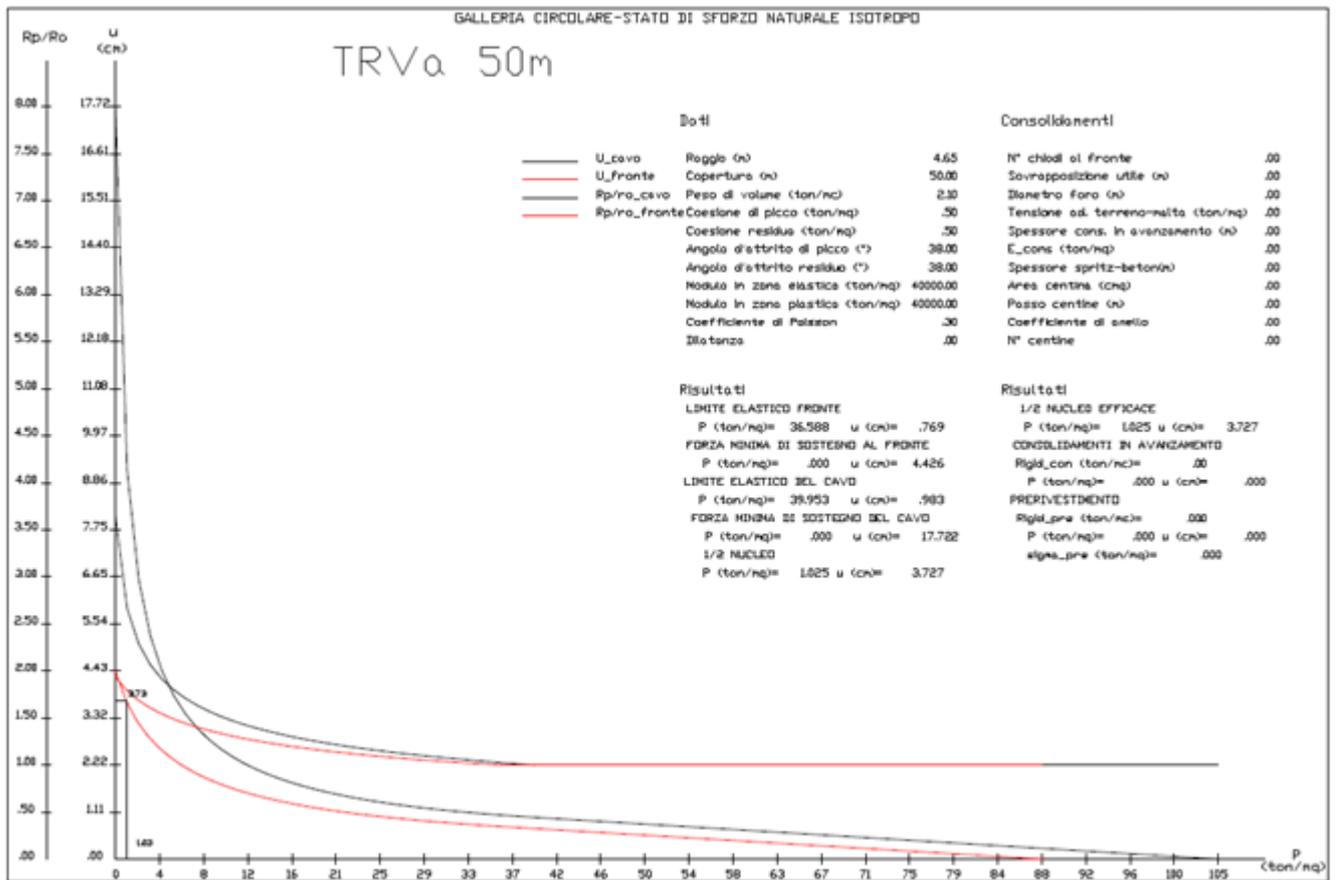


Figura 1: Fase di diagnosi – TRVa – copertura di 50 metri

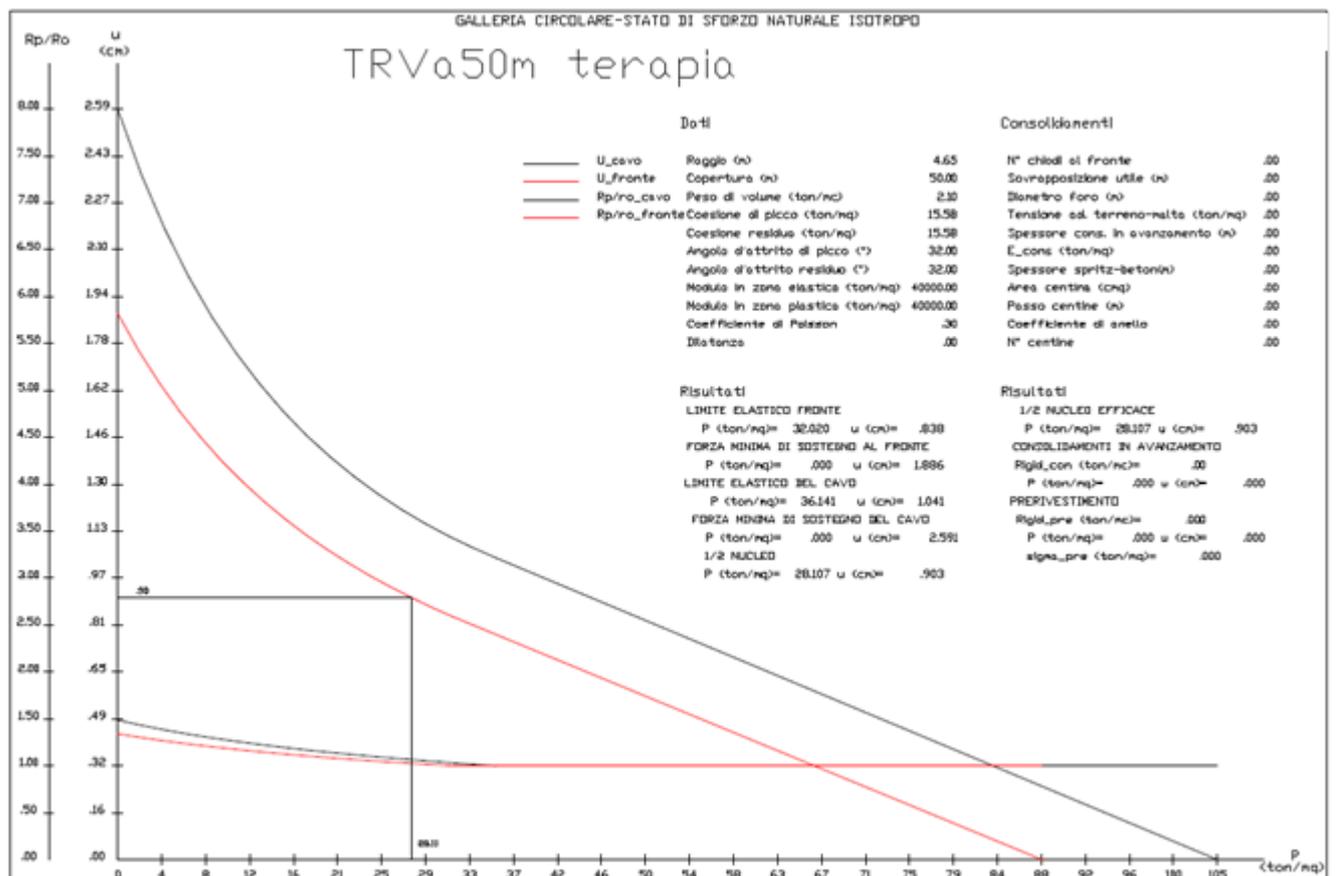


Figura 2: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRVa – copertura di 50 metri

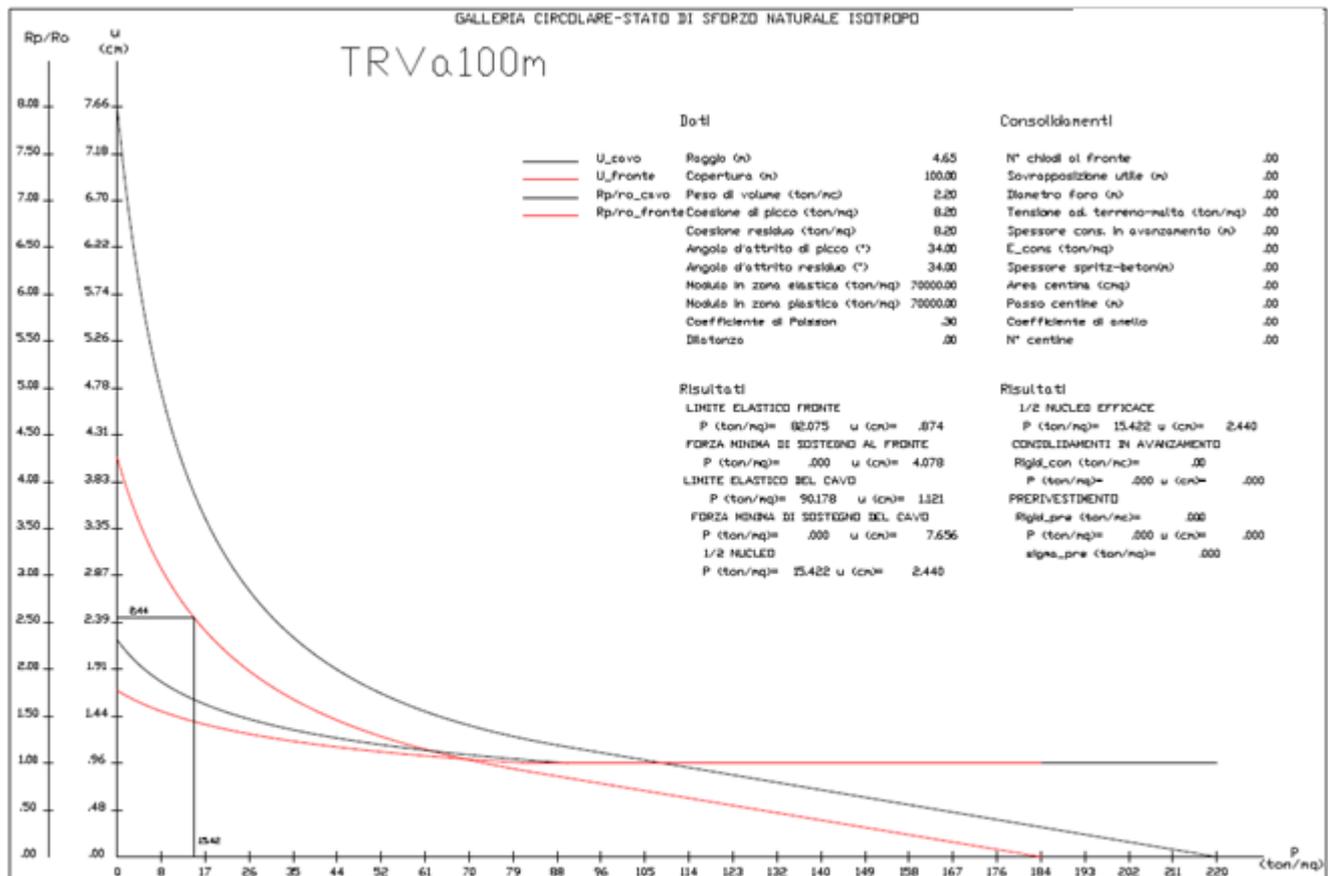


Figura 3: Fase di diagnosi – TRVa – copertura di 100 metri

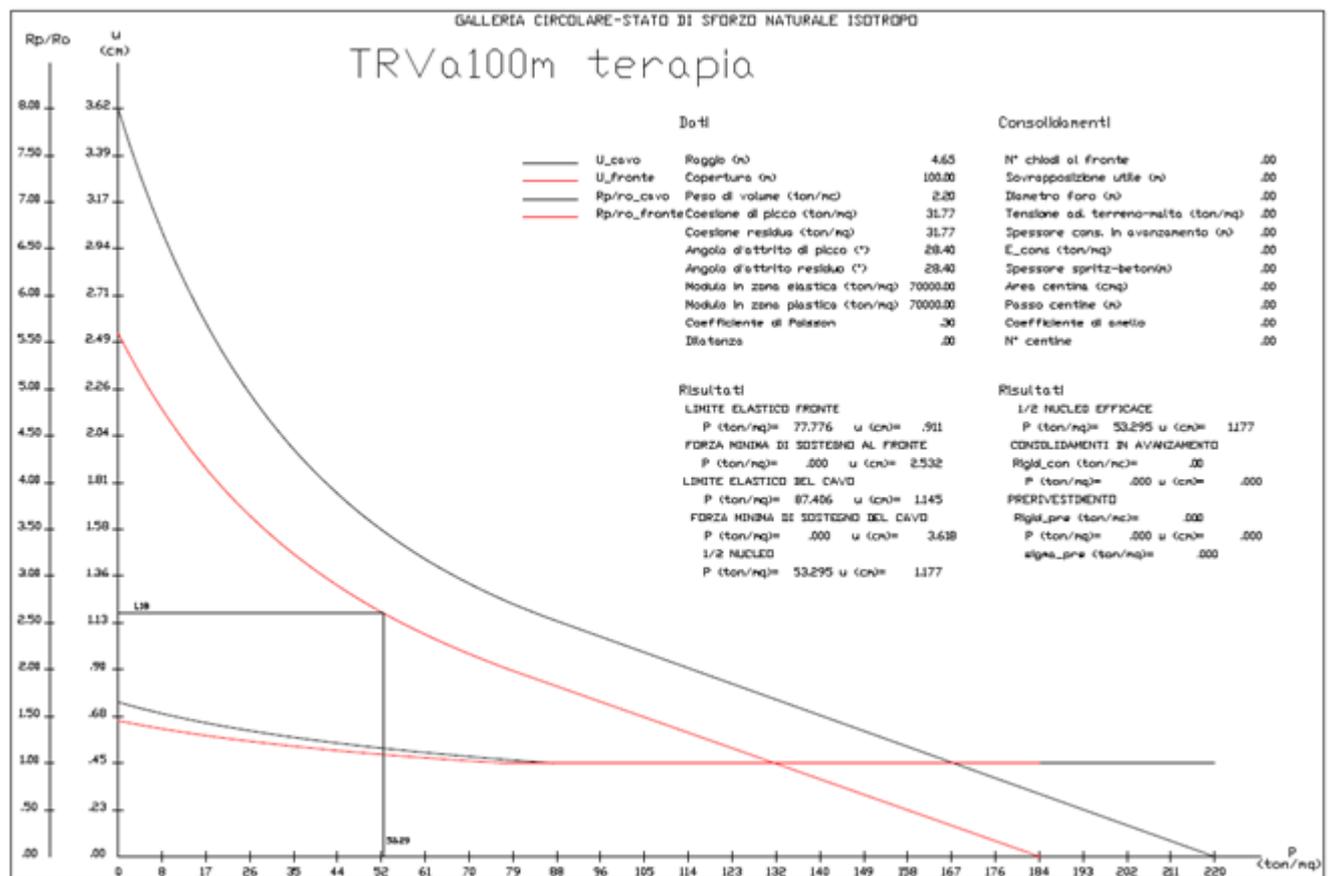


Figura 4: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRVa – copertura di 100 metri

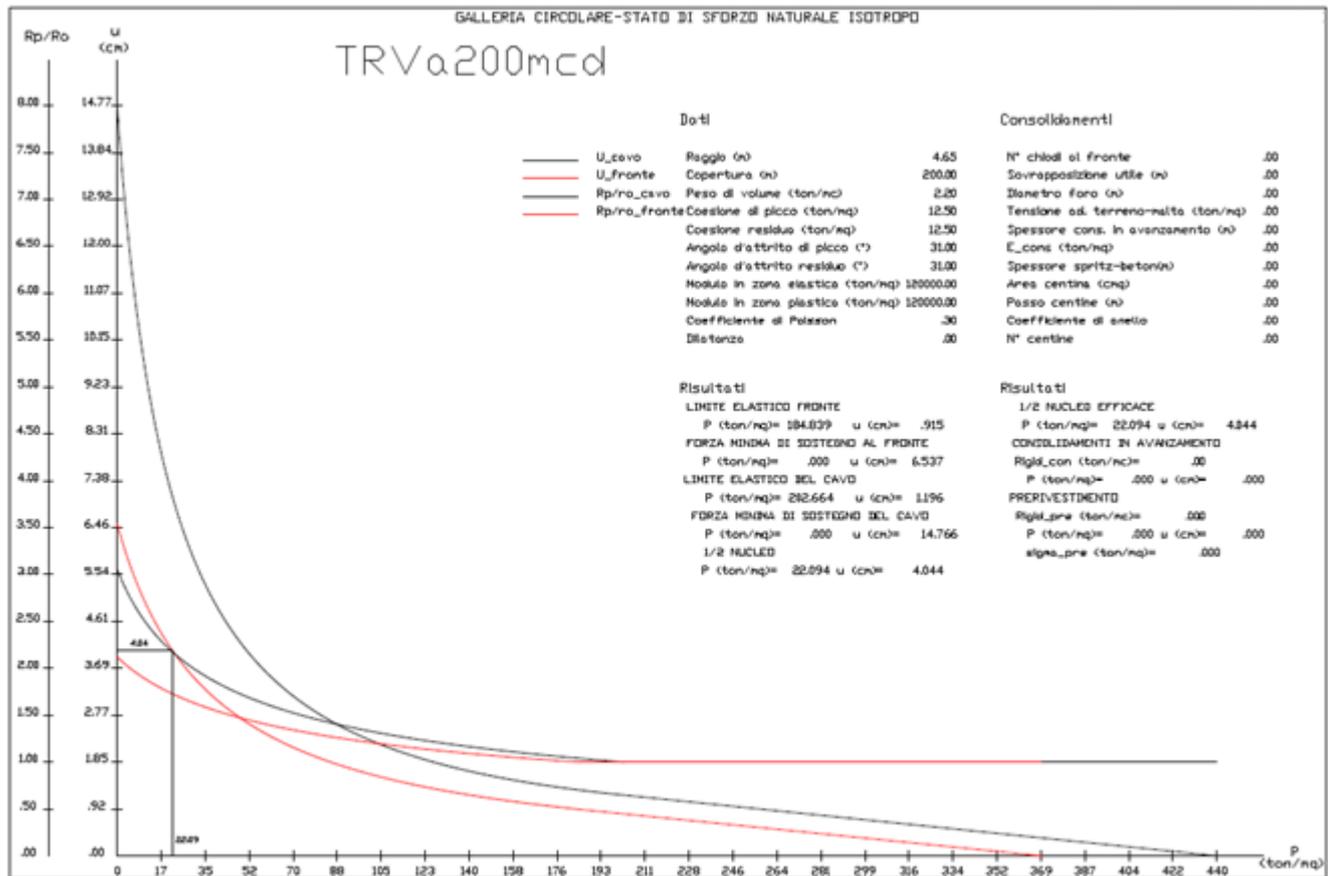


Figura 5: Fase di diagnosi – TRVa – copertura di 200 metri

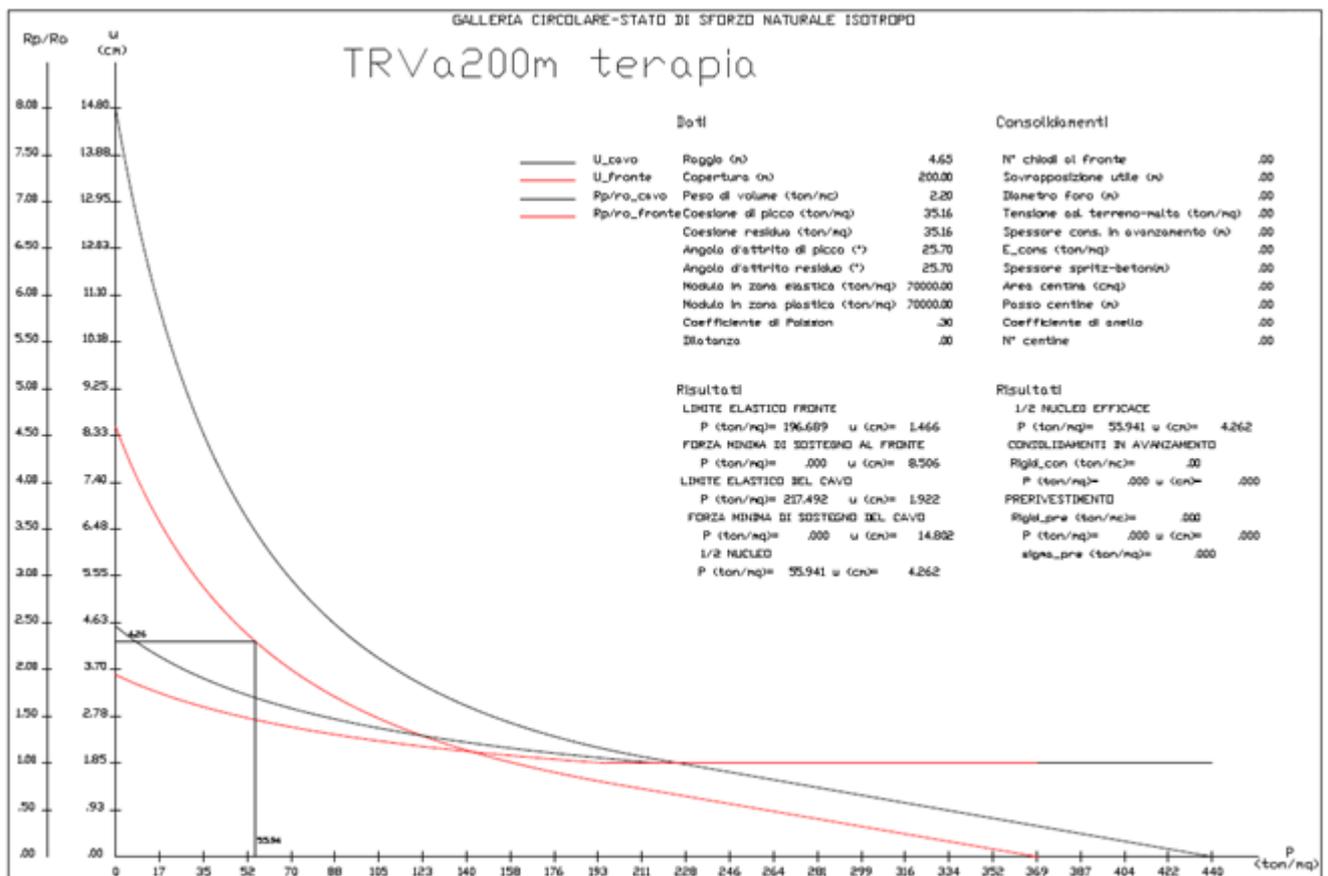


Figura 6: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRVa – copertura di 200 metri

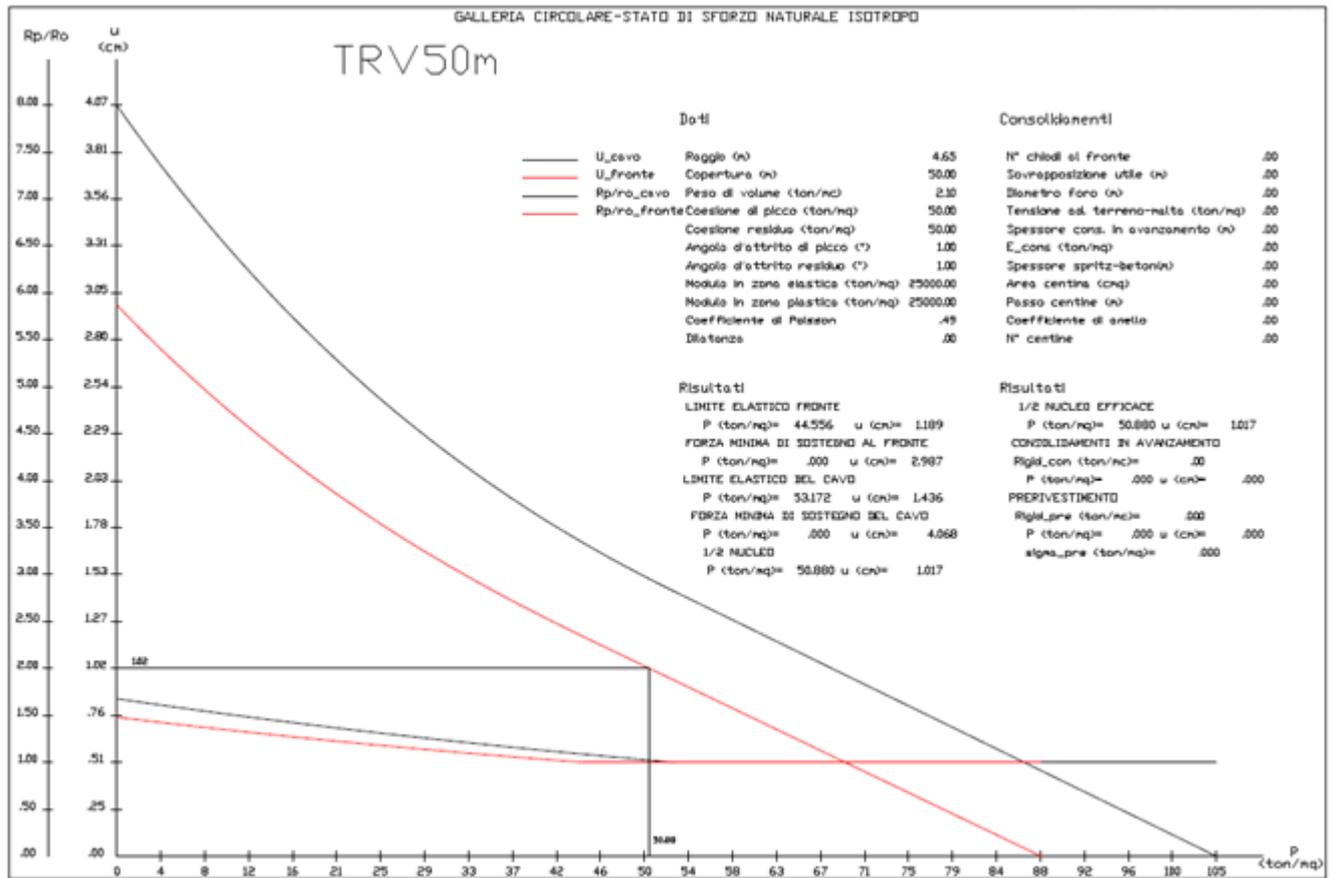


Figura 7: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 50 metri

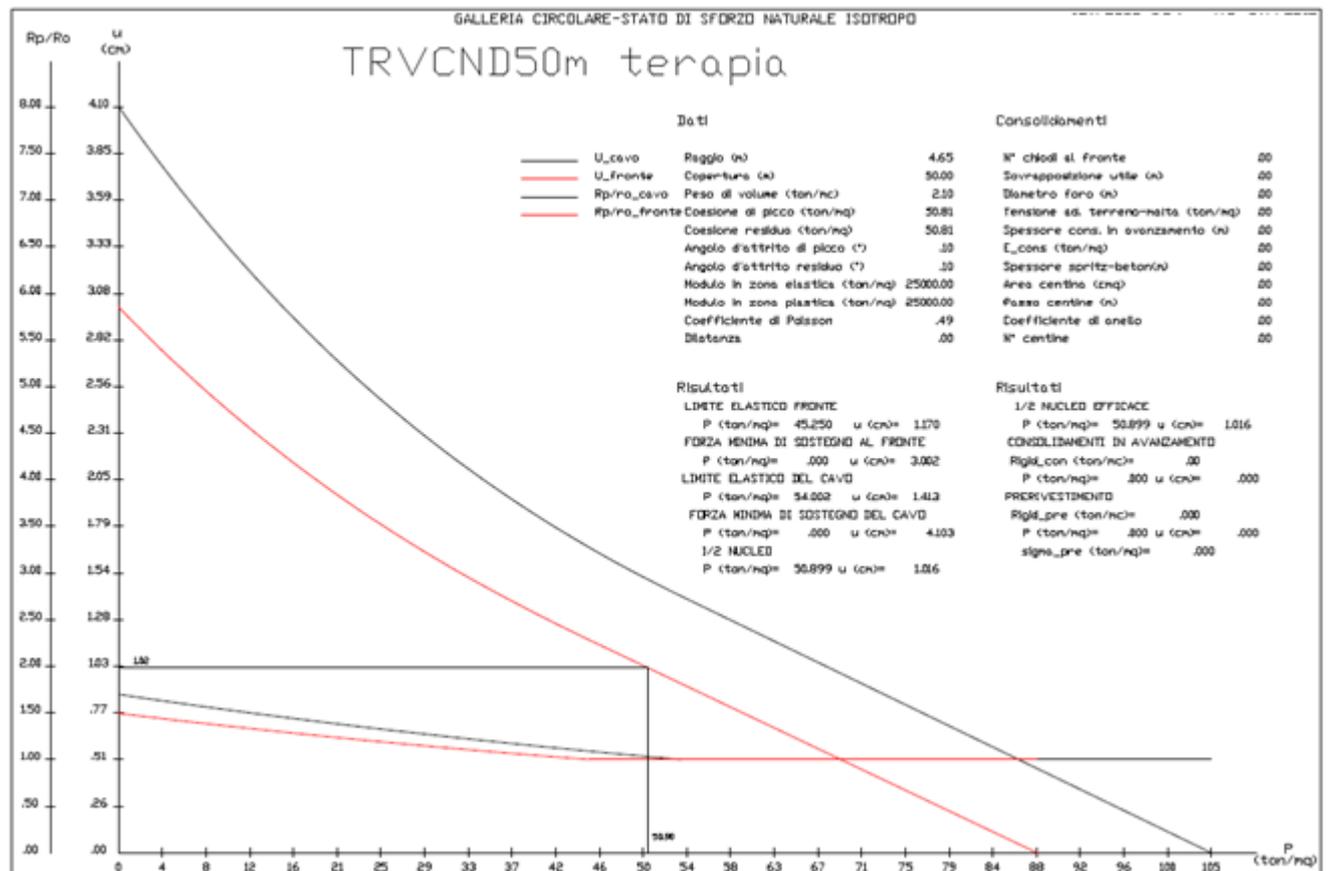


Figura 8: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 50 metri

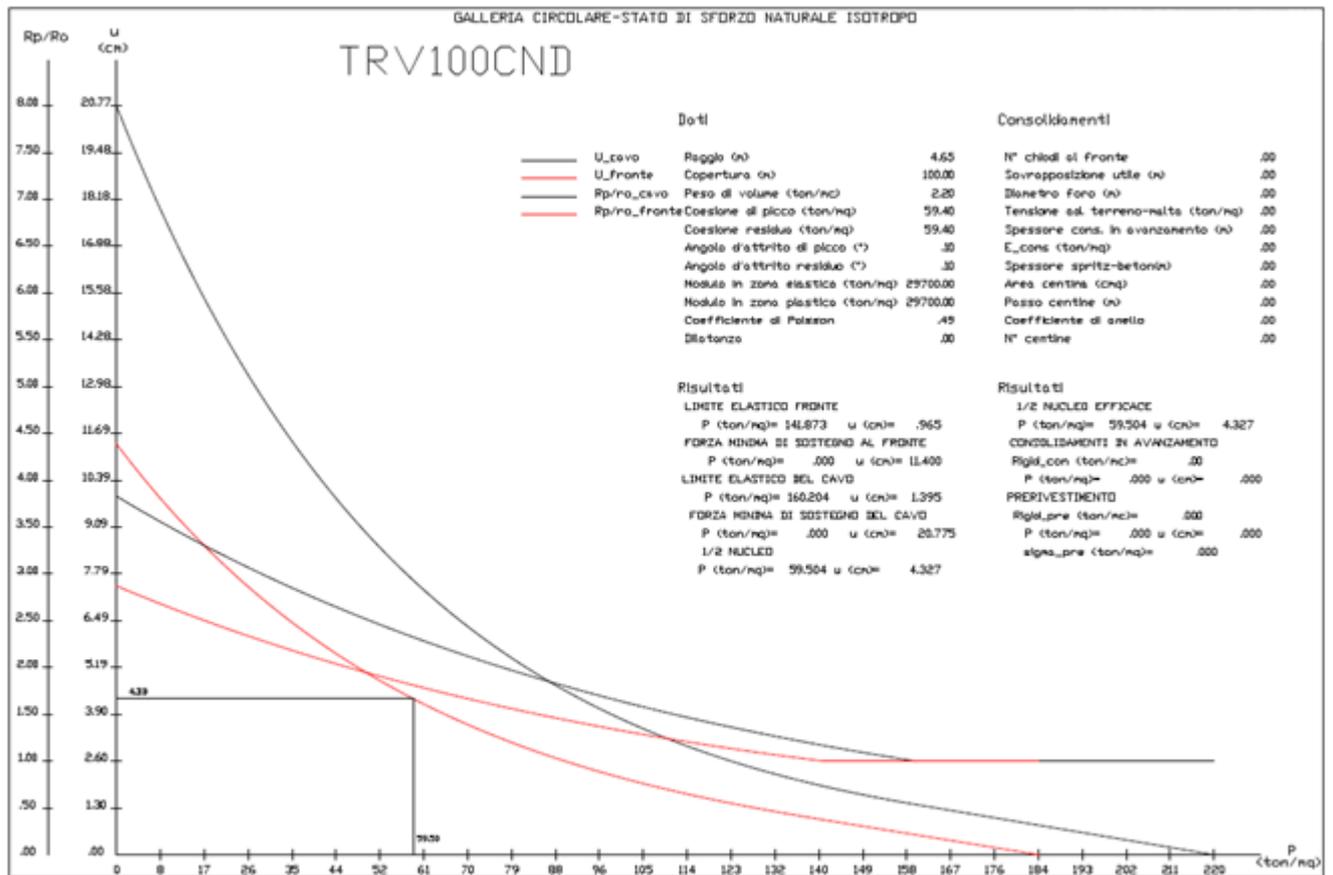


Figura 9: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 100 metri

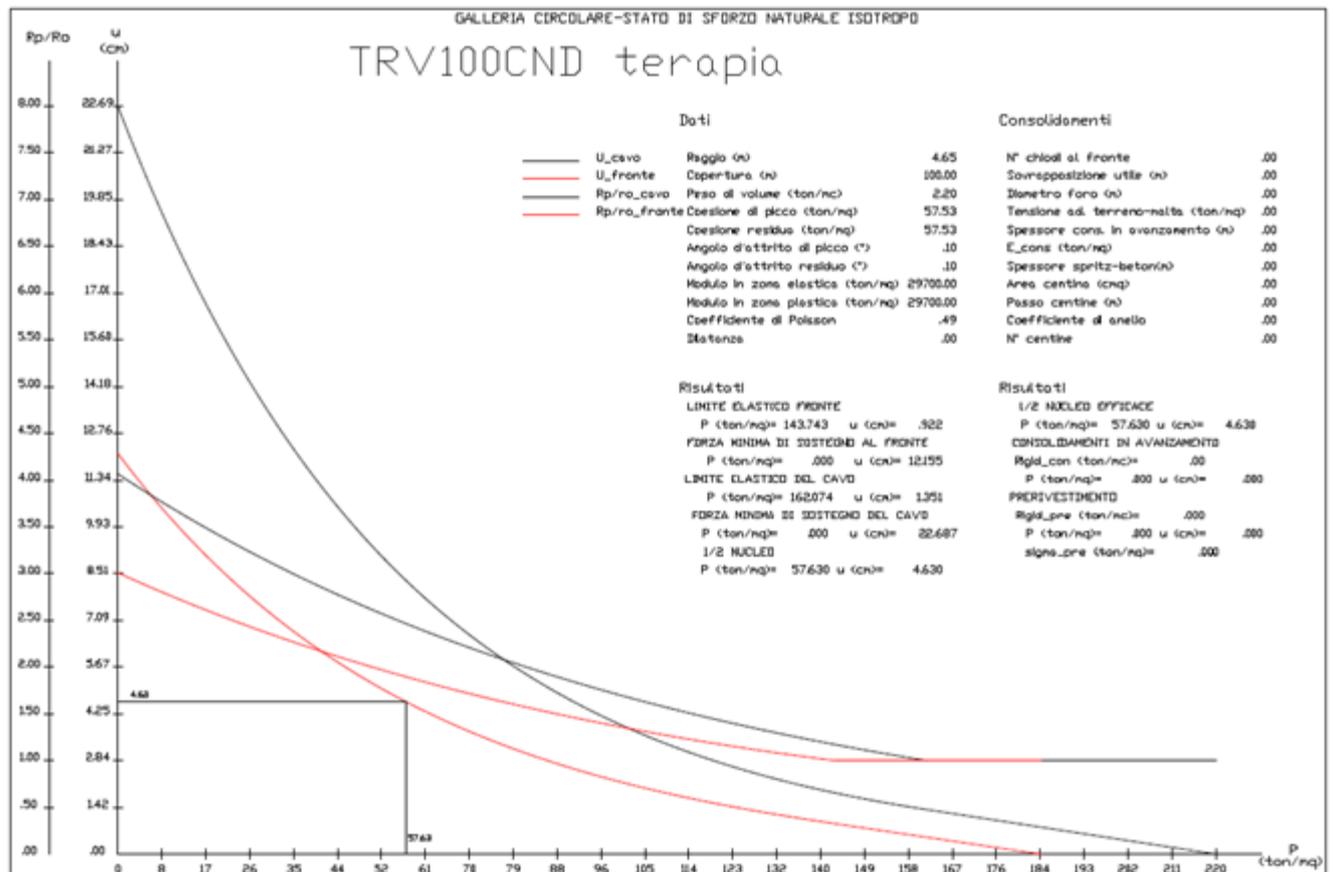


Figura 10: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 100 metri

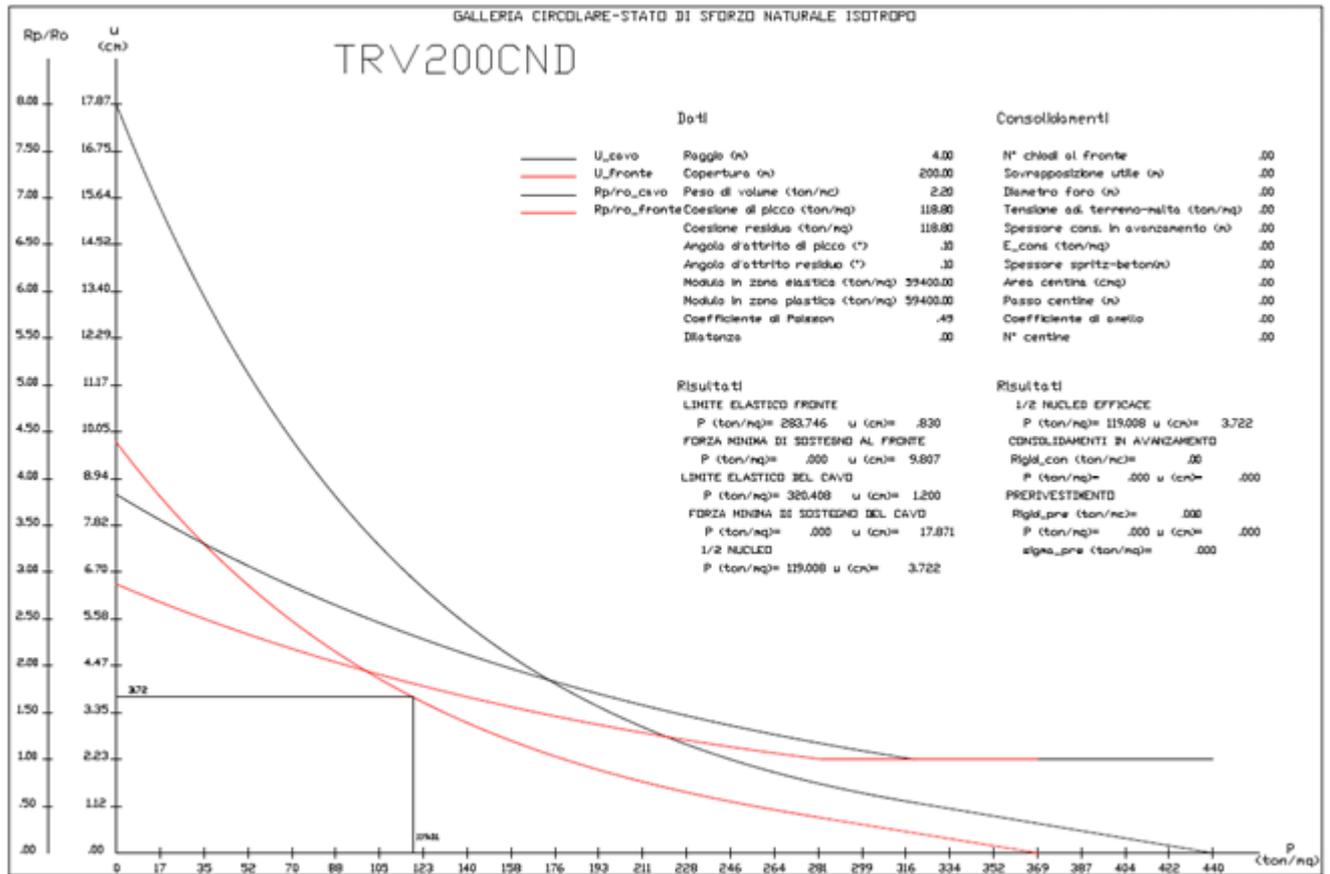


Figura 11: Fase di diagnosi – TRV – copertura di 200 metri

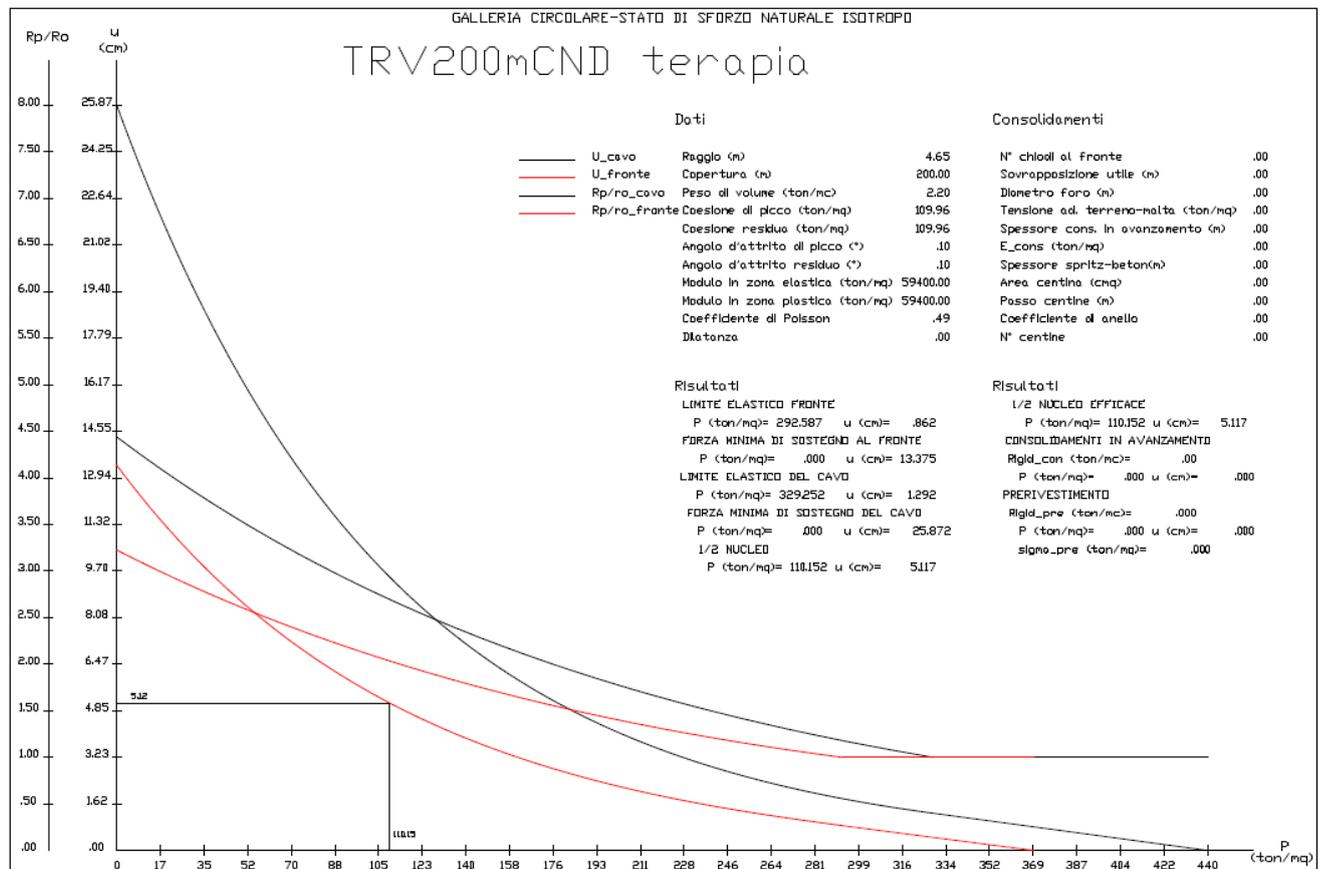


Figura 12: Fase di terapia A2+M2+R2 – TRV – copertura di 200 metri

Analisi con il metodo di stabilità al fronte

FACE STABILITY ANALYSIS



Enrique Tamez Gonzàles - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/c_u [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: from tunnel crown to ground surface</i>				
1	15.0	21.0	5	38.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/c_u [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: invert-crown</i>				
2	9.3	21.0	5	38.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	15.0
Surface load	q_s [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	10.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	4.54

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	11.2
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	c_u [kPa]	5.0
Average friction angle	ϕ'_E [°]	38.0
Coefficient of passive earth pressure	K_p [-]	4.20

Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	20.5
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	5.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_p [°]	38.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	K_f [-]	0.45

Therapy phase Conventional Excavation

Injection grout properties

Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	
Curing factor	γ_c [-]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	
Possion ratio	v_c [-]	
Elastic module	E_c [GPa]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	
Injection penetrability coeff.	α_i [-]	
Design strenght (ULS)	σ_c [-]	
Single bar Shear strenght	T_t [kN]	
Single bar Tensile strenght	T_T [kN]	
Single bar Pull-out strenght	T_F [kN]	
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	σ_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	σ_j [MPa]	
Unit Shear strength	σ_s [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dri} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	
Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	p_a [kPa]	
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	21
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	14
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	7
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	308
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	360

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]	52
pore pressure at tunnel invert	u_i [kPa]	98

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	0
Unit shear strength (prisms 2)	τ_{m2} [kPa]	5.9
Unit shear strength (prism 3)	τ_{m3} [kPa]	5.9

Tunnel-face global stability

($M_{\text{ZTOT}}/M_{\text{SRES}}$)	FS_g	0.22
---------------------------------------	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$k_c/0.3(\gamma H - p_a) =$	0.0	-
-----------------------------	-----	---

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

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

Crown-wedge stability (vertical sliding)

(Shear stresses)	FS_c	-
------------------	--------	---

Crown wedge local stability (against plasticization):

		-
--	--	---

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

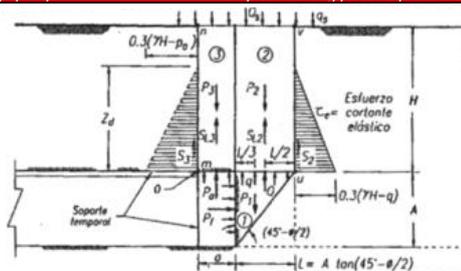


Figura 13: Fase di diagnosi - TRVa - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

FACE STABILITY ANALYSIS

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: from tunnel crown to ground surface</i>				
1	25.0	21.0	5	38.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: invert-crown</i>				
2	9.3	21.0	5	38.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	25.0
Surface load	q_s [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	20.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	4.54

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	11.2
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	20.0
Average cohesion	c_u [kPa]	5.0
Average friction angle	ϕ'_E [°]	38.0
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	4.20

Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	16.8
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	5.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_P [°]	38.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	0.45

**Therapy phase
Conventional Excavation**

Injection grout properties

Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	
Curing factor	γ_c [-]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	
Poisson ratio	ν_c [-]	
Elastic module	E_c [GPa]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	
Injection penetrability coeff.	α_i [-]	
Design strenght (ULS)	α_c [-]	

Single bar Shear strenght	T_s [kN]	
Single bar Tensile strenght	T_T [kN]	
Single bar P pull-out strenght	T_P [kN]	
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	σ_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	σ_j [MPa]	
Unit Shear strength	σ_s [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Overlapping length	L_{lap} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	

Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	p_a [kPa]	
Equivalent pressure acting at face	p_f [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	231
Eff. vertical stress at 1/3 discharge-zone	σ'_{vd} [kPa]	154
Eff. vertical stress at 2/3 discharge-zone	σ'_{vd} [kPa]	77
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	420
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	467

Pore Pressure distribution

pore pressure at discharge-zone top	u_d [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	$u_{d1/3}$ [kPa]	13
pore pressure at 2/3 discharge-zone	$u_{d2/3}$ [kPa]	59
pore pressure at tunnel springline	u_o [kPa]	151
pore pressure at tunnel invert	u_f [kPa]	196

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	0
Unit shear strength (prisms 2)	s_{m2} [kPa]	42.9
Unit shear strength (prism 3)	s_{m3} [kPa]	42.9

Tunnel-face global stability

$(M_{\Sigma F_{\text{res}}}/M_{\Sigma S_{\text{ca}}})$	FS_g	0.75
--	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$k_c c / 0.3(\gamma H - p_o) =$	0.0	-
---------------------------------	-----	---

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) σ_w [kPa]

$z \uparrow$ Vertical dist. from tunnel boundary [m] = 0.01	-
---	---

Crown-wedge stability (vertical sliding)

(Shear stresses plastic field)	FS_c	-
Crown wedge local stability (against plasticization):	-	

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

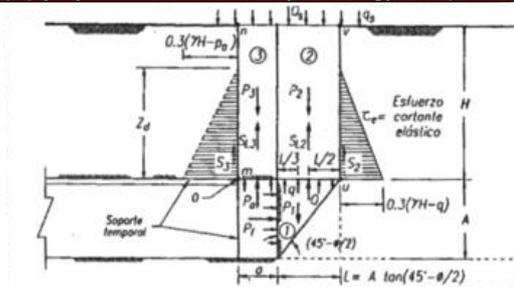


Figura 14: Fase di diagnosi - TRVa - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]	Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface					layers ordering: invert-crown				
1	15.0	21.0	225	0.0	2	9.3	21.0	225	0.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	15.0	Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Surface load	q_s [kPa]	0.0	Free span length	a [m]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	0.00	Failure Mechanism geometry		
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9	Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Tunnel face height	A [m]	9.30	Length of prisms in advance	L_p [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24			

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1		Prisms 2-3			
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0	Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0	Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	cu [kPa]	225.0	Average cohesion within Discharge Zone	cu [kPa]	225.0
Average friction angle	ϕ'_E [°]	0.0	Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_F [°]	0.0
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	1.00	Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	1.00

Therapy phase
Conventional Excavation

Injection grout properties		Face VTR Bars/Bolts properties		
Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	Unit Tensile strength	α_b [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]	
Curing factor	γ_c [-]	Unit Shear strength	α_s [MPa]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
Poisson ratio	ν_c [-]	External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Elastic module	E_c [GPa]	Thickness	th_b [mm]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Injection penetrability coeff.	α_i [-]	Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Design strenght (ULS)	α_c [-]	Joint step	i_{joint} [m]	
Single bar Shear strenght	T_t [kN]	Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
Single bar Tensile strenght	T_T [kN]	N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Single bar Pull-out strenght	T_F [kN]	Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses		Pore Pressure distribution			
Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	21	pore pressure at discharge-zone top	u_d [kPa]	0
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	14	pore pressure at 1/3 discharge-zone	$u_{d1/3}$ [kPa]	0
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	7	pore pressure at 2/3 discharge-zone	$u_{d2/3}$ [kPa]	0
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	315	pore pressure at tunnel springline	u_o [kPa]	0
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	413	pore pressure at tunnel invert	u_f [kPa]	0
Failure Mechanism wedges - Unit strenghts		Tunnel-face global stability			
Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	315	$(M_{\Sigma H} / M_{\Sigma c})$	FS_B	5.39
Unit shear strength (prisms 2)	τ_{m2} [kPa]	225.0	Crown-wedge stability (vertical sliding)		
Unit shear strength (prism 3)	τ_{m3} [kPa]	225.0	(Shear stresses)	FS_c	-
Crown prism stress-field check (lateral boundaries)		Crown wedge local stability (against plasticization):			
$k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$	2.4	-			
Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect)		σ_v [kPa]			
z_t Vertical dist. from tunnel boundary [m] =	0.01	-			

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

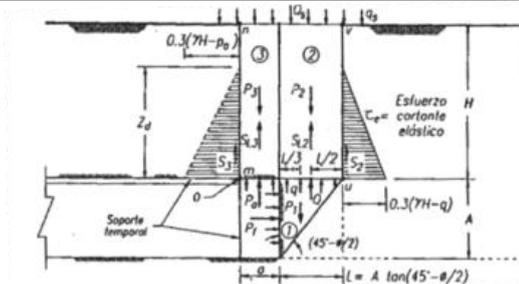


Figura 15: Fase di diagnosi – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
1	25.0	21.0	225	0.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: invert-crown				
2	9.3	21.0	225	0.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	25.0
Surface load	qs [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H _w [m]	0.00
Tunnel full face area	A _{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D _{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z _d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L _p [m]	9.30

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1		
Average buoyant unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	cu [kPa]	225.0
Average friction angle	ϕ'_E [°]	0.0
Coefficient of passive earth pressure	Kp [-]	1.00

Prisms 2-3		
Average buoyant unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	cu [kPa]	225.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_P [°]	0.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	1.00

Therapy phase
Conventional Excavation

Injection grout properties	
Cubic compression resistance	R _{ck} [MPa]
Injection influence ratio	i _i [-]
Curing factor	γ_c [-]
Material partial safety factor	γ_f [-]
Possion ratio	v _c [-]
Elastic module	E _c [GPa]
Grout-soil bond	τ_a [kPa]
Injection penetrability coeff.	α_i [-]
Design strenght (ULS)	α_r [-]

Single bar Shear strenght	T _r [kN]
Single bar Tensile strenght	T _t [kN]
Single bar Pull-out strenght	T _f [kN]
Max. resistance offered by bars	T _{max} [kN]

Face VTR Bars/Bolts properties	
Unit Tensile strength	α_b [MPa]
Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]
Unit Shear strength	α_s [MPa]
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]
External diameter	ϕ_{ext} [mm]
Thickness	th _b [mm]
Single bar Cross sectional area	A _b [mm ²]
Overlapping length	L _{LAP} [m]
Joint step	i _{joint} [m]

Number of bars installed at tunnel face	N _b [-]	
N° of bars for unit of area	n _b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses		
Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	231
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	154
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	77
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	525
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	623

Pore Pressure distribution		
pore pressure at discharge-zone top	u _d [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	u _{d1/3} [kPa]	0
pore pressure at 2/3 discharge-zone	u _{d2/3} [kPa]	0
pore pressure at tunnel springline	u _o [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	u _r [kPa]	0

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts		
Face wedge unit strenght (prism 1)	q [kPa]	510
Unit shear strenght (prisms 2)	s _{m2} [kPa]	225.0
Unit shear strenght (prism 3)	s _{m3} [kPa]	225.0

Tunnel-face global stability (MΣFR/MΣFA)	FS _g	3.47
--	-----------------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)	
$k_c/0.3(\gamma H-p_0) =$	1.4
Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) σ_{v0} [kPa]	
z: Vertical dist. from tunnel boundary [m] =	0.01

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear at stresses)	FS _c	-
Crown wedge local stability (against plasticization):		
		-

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

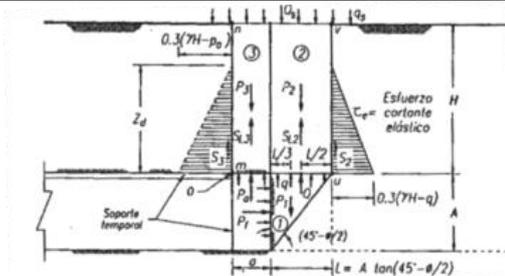


Figura 16: Fase di diagnosi – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

FACE STABILITY ANALYSIS

Enrique Tamez Gonzáles - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: from tunnel crown to ground surface</i>				
1	15.0	21.0	4	32.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
<i>layers ordering: invert-crown</i>				
2	9.3	21.0	4	32.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	15.0
Surface load	q_s [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	10.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m^2]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	5.16

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

<i>Prisms 1</i>		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	11.2
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	c_u [kPa]	4.0
Average friction angle	ϕ'_E [°]	32.0
Coefficient of passive earth pressure	K_p [-]	3.25

<i>Prisms 2-3</i>		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	20.5
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	4.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_P [°]	32.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	K_f [-]	0.56

Therapy phase

Conventional Excavation

<i>Injection grout properties</i>		
Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	
Curing factor	γ_c [-]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	
Possion ratio	v_c [-]	
Elastic module	E_c [GPa]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	
Injection penetrability coeff.	α_i [-]	
Design strenght. (ULS)	α_c [-]	
Single bar Shear strenght	T_s [kN]	
Single bar Tensile strenght	T_T [kN]	
Single bar Pull-out strenght	T_P [kN]	
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	

<i>Face VTR Bars/Bolts properties</i>		
Unit Tensile strength	α_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]	
Unit Shear strength	α_s [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm^2]	
Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	
Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m^{-2}]	
Applied pressure at tunnel boundary	p_a [kPa]	300
Equivalent pressure acting at face	p_f [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

<i>Failure Mechanism wedges - Effective stresses</i>		
Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	21
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	114
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	207
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	308
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	360

<i>Pore Pressure distribution</i>		
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]	52
pore pressure at tunnel invert	u_r [kPa]	98

<i>Failure Mechanism wedges - Unit strenghts</i>		
Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	0
Unit shear strength (prisms 2)	s_{m2} [kPa]	41.0
Unit shear strength (prism 3)	s_{m3} [kPa]	58.5

Tunnel-face global stability ($M_{CIP}/M_{S_{\phi}}$)	FS_g	1.00
--	--------	------

<i>Crown prism stress-field check (lateral boundaries)</i>		
$k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$	0.9	-
<i>Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect) ϕ_{vs} [kPa]</i>		
$z \uparrow$ Vertical dist. from tunnel boundary [m] =	0.01	-

<i>Crown-wedge stability (vertical sliding)</i> (Shear stresses plasticized)		
FS_c	-	-
<i>Crown wedge local stability (against plasticization):</i>		
		-

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

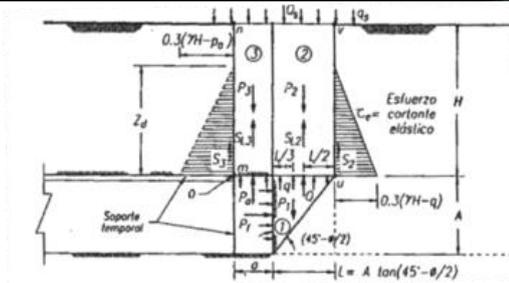


Figura 17: Fase di terapia - TRVa - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
1	25.0	21.0	4	32.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: invert-crown				
2	9.3	21.0	4	32.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	25.0
Surface load	qs [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	20.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	5.16

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	11.2
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	20.0
Average cohesion	c_u [kPa]	4.0
Average friction angle	ϕ'_e [°]	32.0
Co-efficient of passive earth pressure	Kp [-]	3.25

Prisms 2-3

Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	16.8
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	4.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_p [°]	32.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	0.56

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	
Curing factor	γ_c [-]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	
Possion ratio	ν_c [-]	
Elastic module	E_c [GPa]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	
Injection penetrability co. eff.	α_i [-]	
Design strenght (ULS)	α_c [-]	
Single bar Shear strenght	T_r [kN]	
Single bar Tensile strenght	T_t [kN]	
Single bar Pull-out strenght	T_f [kN]	
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	α_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]	
Unit Shear strength	α_t [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	
Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	300
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	231
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	254
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	277
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	420
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	467

Pore Pressure distribution

pore pressure at discharge-zone top	u_d [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	$u_{d1/3}$ [kPa]	13
pore pressure at 2/3 discharge-zone	$u_{d2/3}$ [kPa]	59
pore pressure at tunnel springline	u_o [kPa]	151
pore pressure at tunnel invert	u_r [kPa]	196

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	0
Unit shear strength (prisms 2)	s_{m2} [kPa]	77.8
Unit shear strength (prism 3)	s_{m3} [kPa]	95.4

Tunnel-face global stability ($M\Sigma_{\text{ext}}/M\Sigma_{\text{int}}$)	FS_g	1.20
---	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$	0.1
---------------------------------	-----

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect, 6_v [kPa])

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

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses plastic field)	FS_c	-
--	--------	---

Crown wedge local stability (against plasticization): -

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

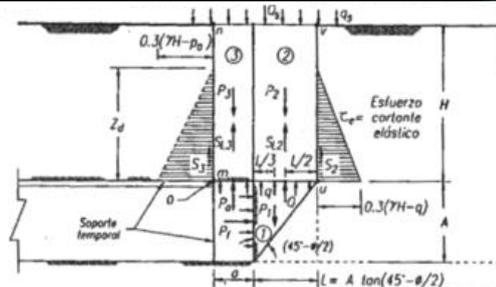


Figura 18: Fase di terapia - TRVa - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
1	15.0	21.0	161	0.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/Cu [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: invert-crown				
2	9.3	21.0	161	0.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	15.0
Surface load	qs [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	0.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	9.30

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	c_u [kPa]	161.0
Average friction angle	ϕ'_e [°]	0.0
Co efficient of passive earth pressure	Kp [-]	1.00

Prisms 2-3		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	161.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_p [°]	0.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	Kf [-]	1.00

Therapy phase
Conventional Excavation

Injection grout properties	
Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]
Injection influence ratio	i_i [-]
Curing factor	γ_c [-]
Material partial safety factor	γ_f [-]
Possion ratio	ν_c [-]
Elastic module	E_c [GPa]
Grout-soil bond	τ_a [kPa]
Injection penetrability co. eff.	α_i [-]
Design strenght (ULS)	α_c [-]
Single bar Shear strenght	T_r [kN]
Single bar Tensile strenght	T_t [kN]
Single bar Pull-out strenght	T_f [kN]
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]

Face VTR Bars/Bolts properties		
Unit Tensile strength	α_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]	
Unit Shear strength	α_s [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	
Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	pa [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	pf [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses		
Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	21
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	14
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	7
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	315
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	413

Pore Pressure distribution		
pore pressure at discharge-zone top	u_d [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	$u_{d1/3}$ [kPa]	0
pore pressure at 2/3 discharge-zone	$u_{d2/3}$ [kPa]	0
pore pressure at tunnel springline	u_o [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	u_r [kPa]	0

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts		
Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	315
Unit shear strength (prisms 2)	s_{m2} [kPa]	161.0
Unit shear strength (prism 3)	s_{m3} [kPa]	161.0

Tunnel-face global stability ($M\Sigma_{\tau}/M\Sigma_{\sigma}$)	FS_g	3.86
---	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)	$k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$	1.7
Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect, σ_v [kPa])		
zt Vertical dist. from tunnel boundary [m] =	0.01	-

Crown-wedge stability (vertical sliding) (Shear stresses plastic field)	FS_c	-
Crown wedge local stability (against plasticization):		-

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

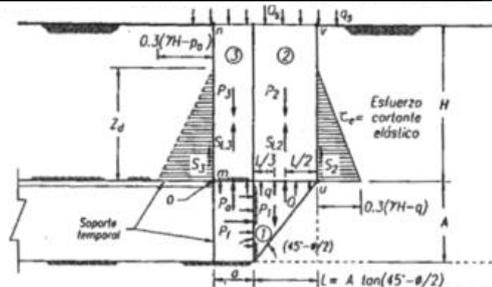


Figura 19: Fase di terapia – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 15 metri di copertura

Enrique Tamez Gonzales - Diseño Geotécnico de Túneles (1997)

Stratigraphy and geotechnical properties

Overburden layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/c_u [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: from tunnel crown to ground surface				
1	25.0	21.0	161	0.0

Tunnel Face layers	ΔH [m]	γ_n [kNm^{-3}]	c'/c_u [kPa]	ϕ' [°]
layers ordering: invert-crown				
2	9.3	21.0	161	0.0

Excavation cross section and Failure Mechanism geometry

Total Overburden	H [m]	25.0
Surface load	q_s [kPa]	0.0
water table level above tunnel invert	H_w [m]	0.00
Tunnel full face area	A_{EXCAV} [m ²]	67.9
Tunnel face height	A [m]	9.30
Tunnel face width	D [m]	8.24

Equivalent tunnel diameter	D_{eq} [m]	9.30
Free span length	a [m]	0.0

Failure Mechanism geometry

Discharge zone height	Z_d [m]	14.01
Length of prisms in advance	L_p [m]	9.30

Failure Mechanism Prisms - Average geotechnical properties

Prisms 1		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion	c_u [kPa]	161.0
Average friction angle	ϕ'_e [°]	0.0
Co-efficient of passive earth pressure	K_p [-]	1.00

Prisms 2-3		
Average buoyant unit weight	γ_b [kNm^{-3}]	21.0
Average saturated unit weight	γ_n [kNm^{-3}]	21.0
Average cohesion within Discharge Zone	c_u [kPa]	161.0
Average friction angle within Discharge Zone	ϕ'_p [°]	0.0
Friction Coefficient within Discharge Zone	K_f [-]	1.00

Therapy phase

Conventional Excavation

Injection grout properties

Cubic compression resistance	R_{ck} [MPa]	
Injection influence ratio	i_i [-]	
Curing factor	γ_c [-]	
Material partial safety factor	γ_f [-]	
Possion ratio	ν_c [-]	
Elastic module	E_c [GPa]	
Grout-soil bond	τ_a [kPa]	
Injection penetrability co. eff.	α_i [-]	
Design strenght (ULS)	α_c [-]	
Single bar Shear strenght	T_r [kN]	
Single bar Tensile strenght	T_t [kN]	
Single bar Pull-out strenght	T_f [kN]	
Max. resistance offered by bars	T_{max} [kN]	

Face VTR Bars/Bolts properties

Unit Tensile strength	α_b [MPa]	
Unit Tensile strength at joint	α_j [MPa]	
Unit Shear strength	α_t [MPa]	
Drilling diameter	ϕ_{dril} [mm]	
External diameter	ϕ_{ext} [mm]	
Thickness	th_b [mm]	
Single bar Cross sectional area	A_b [mm ²]	
Overlapping length	L_{LAP} [m]	
Joint step	i_{joint} [m]	
Number of bars installed at tunnel face	N_b [-]	
N° of bars for unit of area	n_b [m ⁻²]	
Applied pressure at tunnel boundary	p_a [kPa]	0
Equivalent pressure acting at face	p_f [kPa]	0

Prismatic volumes shear resistance and Safety factors

Failure Mechanism wedges - Effective stresses

Eff. vert. stress at discharge-zone top	σ'_{vd} [kPa]	231
Eff. vertical stress at 1/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	154
Eff. vertical stress at 2/3 discharge zone	σ'_{vd} [kPa]	77
Undist. eff. vertical stress at crown	σ'_v [kPa]	525
Undist. eff. vert. stress at tunnel springline	σ'_{v0} [kPa]	623

Pore Pressure distribution

pore pressure at discharge-zone top	u_d [kPa]	0
pore pressure at 1/3 discharge-zone	$u_{d1/3}$ [kPa]	0
pore pressure at 2/3 discharge-zone	$u_{d2/3}$ [kPa]	0
pore pressure at tunnel springline	u_o [kPa]	0
pore pressure at tunnel invert	u_r [kPa]	0

Failure Mechanism wedges - Unit strenghts

Face wedge unit strength (prism 1)	q [kPa]	337
Unit shear strength (prisms 2)	s_{m2} [kPa]	161.0
Unit shear strength (prism 3)	s_{m3} [kPa]	161.0

Tunnel-face global stability

($M\Sigma_{\text{res}}/M\Sigma_{\text{sa}}$)	FS_g	2.49
--	--------	------

Crown prism stress-field check (lateral boundaries)

$k_i c / 0.3(\gamma H - p_a) =$	1.0
---------------------------------	-----

Crown prism vertical-stress field (Terzaghi's arching effect, 6_v [kPa])

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

Crown-wedge stability (vertical sliding)

(Shear stresses plastic field)	FS_c	-
--------------------------------	--------	---

Crown wedge local stability (against plasticization):

		-
--	--	---

Simplified failure mechanism at tunnel face - Acting forces equilibrium

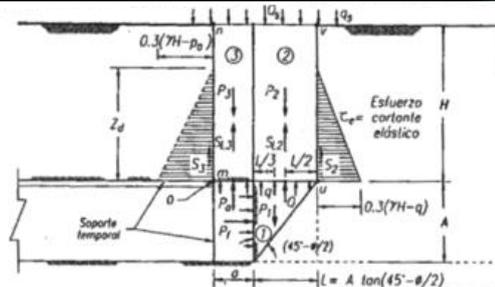


Figura 20: Fase di terapia – TRV - analisi di stabilità al fronte con metodo di Tamez a 25 metri di copertura

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.45 m - Analisi n°6

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

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

Fase	Descrizione	Rilascio forze di scavo
0	Creazione della geometria del modello	-
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche	-
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb)	-
SCAVO CANNA DESTRA		
3	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu)	varie
4	Installazione dell'anello universale	1.0
SCAVO CANNA SINISTRA		
5	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra)	varie
6	Installazione dell'anello universale	1.0
LUNGO TERMINE		
7	Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati	1.0

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

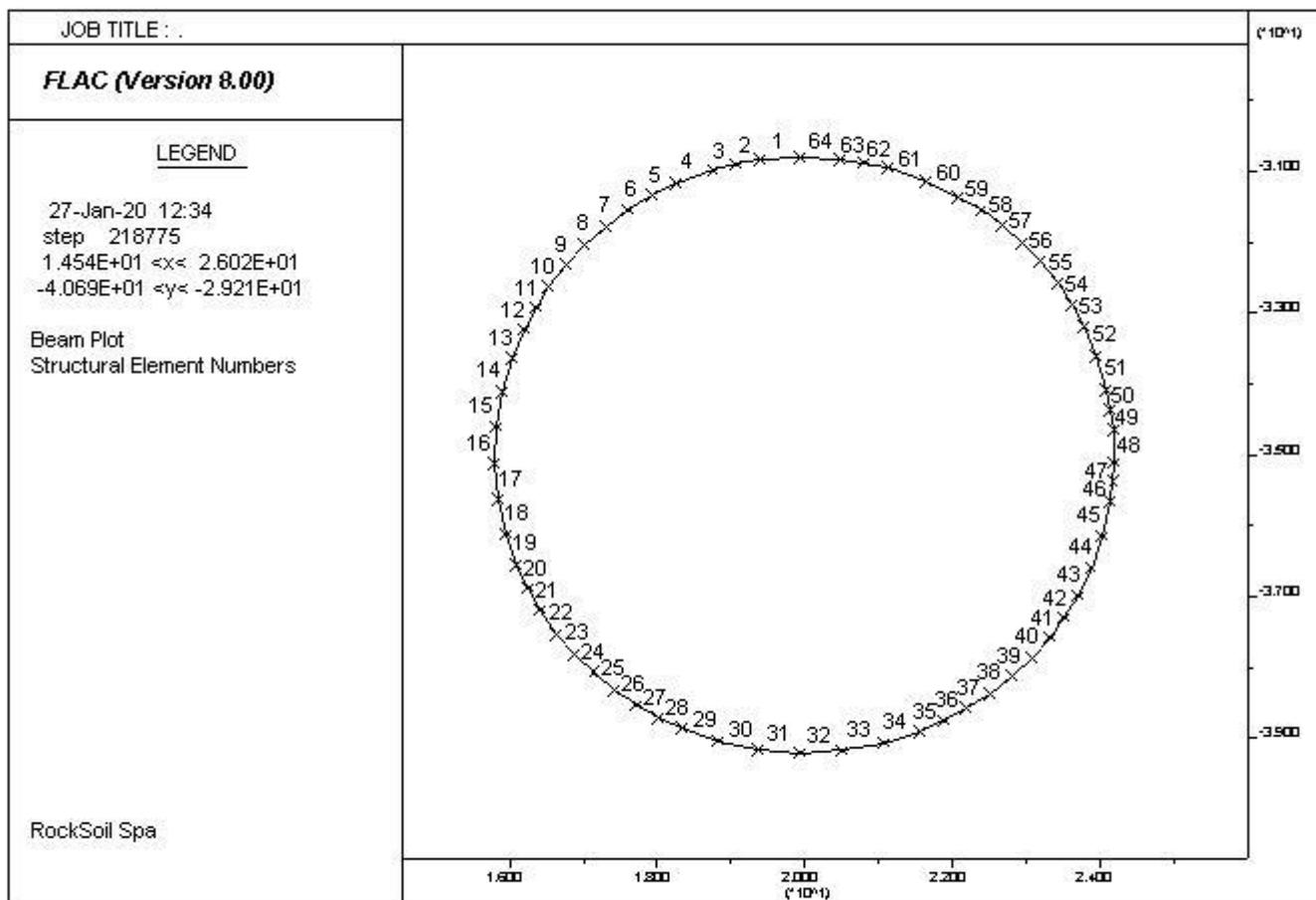


Figura 21 - Numerazione elementi beam canna Destra

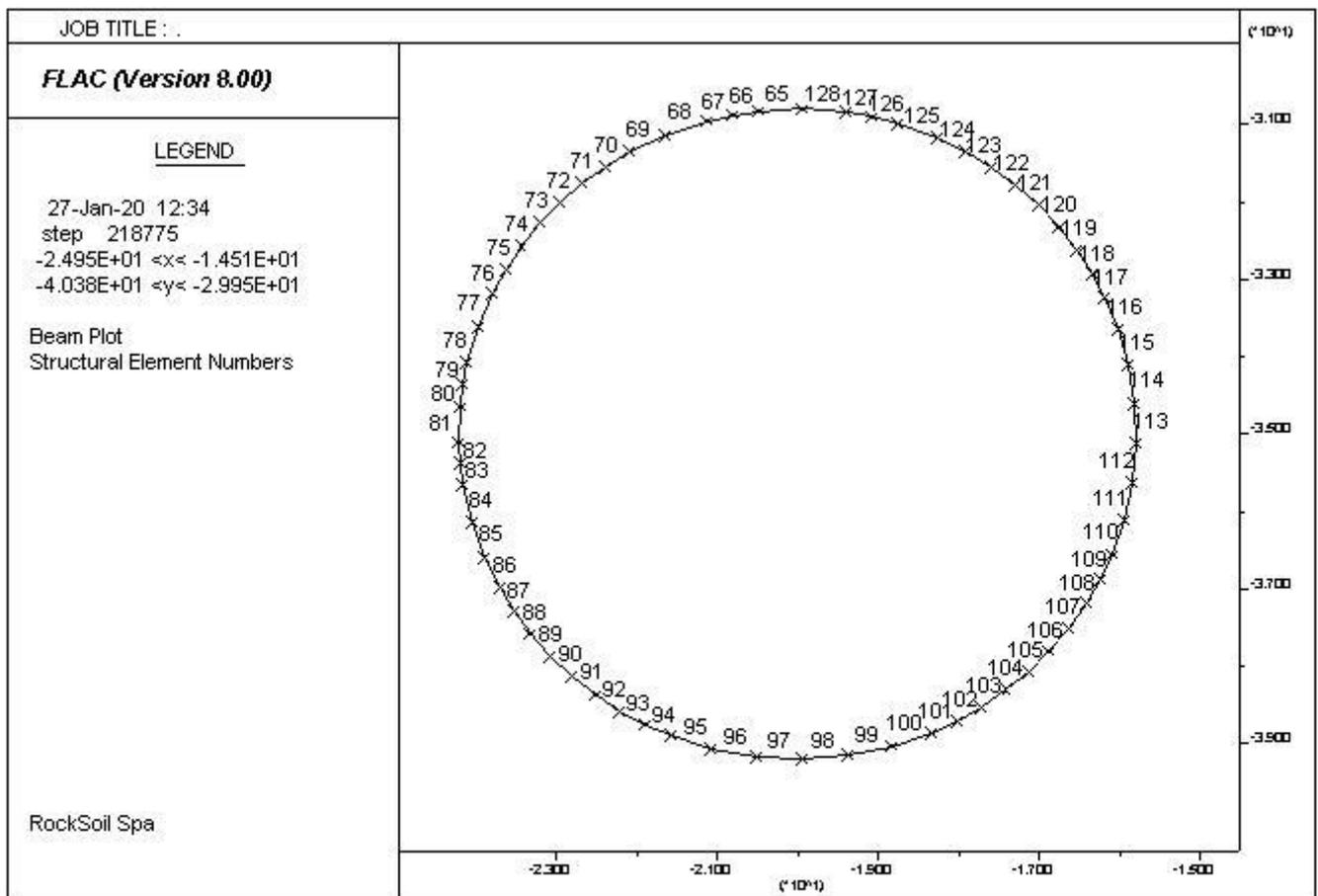


Figura 22 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

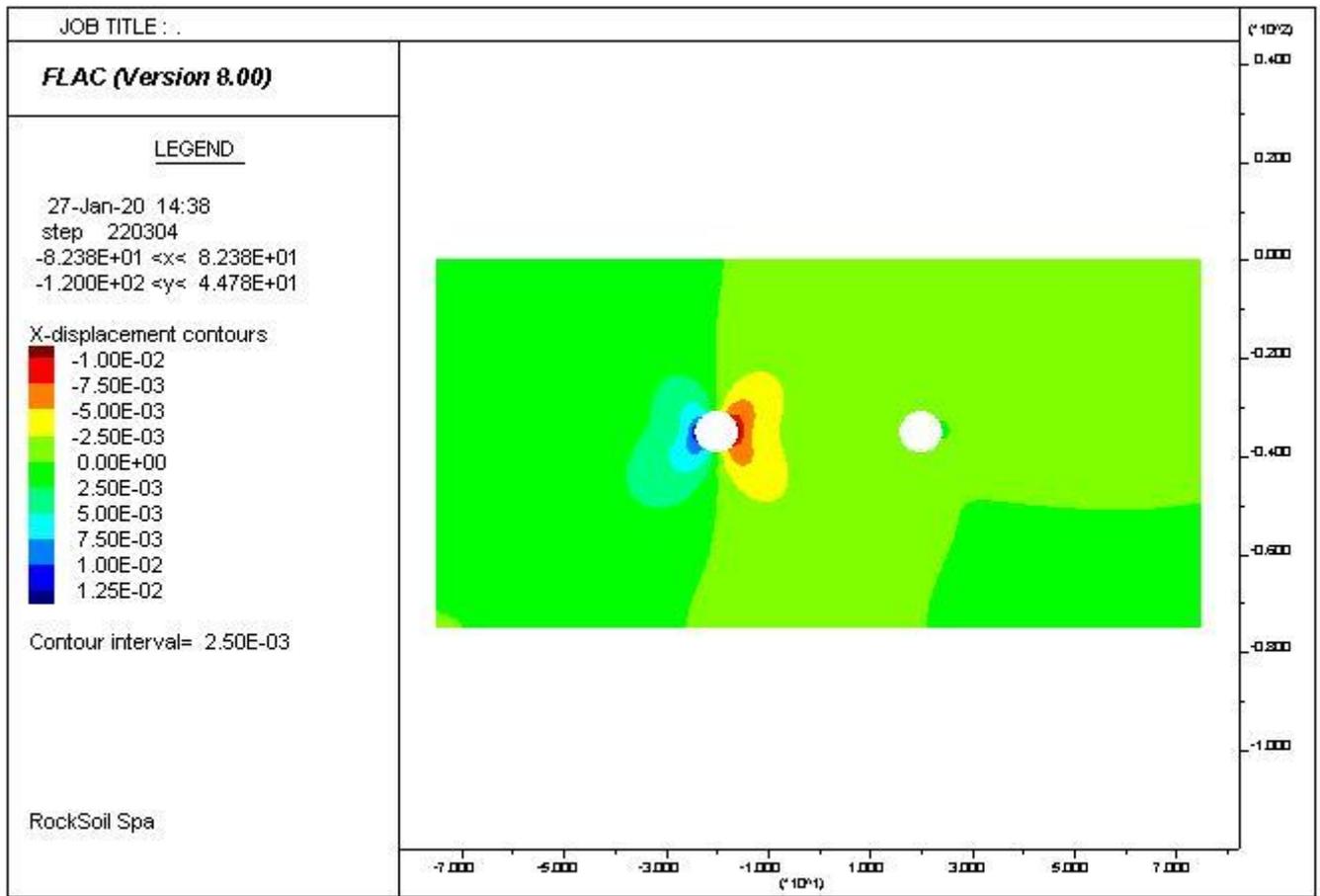


Figura 23 - Spostamenti x

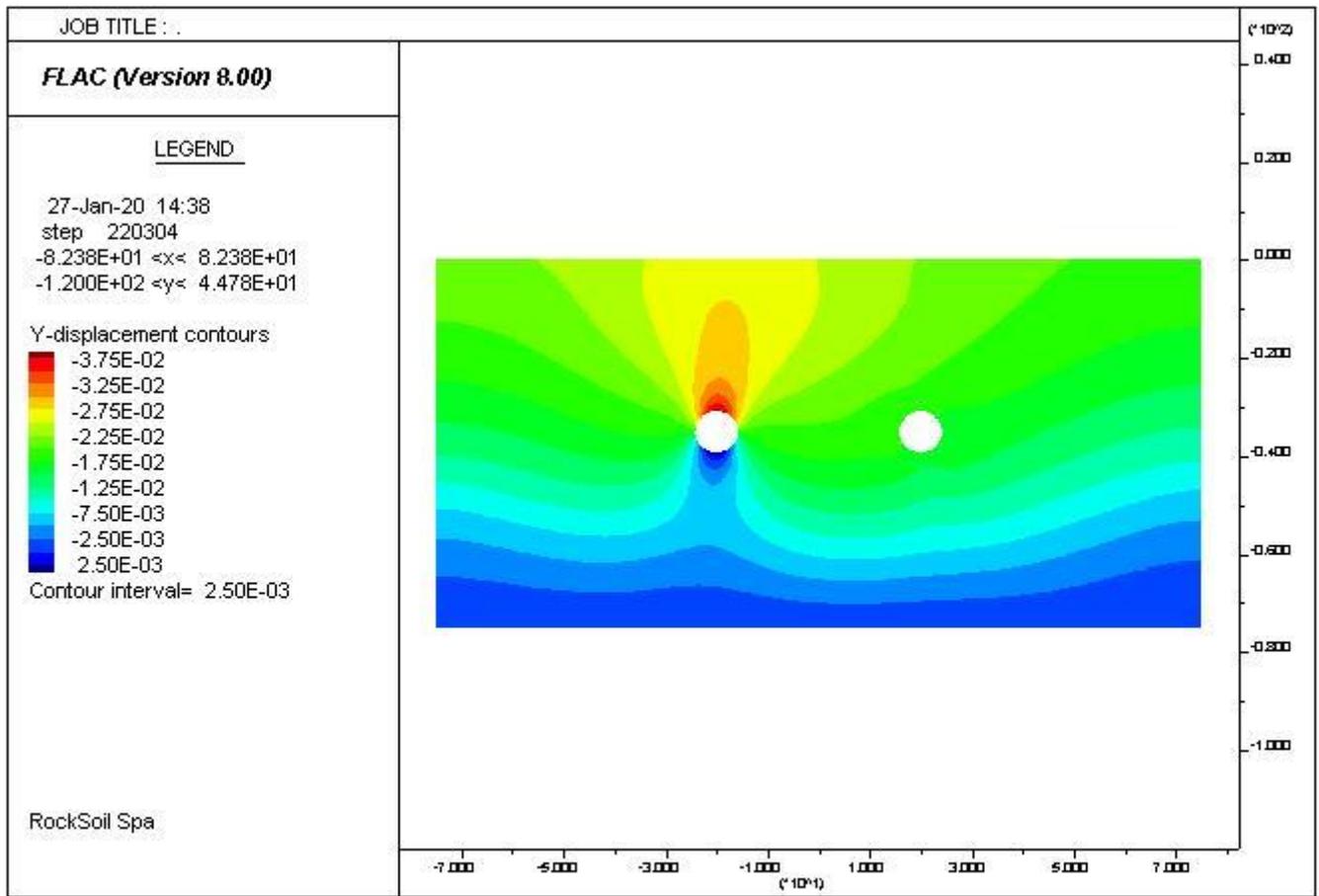


Figura 24 - Spostamenti y

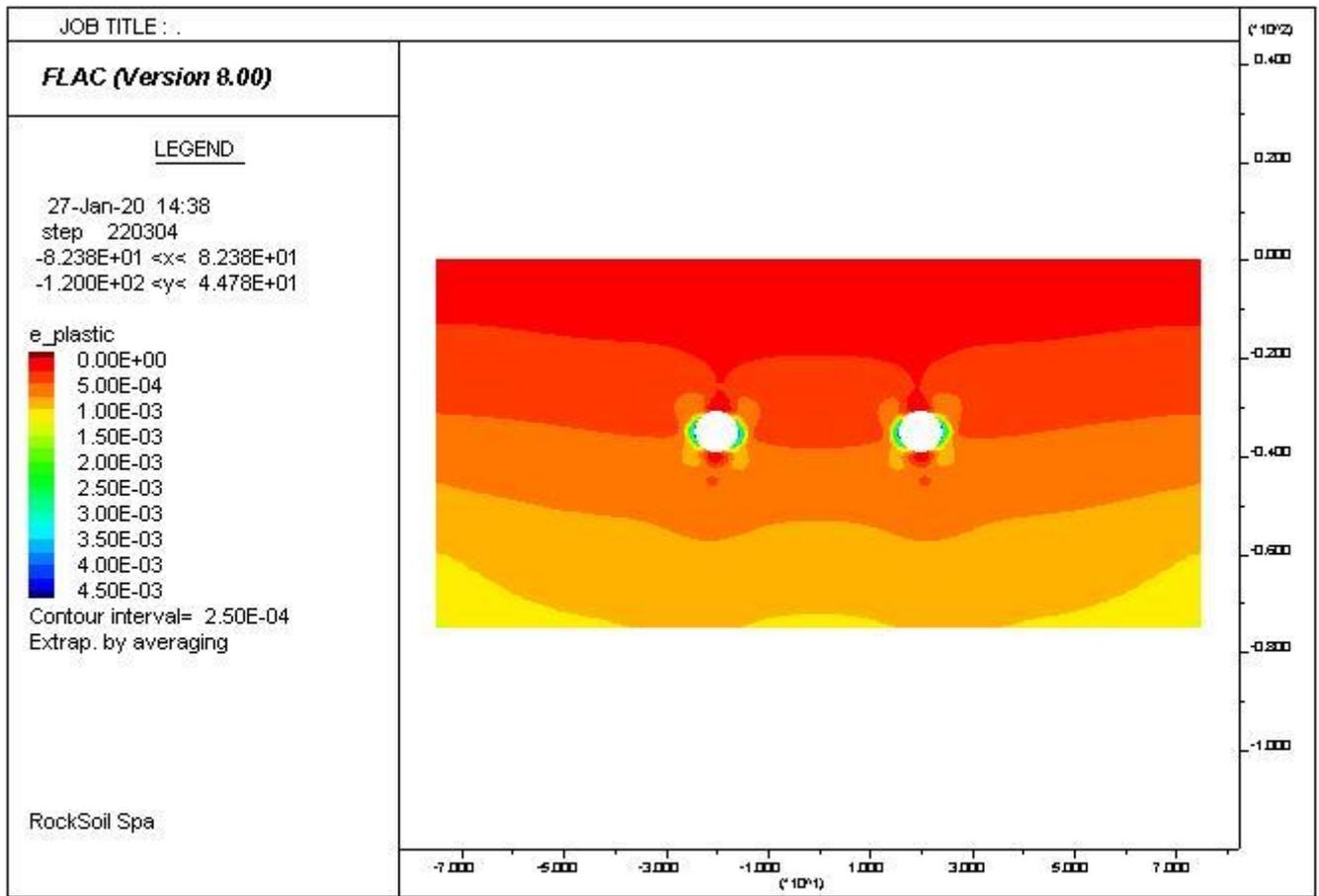


Figura 25 – Plasticizzazioni

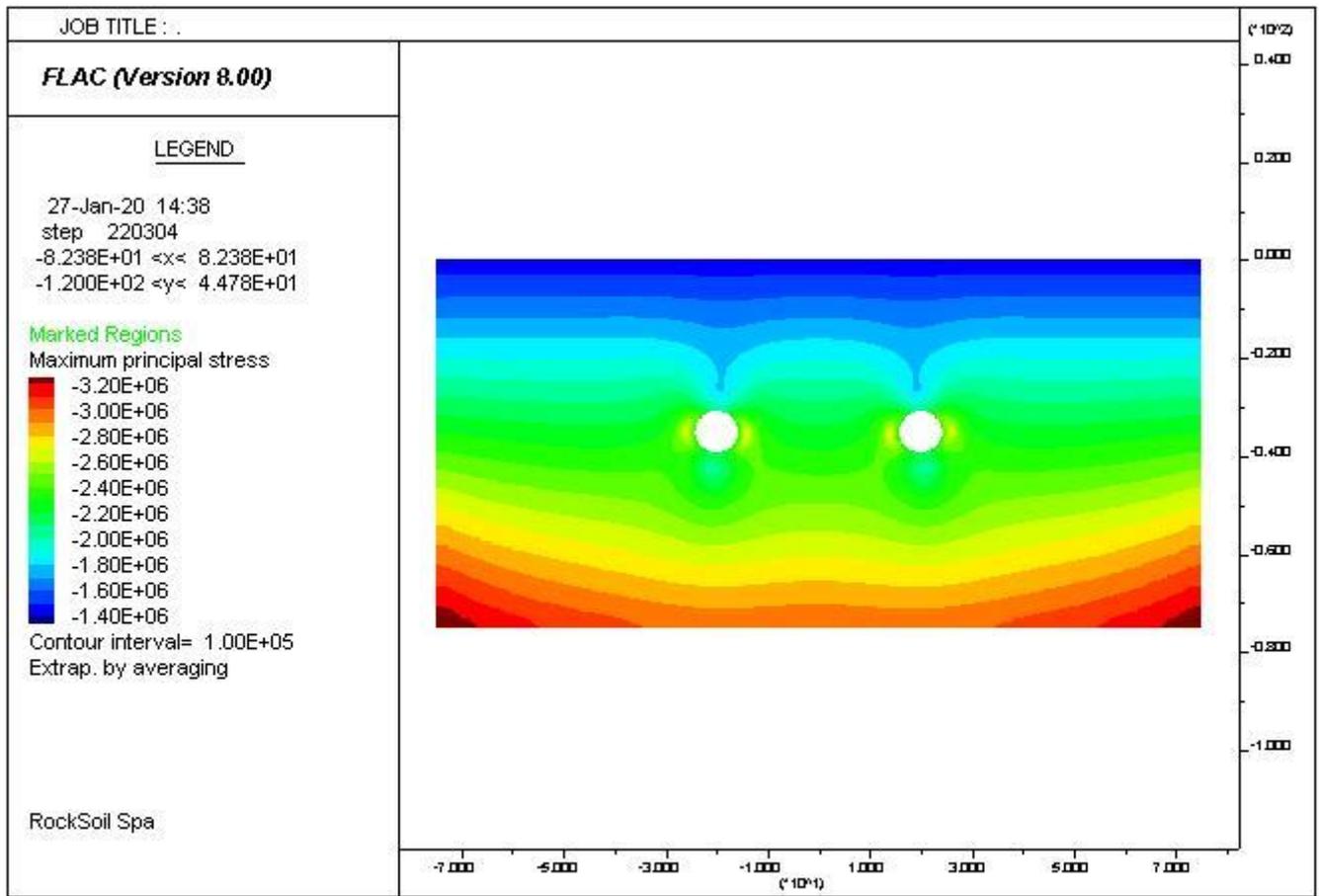


Figura 26 - Tensioni principali totali sigma1

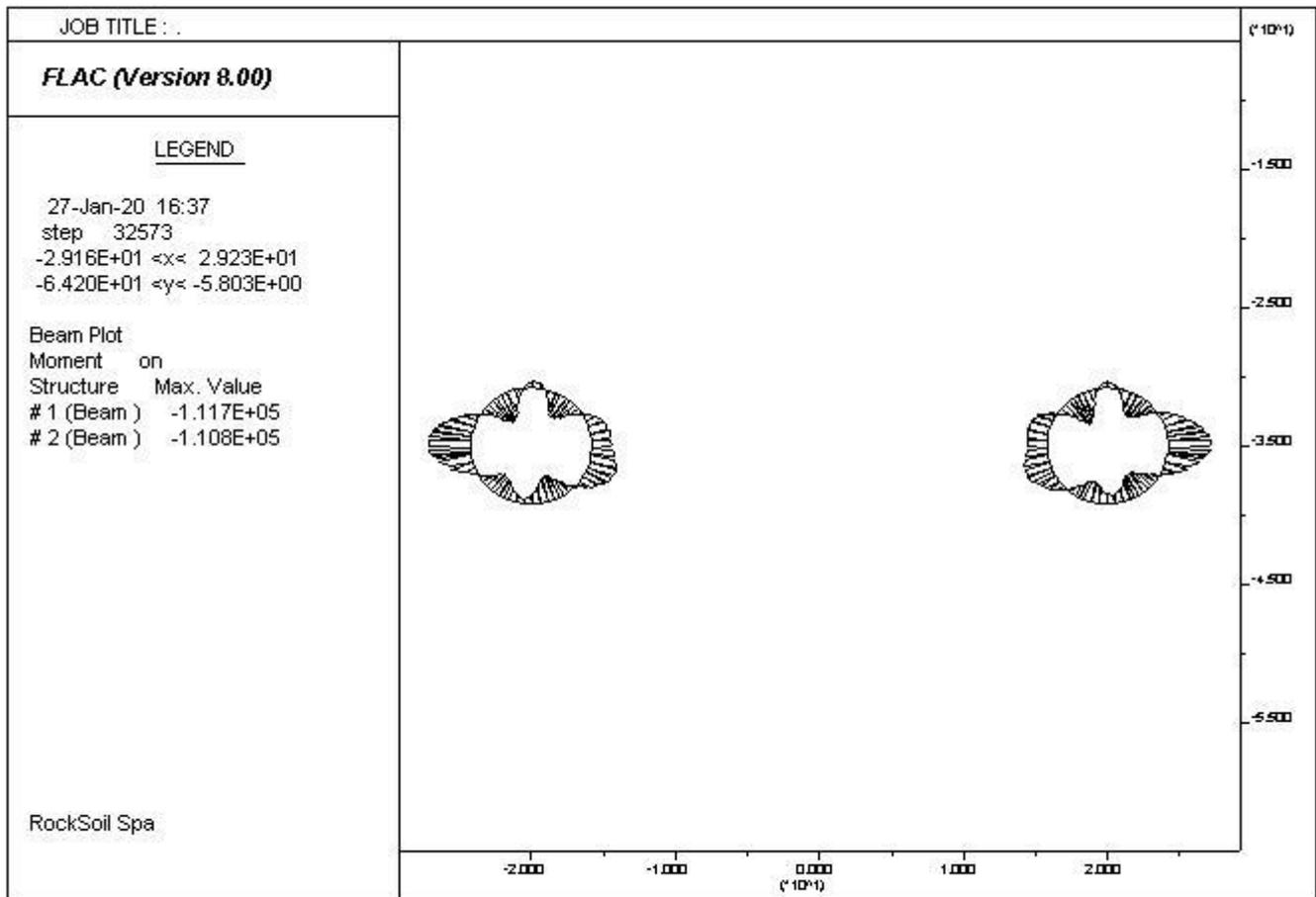


Figura 27 – Sollecitazioni M

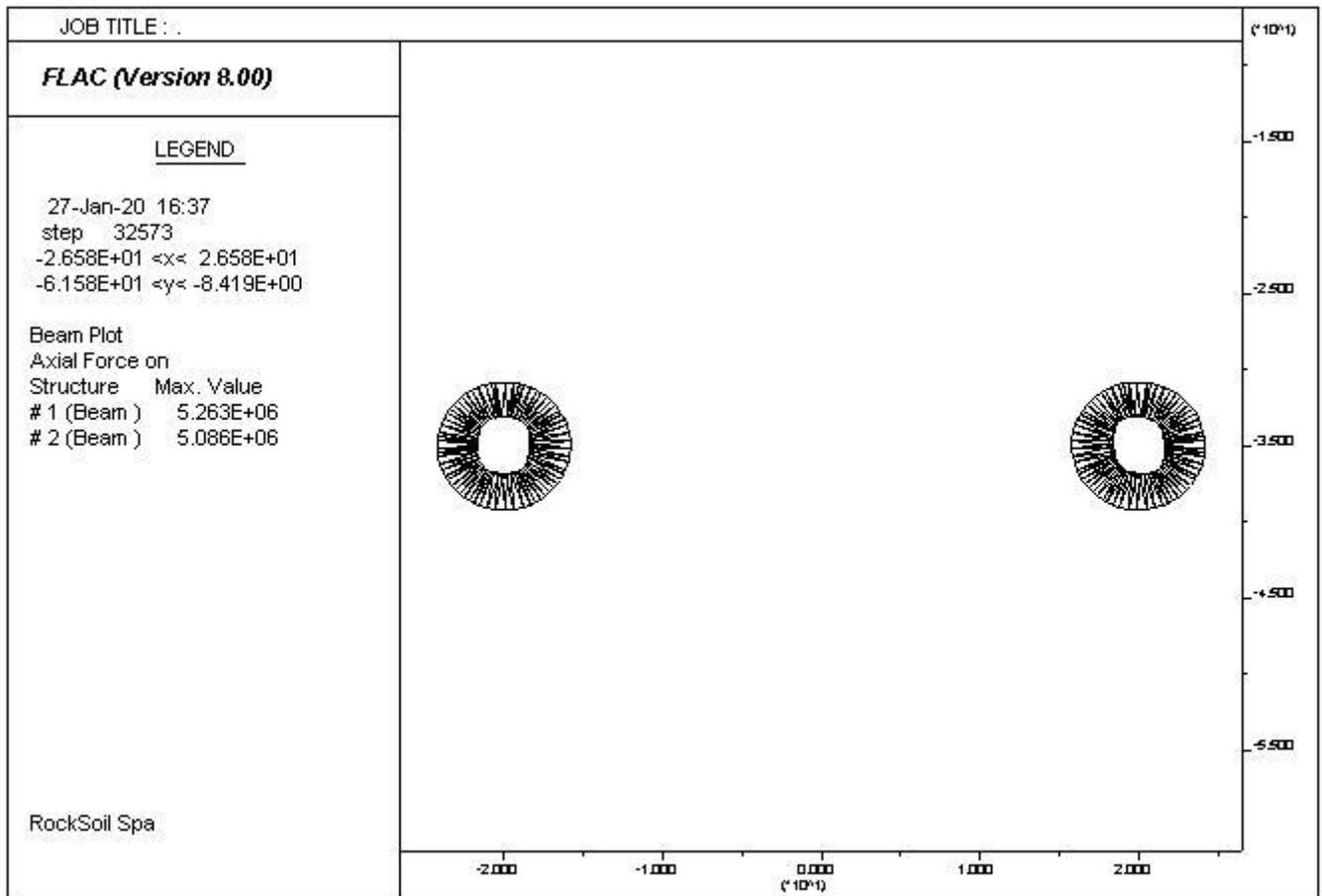


Figura 28 – Sollecitazioni N

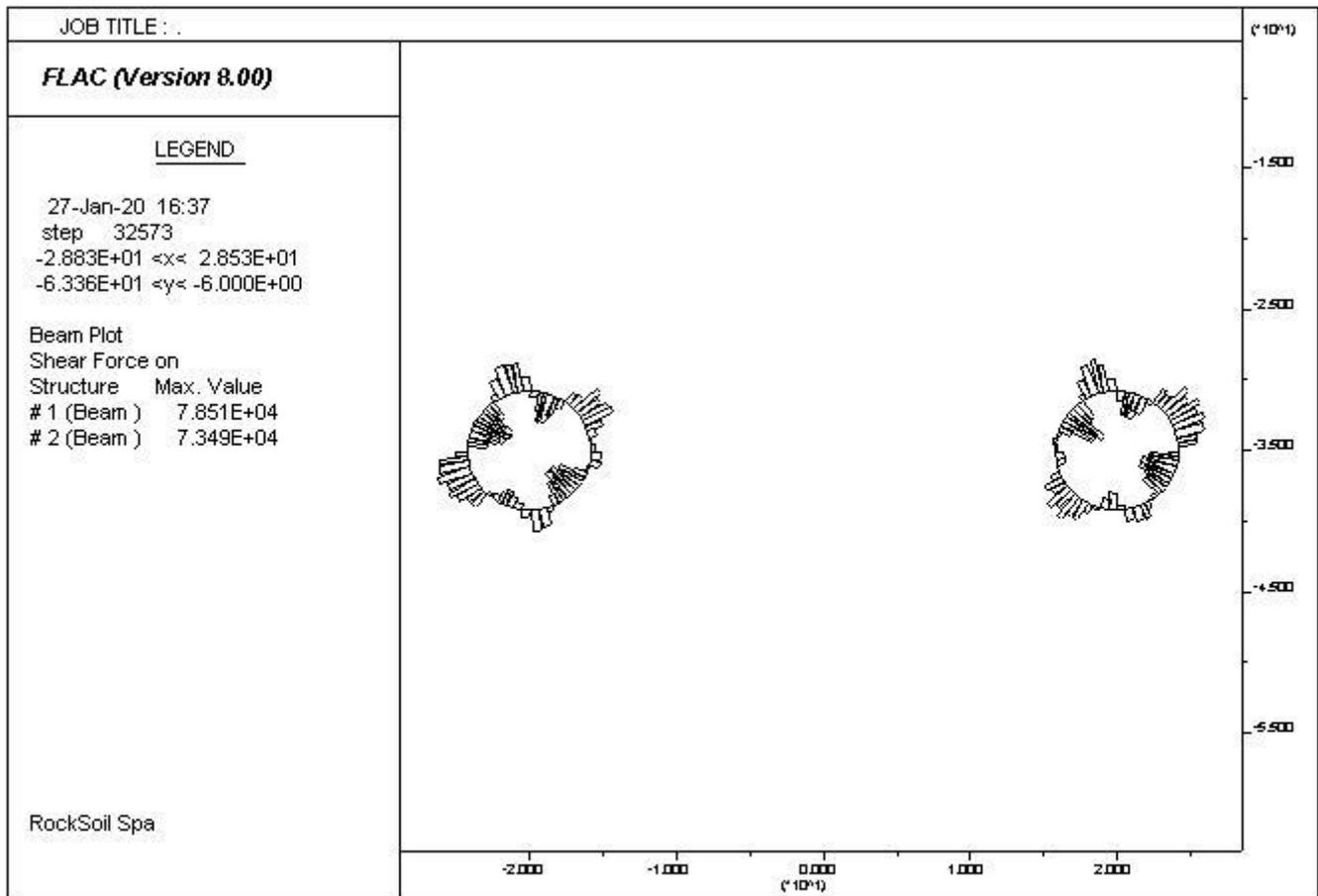


Figura 29 – Sollecitazioni T

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
128	2	128	65	1	beam	3039	5388000	137900	-136200	-0.0003421
127	2	127	128	1	beam	-2276	5399000	138500	-139300	-0.0003428
126	2	126	127	1	beam	-17000	5429000	133800	-139400	-0.0003447
125	2	125	126	1	beam	-19990	5461000	124400	-135100	-0.0003467
124	2	124	125	1	beam	-29430	5500000	115300	-126300	-0.0003492
123	2	123	124	1	beam	-35240	5577000	101600	-114700	-0.0003541
122	2	122	123	1	beam	-64100	5659000	77590	-102500	-0.0003593
121	2	121	122	1	beam	-63370	5734000	53540	-78170	-0.0003641
120	2	120	121	1	beam	-84940	5826000	21380	-53540	-0.0003699
119	2	119	120	1	beam	-87090	5906000	-9564	-23420	-0.000375
118	2	118	119	1	beam	-90180	5986000	-41700	10430	-0.0003801
117	2	117	118	1	beam	-82840	6062000	-71060	42330	-0.0003849
116	2	116	117	1	beam	-70090	6147000	-102100	70900	-0.0003903
115	2	115	116	1	beam	-58780	6207000	-130400	102200	-0.0003941
114	2	114	115	1	beam	-46290	6293000	-153700	130400	-0.0003995
113	2	113	114	1	beam	-28240	6330000	-168400	153800	-0.0004019
112	2	112	113	1	beam	-5952	6396000	-171000	168000	-0.0004061

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
111	2	111	112	1	beam	10520	6398000	-165800	171000	-0.0004063
110	2	110	111	1	beam	38690	6448000	-148200	166200	-0.0004094
109	2	109	110	1	beam	53450	6390000	-129200	147900	-0.0004057
108	2	108	109	1	beam	83690	6377000	-101100	130300	-0.0004049
107	2	107	108	1	beam	67050	6347000	-73240	100900	-0.000403
106	2	106	107	1	beam	87030	6349000	-41300	73270	-0.0004031
105	2	105	106	1	beam	66690	6295000	-16930	41430	-0.0003997
104	2	104	105	1	beam	86270	6255000	15790	16260	-0.0003971
103	2	103	104	1	beam	60650	6185000	38550	-16020	-0.0003927
102	2	102	103	1	beam	71550	6118000	64500	-39210	-0.0003885
101	2	101	102	1	beam	54340	6047000	84570	-65360	-0.000384
100	2	100	101	1	beam	54130	5938000	112600	-84740	-0.000377
99	2	99	100	1	beam	41080	5863000	137500	-114700	-0.0003723
98	2	98	99	1	beam	26400	5767000	153400	-138200	-0.0003662
97	2	97	98	1	beam	7635	5740000	157600	-153200	-0.0003644
96	2	96	97	1	beam	-10960	5734000	152100	-158300	-0.0003641
95	2	95	96	1	beam	-28810	5800000	137600	-152700	-0.0003683
94	2	94	95	1	beam	-37620	5889000	124400	-137800	-0.0003739
93	2	93	94	1	beam	-42070	5946000	109600	-124500	-0.0003775
92	2	92	93	1	beam	-61320	5990000	86610	-109700	-0.0003803
91	2	91	92	1	beam	-68240	6057000	62200	-87930	-0.0003846
90	2	90	91	1	beam	-77600	6123000	33470	-62600	-0.0003888
89	2	89	90	1	beam	-89550	6205000	26.9	-33640	-0.000394
88	2	88	89	1	beam	-83410	6228000	-29160	-144.5	-0.0003954
87	2	87	88	1	beam	-85910	6266000	-59760	29580	-0.0003978
86	2	86	87	1	beam	-79340	6275000	-94750	60260	-0.0003984
85	2	85	86	1	beam	-67210	6356000	-127000	95060	-0.0004035
84	2	84	85	1	beam	-42570	6326000	-148500	126900	-0.0004016
83	2	83	84	1	beam	-61860	6341000	-165400	148600	-0.0004026
82	2	82	83	1	beam	-17690	6346000	-170600	165800	-0.0004029
81	2	81	82	1	beam	-3968	6343000	-172700	170800	-0.0004027
80	2	80	81	1	beam	21920	6337000	-166300	172500	-0.0004023
79	2	79	80	1	beam	24140	6332000	-159600	166500	-0.000402
78	2	78	79	1	beam	31470	6299000	-144400	159900	-0.0004
77	2	77	78	1	beam	57290	6278000	-118700	144700	-0.0003986
76	2	76	77	1	beam	62420	6184000	-96720	119000	-0.0003926
75	2	75	76	1	beam	89160	6130000	-65290	97070	-0.0003892
74	2	74	75	1	beam	60950	6060000	-41850	65450	-0.0003848
73	2	73	74	1	beam	87060	6040000	-10010	41450	-0.0003835
72	2	72	73	1	beam	58140	5950000	12180	8816	-0.0003778
71	2	71	72	1	beam	78890	5883000	41560	-13340	-0.0003735
70	2	70	71	1	beam	41170	5790000	56980	-42250	-0.0003676
69	2	69	70	1	beam	49920	5684000	82050	-57390	-0.0003609
68	2	68	69	1	beam	33040	5625000	101200	-83110	-0.0003571
67	2	67	68	1	beam	43180	5551000	116600	-102500	-0.0003524
66	2	66	67	1	beam	25010	5492000	126500	-118300	-0.0003487
65	2	65	66	1	beam	15940	5407000	135400	-126700	-0.0003433
64	1	64	1	1	beam	-16720	5407000	129700	-138800	-0.0003433
63	1	63	64	1	beam	-28880	5489000	119300	-128800	-0.0003485

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
62	1	62	63	1	beam	-47940	5549000	103600	-119300	-0.0003523
61	1	61	62	1	beam	-38400	5626000	81500	-102600	-0.0003572
60	1	60	61	1	beam	-53880	5692000	53910	-80530	-0.0003614
59	1	59	60	1	beam	-46320	5792000	37540	-54110	-0.0003678
58	1	58	59	1	beam	-80780	5886000	6630	-35530	-0.0003737
57	1	57	58	1	beam	-56640	5949000	-15360	-5086	-0.0003777
56	1	56	57	1	beam	-82910	6034000	-45560	15620	-0.0003831
55	1	55	56	1	beam	-61500	6056000	-69450	45640	-0.0003845
54	1	54	55	1	beam	-87540	6129000	-100800	69620	-0.0003891
53	1	53	54	1	beam	-62450	6182000	-122800	100500	-0.0003925
52	1	52	53	1	beam	-55820	6271000	-148000	122600	-0.0003982
51	1	51	52	1	beam	-31830	6296000	-163300	147600	-0.0003998
50	1	50	51	1	beam	-22710	6326000	-169200	162800	-0.0004016
49	1	49	50	1	beam	-22540	6332000	-176000	169600	-0.000402
48	1	48	49	1	beam	5340	6340000	-173600	176100	-0.0004026
47	1	47	48	1	beam	19610	6344000	-168300	173700	-0.0004028
46	1	46	47	1	beam	63560	6338000	-151200	168400	-0.0004024
45	1	45	46	1	beam	46950	6322000	-127400	151300	-0.0004014
44	1	44	45	1	beam	71920	6349000	-93480	127600	-0.0004031
43	1	43	44	1	beam	84280	6273000	-56980	93610	-0.0003983
42	1	42	43	1	beam	86710	6261000	-25870	56330	-0.0003975
41	1	41	42	1	beam	87190	6223000	5511	25120	-0.0003951
40	1	40	41	1	beam	90950	6198000	39330	-5190	-0.0003935
39	1	39	40	1	beam	79400	6115000	69330	-39520	-0.0003882
38	1	38	39	1	beam	63870	6056000	93690	-69600	-0.0003845
37	1	37	38	1	beam	53560	5988000	113200	-93050	-0.0003802
36	1	36	37	1	beam	39080	5943000	127500	-113600	-0.0003774
35	1	35	36	1	beam	35400	5890000	139600	-127000	-0.000374
34	1	34	35	1	beam	30040	5801000	154800	-139000	-0.0003683
33	1	33	34	1	beam	12210	5735000	161300	-154500	-0.0003641
32	1	32	33	1	beam	-9503	5745000	155600	-161100	-0.0003648
31	1	31	32	1	beam	-27380	5773000	139400	-155200	-0.0003666
30	1	30	31	1	beam	-43850	5873000	115000	-139300	-0.0003729
29	1	29	30	1	beam	-60940	5953000	83750	-115100	-0.000378
28	1	28	29	1	beam	-52680	6058000	64990	-83610	-0.0003846
27	1	27	28	1	beam	-75970	6128000	37300	-64150	-0.0003891
26	1	26	27	1	beam	-64500	6200000	12720	-36680	-0.0003936
25	1	25	26	1	beam	-92370	6272000	-22190	-12130	-0.0003982
24	1	24	25	1	beam	-70860	6307000	-48580	22550	-0.0004004
23	1	23	24	1	beam	-85480	6359000	-79420	48020	-0.0004037
22	1	22	23	1	beam	-65800	6359000	-106700	79630	-0.0004037
21	1	21	22	1	beam	-84570	6391000	-134500	105000	-0.0004058
20	1	20	21	1	beam	-51640	6407000	-151700	133600	-0.0004068
19	1	19	20	1	beam	-38830	6463000	-169600	151600	-0.0004103
18	1	18	19	1	beam	-13530	6409000	-176200	169500	-0.0004069
17	1	17	18	1	beam	8905	6418000	-171500	176000	-0.0004075
16	1	16	17	1	beam	32330	6347000	-154800	171500	-0.000403
15	1	15	16	1	beam	49220	6311000	-129600	154400	-0.0004007
14	1	14	15	1	beam	60170	6217000	-100800	129700	-0.0003947

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
13	1	13	14	1	beam	73730	6157000	-68340	101200	-0.0003909
12	1	12	13	1	beam	86750	6078000	-38320	68400	-0.0003859
11	1	11	12	1	beam	90990	6005000	-5796	37340	-0.0003813
10	1	10	11	1	beam	87370	5912000	26970	6116	-0.0003754
9	1	9	10	1	beam	87530	5835000	59310	-26160	-0.0003705
8	1	8	9	1	beam	57800	5742000	81810	-59350	-0.0003646
7	1	7	8	1	beam	64100	5668000	105600	-80660	-0.0003599
6	1	6	7	1	beam	34600	5584000	118700	-105800	-0.0003546
5	1	5	6	1	beam	31310	5508000	129400	-117700	-0.0003497
4	1	4	5	1	beam	14920	5467000	137500	-129500	-0.0003471
3	1	3	4	1	beam	18680	5435000	142600	-136400	-0.000345
2	1	2	3	1	beam	-312.7	5405000	141600	-141700	-0.0003431
1	1	1	2	1	beam	-7509	5383000	138800	-142800	-0.0003418

Analisi numerica per la verifica dell'anello da 0.45 m - Analisi n°7

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

La seguente figura schematizza la successione delle fasi di calcolo delle due differenti analisi condotte:

Tabella 3 - Fasi di analisi (sollecitazioni massime sui rivestimenti)

Fase	Descrizione	Rilascio forze di scavo
0	Creazione della geometria del modello	-
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche	-
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di Mohr-Coulomb)	-
SCAVO CANNA DESTRA		
3	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) TRV : in condizioni non drenate (Cu)	varie
4	Installazione dell'anello universale	1.0
SCAVO CANNA SINISTRA		
5	Rilascio delle forze al contorno (da assialsimmetrici) (come per canna destra)	varie
6	Installazione dell'anello universale	1.0
LUNGO TERMINE		
7	Equalizzazione pressioni interstiziali / ripristino pp iniziali al contorno di scavo – parametri drenati	1.0

Le unità di misura principali attraverso le quali sono rappresentati i risultati dell'analisi nelle figure contenute nel presente documento sono le seguenti:

- m per le grandezze e gli spostamenti;
- N per le forze.

Fase 7

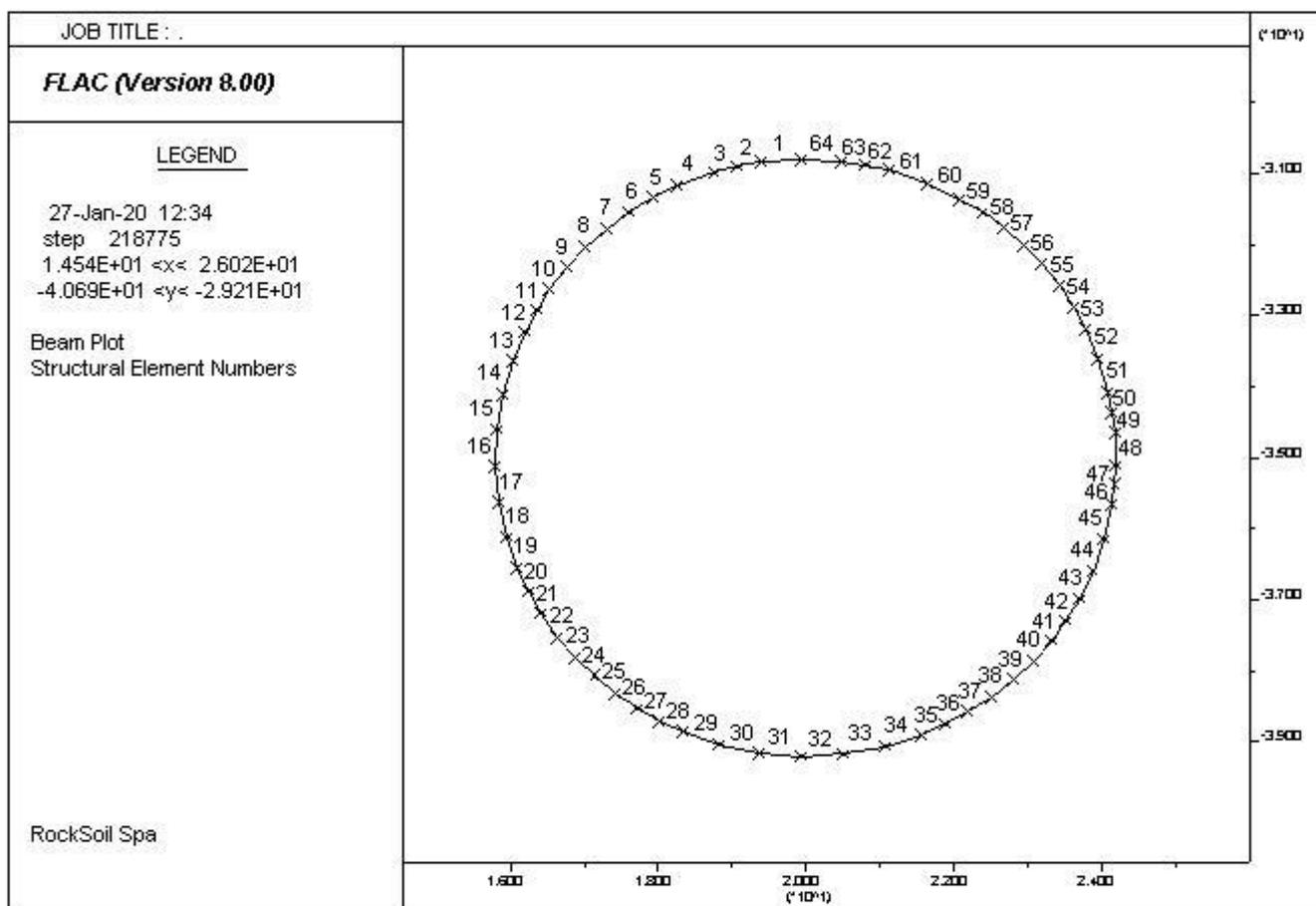


Figura 30 - Numerazione elementi beam canna Destra

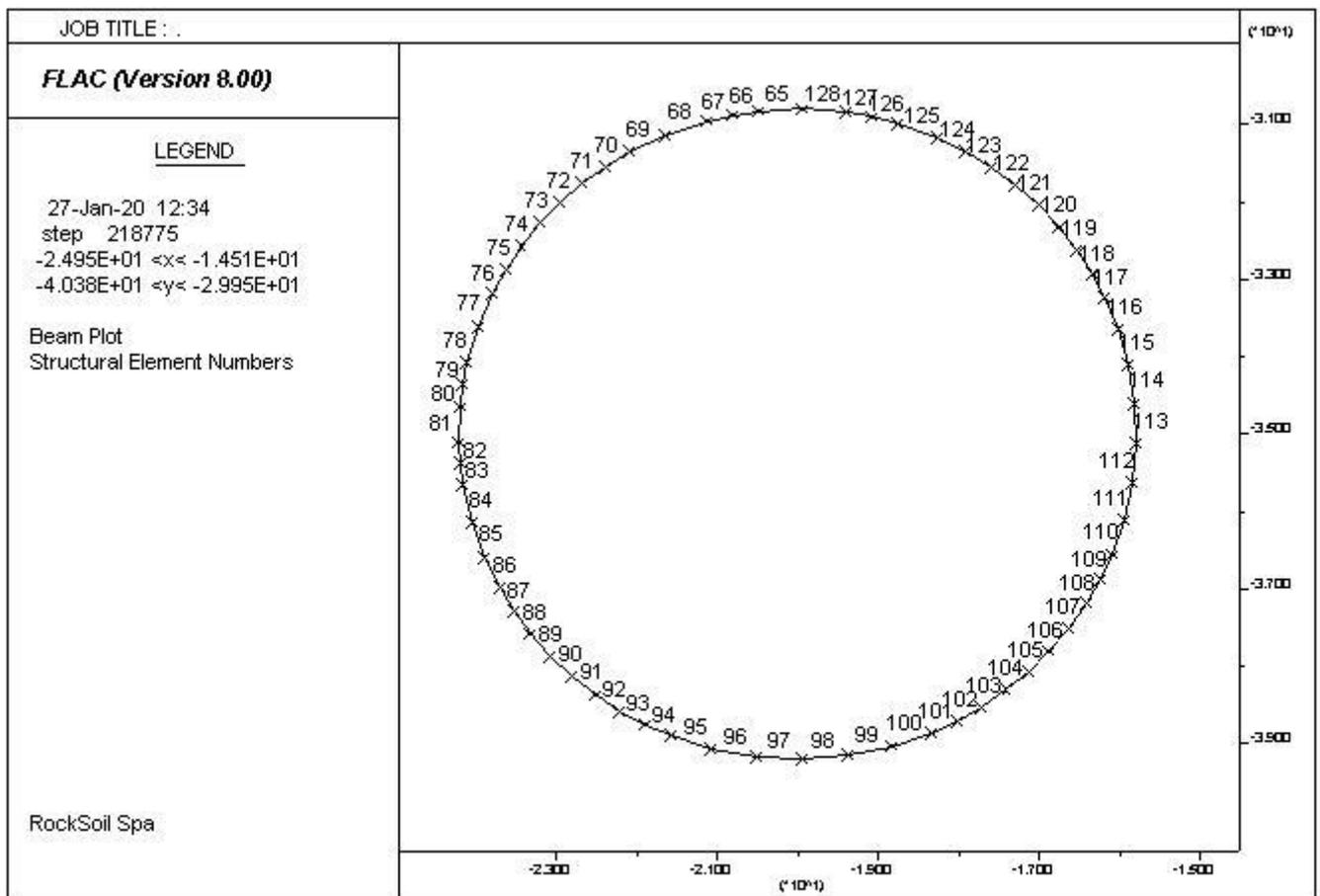


Figura 31 - Numerazione elementi beam canna Sinistra

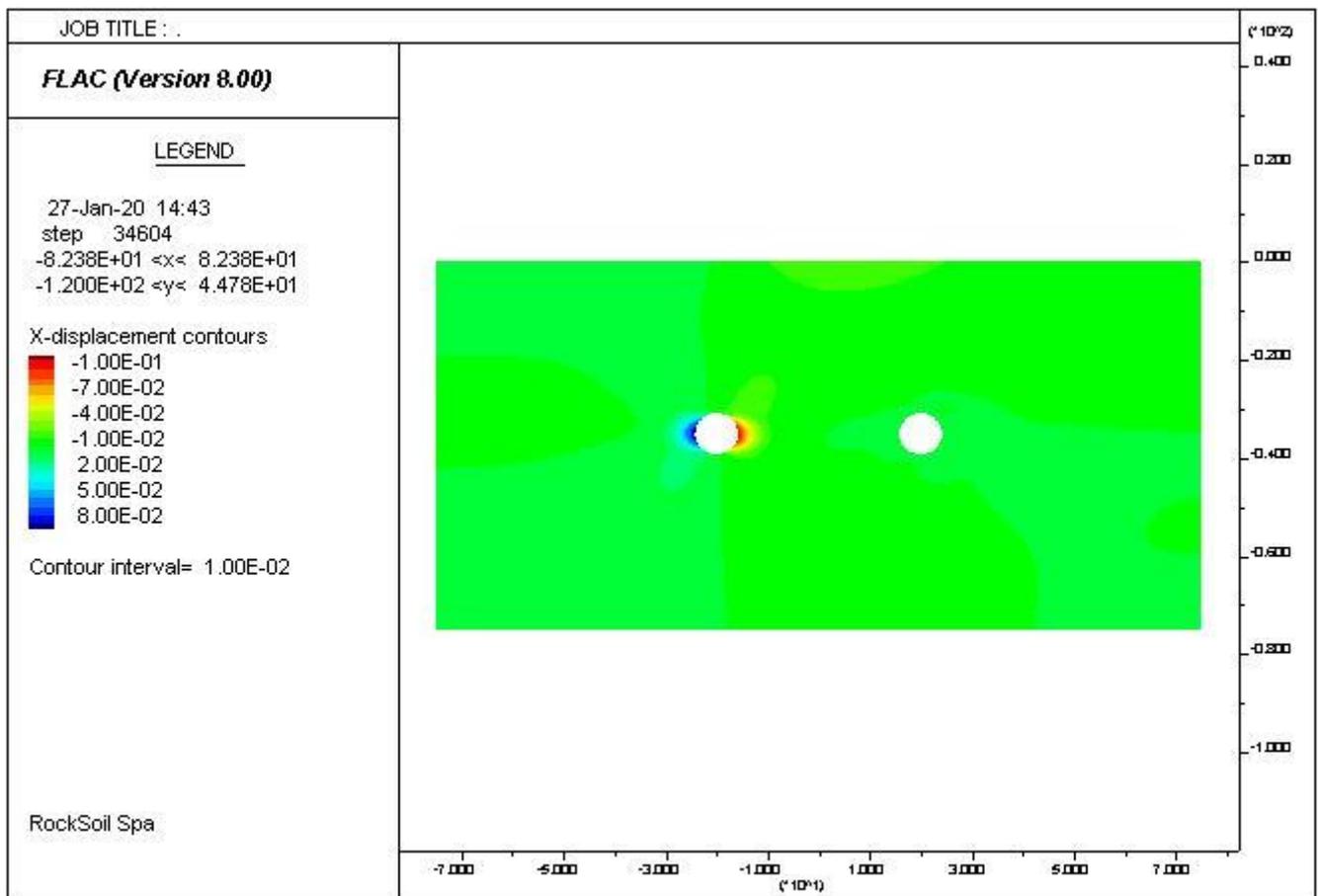


Figura 32 - Spostamenti x

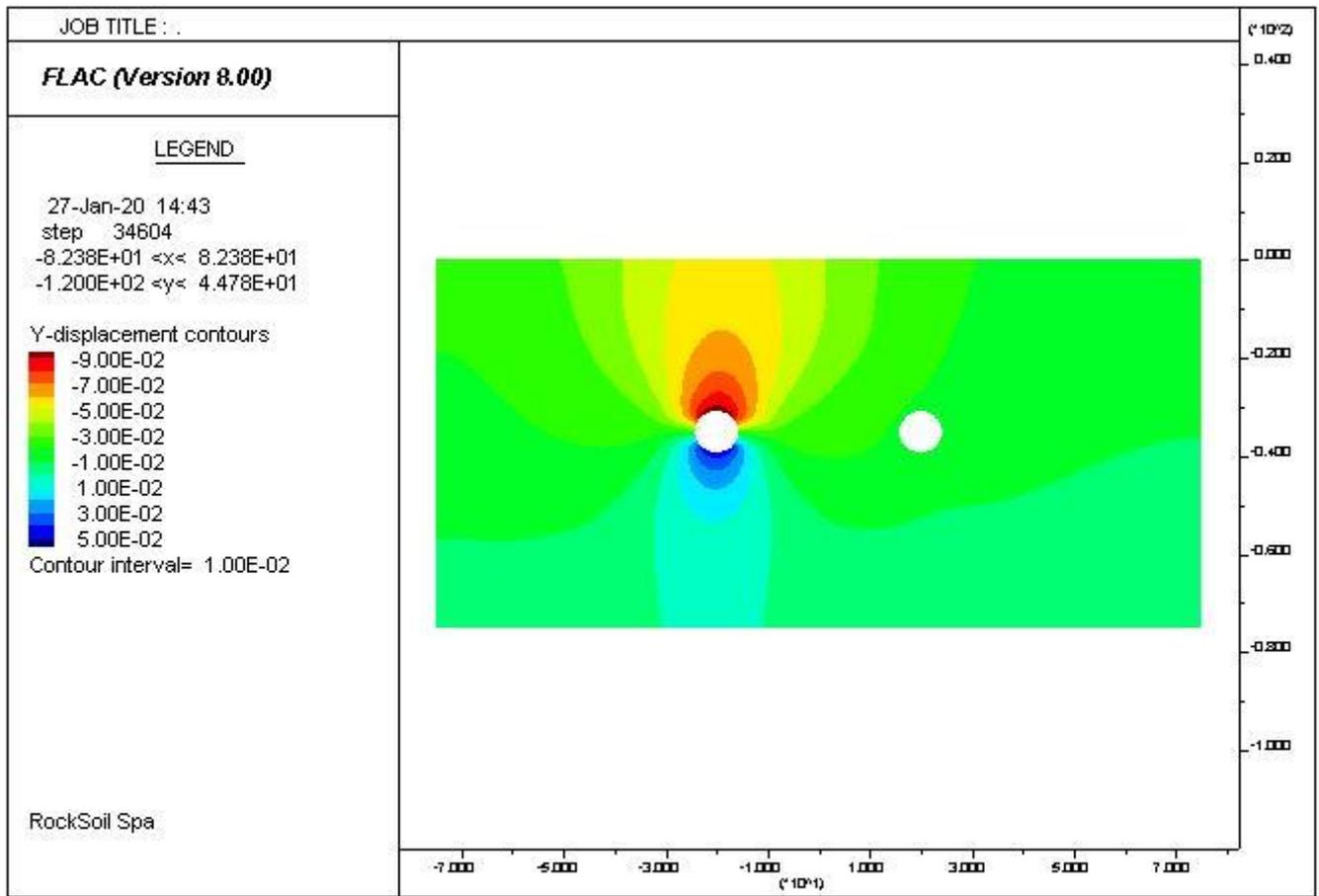


Figura 33 - Spostamenti y

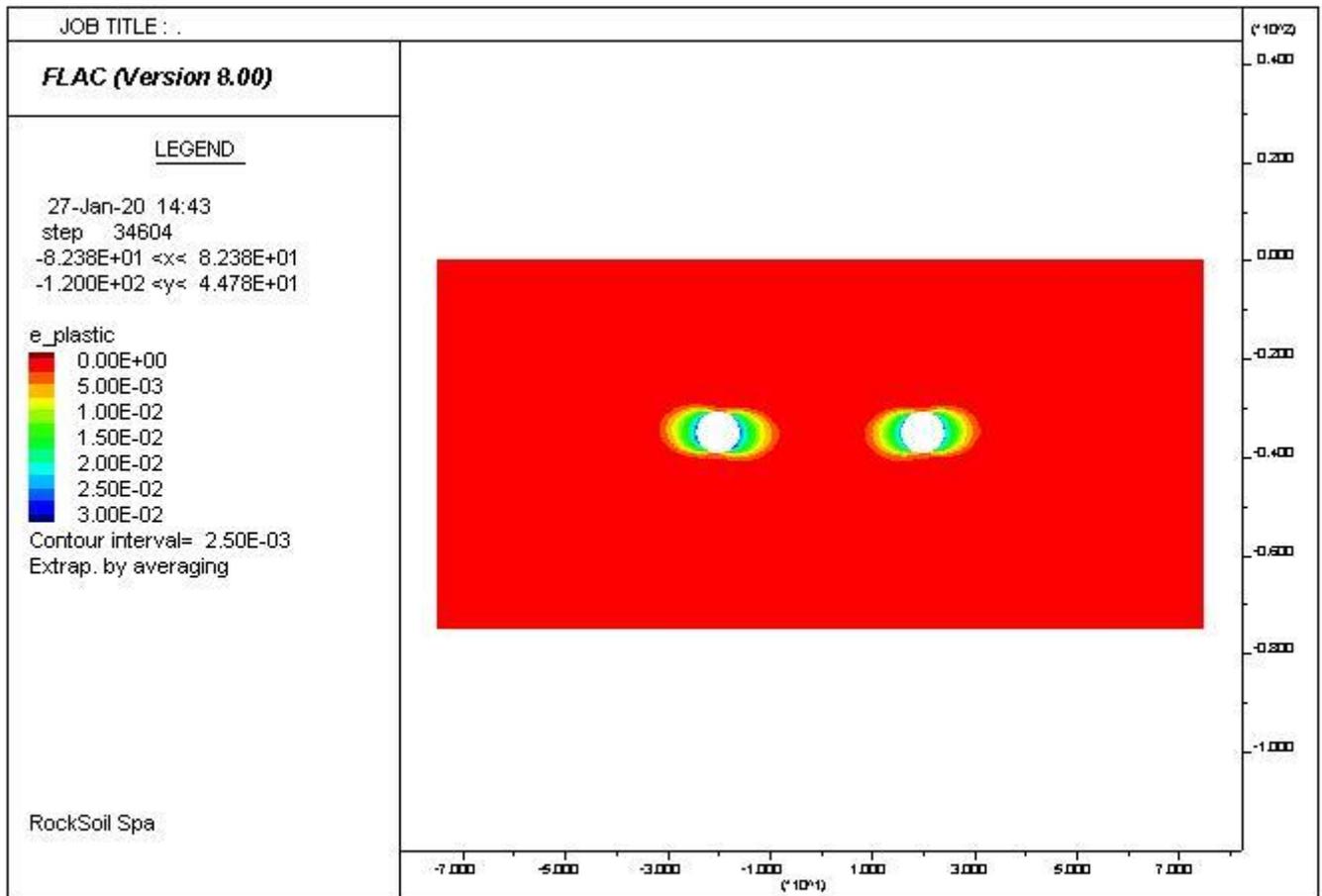


Figura 34 – Plasticizzazioni

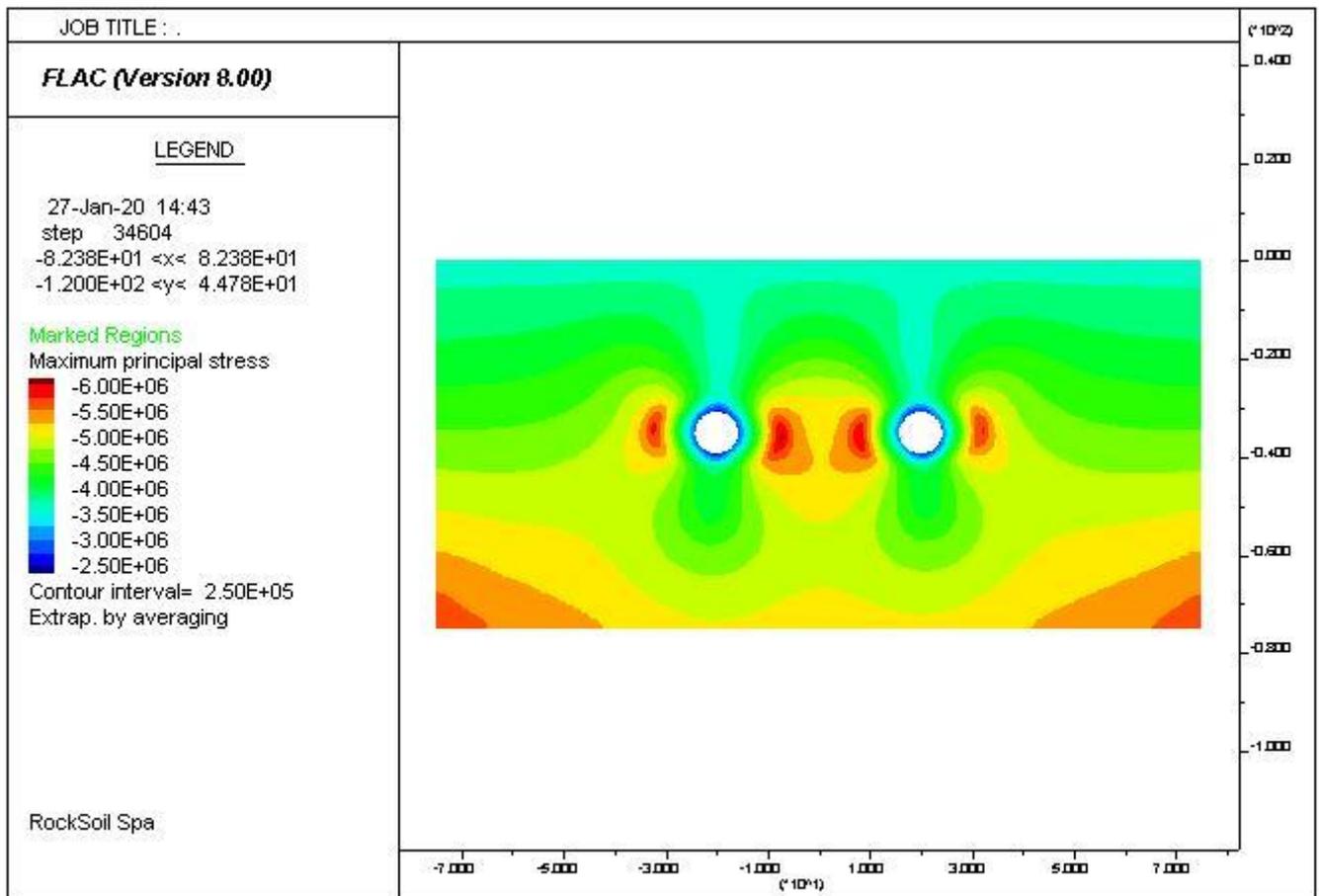


Figura 35 – Tensioni principali totali sigma1

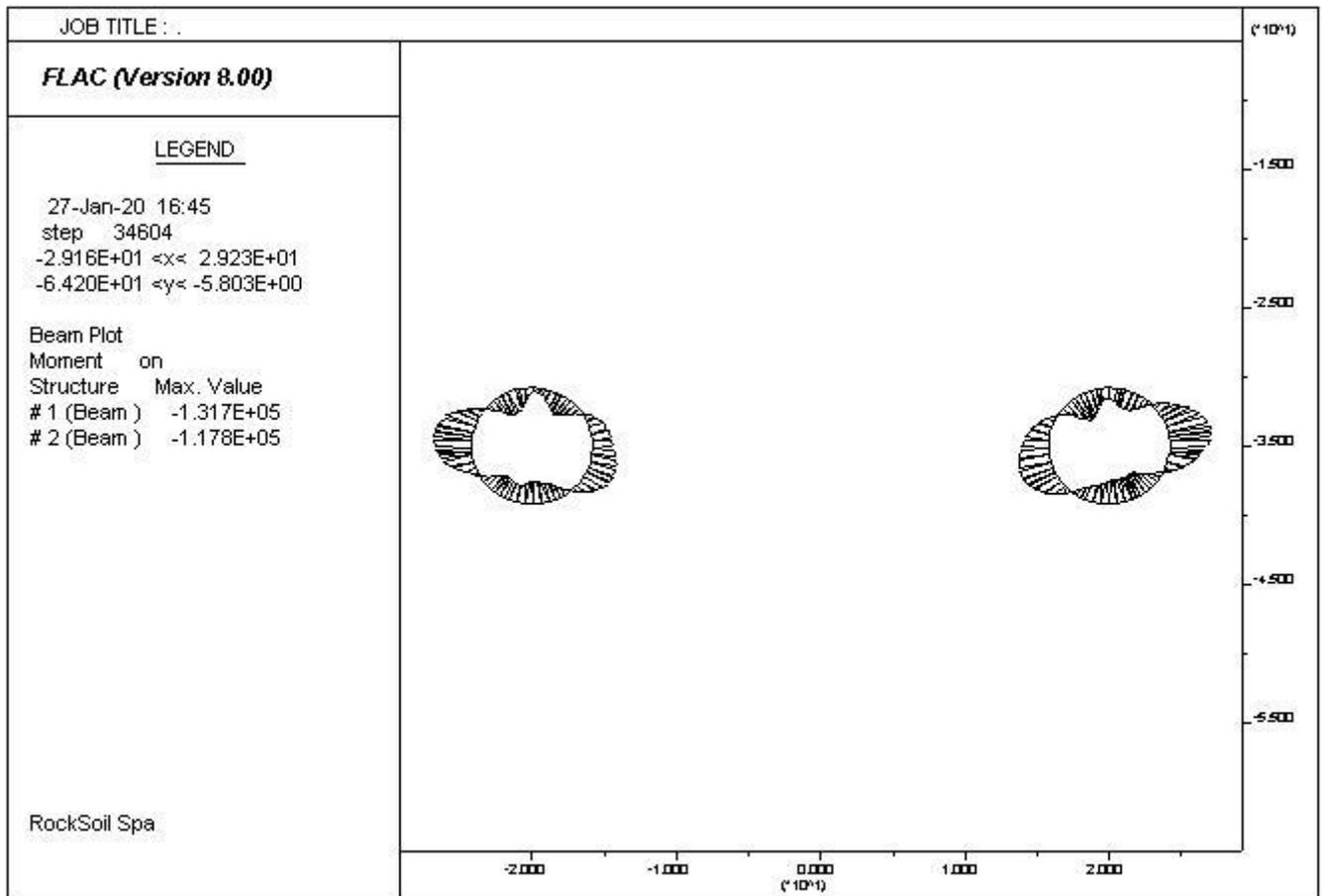


Figura 36 – Sollecitazioni M

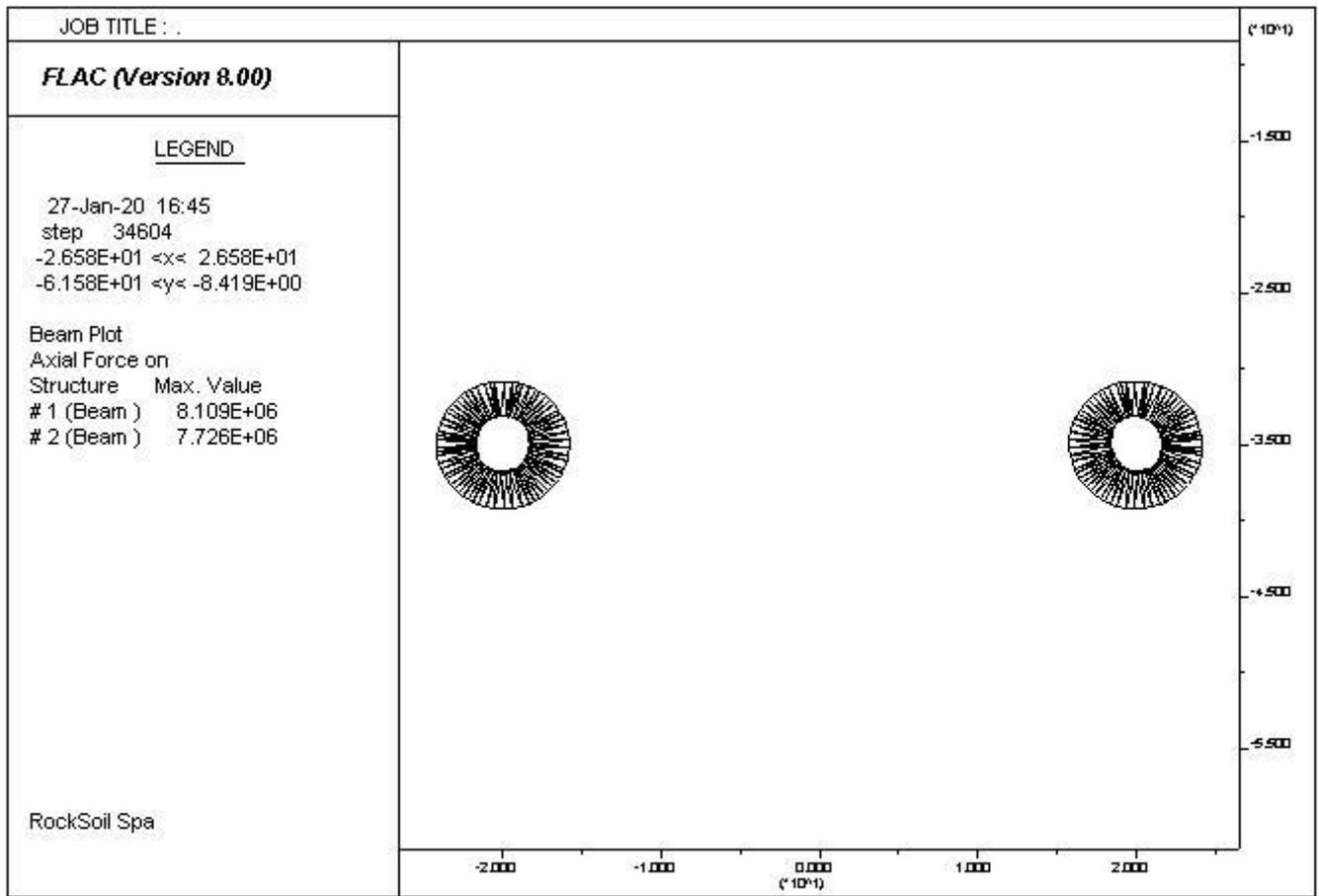


Figura 37 – Sollecitazioni N

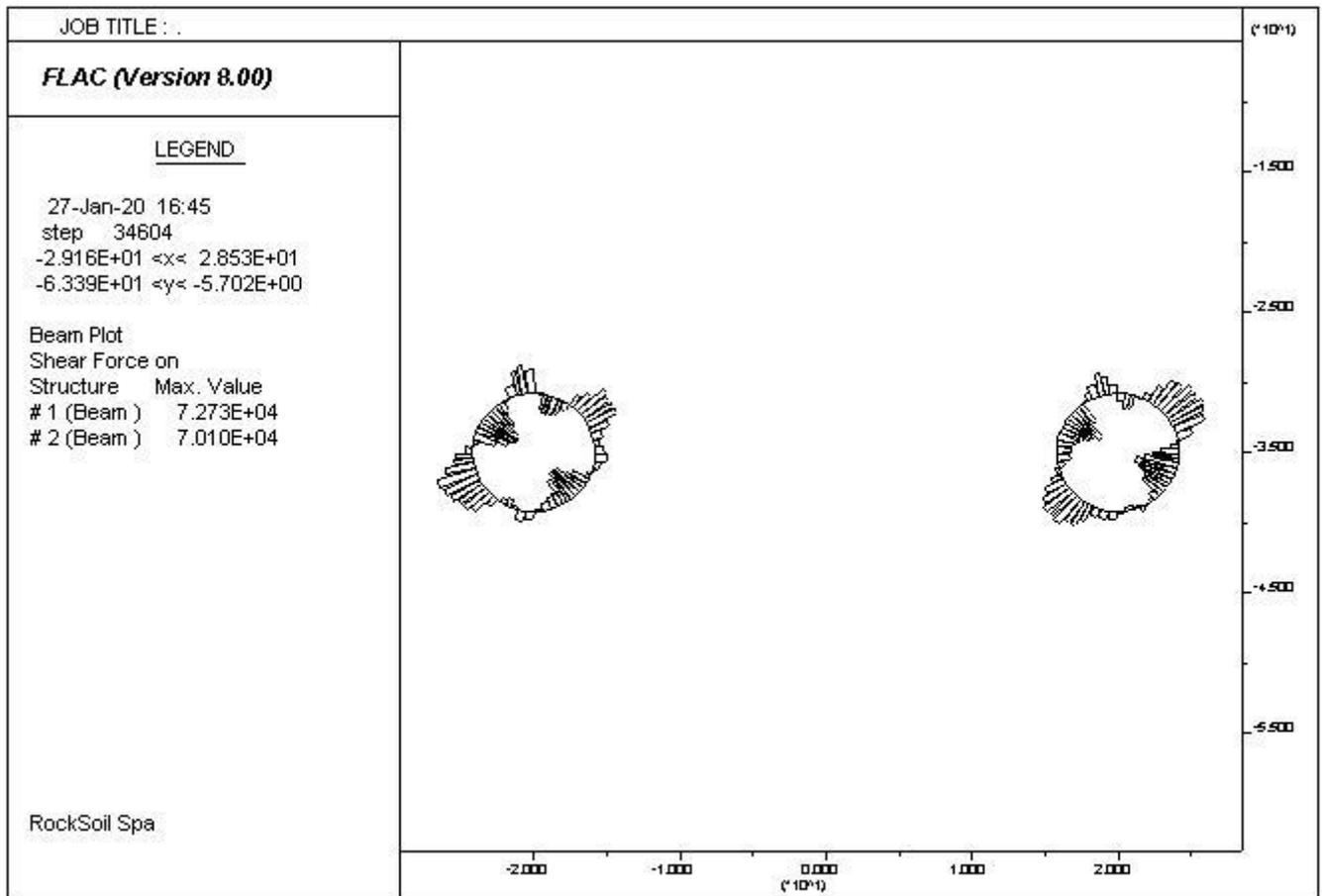


Figura 38 – Sollecitazioni T

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
128	2	128	65	1	beam	-2151	6997000	11930	-13100	-0.0004443
127	2	127	128	1	beam	25380	7005000	21910	-13530	-0.0004447
126	2	126	127	1	beam	32980	6998000	32800	-21910	-0.0004443
125	2	125	126	1	beam	30390	7002000	50810	-34450	-0.0004446
124	2	124	125	1	beam	28460	7015000	61280	-50660	-0.0004454
123	2	123	124	1	beam	14300	6992000	66900	-61570	-0.0004439
122	2	122	123	1	beam	-22500	7025000	58290	-67040	-0.0004461
121	2	121	122	1	beam	-33630	7045000	46160	-59230	-0.0004473
120	2	120	121	1	beam	-59300	7098000	24820	-47280	-0.0004506
119	2	119	120	1	beam	-52120	7167000	5622	-25360	-0.000455
118	2	118	119	1	beam	-53940	7245000	-12520	-6185	-0.00046
117	2	117	118	1	beam	-54750	7320000	-31460	12480	-0.0004648
116	2	116	117	1	beam	-31570	7402000	-45360	31300	-0.00047
115	2	115	116	1	beam	-15530	7503000	-53150	45700	-0.0004764
114	2	114	115	1	beam	-8659	7592000	-57370	53000	-0.0004821
113	2	113	114	1	beam	-15890	7666000	-64840	56640	-0.0004867
112	2	112	113	1	beam	-21820	7711000	-76090	64910	-0.0004896
111	2	111	112	1	beam	-12550	7726000	-82300	76100	-0.0004906
110	2	110	111	1	beam	-2794	7708000	-83520	82230	-0.0004894
109	2	109	110	1	beam	7360	7687000	-81250	83830	-0.0004881
108	2	108	109	1	beam	29660	7651000	-71390	81760	-0.0004858
107	2	107	108	1	beam	38240	7620000	-55920	71680	-0.0004838
106	2	106	107	1	beam	57540	7584000	-35190	56320	-0.0004815
105	2	105	106	1	beam	52630	7546000	-15810	35140	-0.0004791
104	2	104	105	1	beam	58170	7517000	5446	16160	-0.0004773
103	2	103	104	1	beam	46930	7481000	23860	-6421	-0.000475
102	2	102	103	1	beam	48880	7464000	41530	-24250	-0.0004739
101	2	101	102	1	beam	25070	7453000	50180	-41310	-0.0004732
100	2	100	101	1	beam	21740	7464000	62630	-51430	-0.0004739
99	2	99	100	1	beam	14580	7479000	70210	-62130	-0.0004748
98	2	98	99	1	beam	1711	7495000	72120	-71130	-0.0004759
97	2	97	98	1	beam	-16270	7496000	63720	-73140	-0.000476
96	2	96	97	1	beam	-19470	7478000	53270	-64180	-0.0004748
95	2	95	96	1	beam	4661	7446000	55980	-53540	-0.0004728
94	2	94	95	1	beam	14250	7402000	60800	-55730	-0.00047
93	2	93	94	1	beam	8787	7397000	64120	-61000	-0.0004697
92	2	92	93	1	beam	-838.2	7378000	63760	-64080	-0.0004685
91	2	91	92	1	beam	-16230	7357000	58000	-64130	-0.0004671
90	2	90	91	1	beam	-40020	7364000	43610	-58640	-0.0004676
89	2	89	90	1	beam	-48190	7404000	25970	-44060	-0.0004701
88	2	88	89	1	beam	-49040	7437000	9563	-26790	-0.0004722
87	2	87	88	1	beam	-57530	7473000	-10400	-9807	-0.0004745
86	2	86	87	1	beam	-62180	7503000	-36940	9913	-0.0004764
85	2	85	86	1	beam	-67710	7550000	-68880	36730	-0.0004794
84	2	84	85	1	beam	-50080	7588000	-94350	68950	-0.0004818
83	2	83	84	1	beam	-31450	7609000	-103000	94480	-0.0004831
82	2	82	83	1	beam	-27880	7608000	-111700	104100	-0.0004831
81	2	81	82	1	beam	-11450	7595000	-117600	112200	-0.0004822

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
80	2	80	81	1	beam	1152	7586000	-117500	117800	-0.0004816
79	2	79	80	1	beam	10060	7566000	-114900	117700	-0.0004804
78	2	78	79	1	beam	38540	7523000	-95880	114800	-0.0004777
77	2	77	78	1	beam	59680	7456000	-69110	96230	-0.0004734
76	2	76	77	1	beam	63630	7391000	-45860	68540	-0.0004693
75	2	75	76	1	beam	70100	7340000	-20280	45260	-0.000466
74	2	74	75	1	beam	60580	7275000	4217	19240	-0.0004619
73	2	73	74	1	beam	67950	7214000	29030	-4497	-0.0004581
72	2	72	73	1	beam	48050	7154000	46230	-28880	-0.0004542
71	2	71	72	1	beam	49420	7113000	64700	-47020	-0.0004516
70	2	70	71	1	beam	21240	7064000	72610	-65010	-0.0004485
69	2	69	70	1	beam	2419	7043000	74170	-72970	-0.0004472
68	2	68	69	1	beam	-18630	7022000	64700	-74920	-0.0004458
67	2	67	68	1	beam	-42310	7009000	51520	-65360	-0.000445
66	2	66	67	1	beam	-50660	7019000	34660	-51240	-0.0004457
65	2	65	66	1	beam	-42000	7012000	12390	-35290	-0.0004452
64	1	64	1	1	beam	12930	7034000	41390	-34340	-0.0004466
63	1	63	64	1	beam	27010	7086000	50220	-41380	-0.0004499
62	1	62	63	1	beam	22530	7103000	57510	-50140	-0.000451
61	1	61	62	1	beam	2730	7143000	59180	-57680	-0.0004535
60	1	60	61	1	beam	-11160	7200000	53410	-58920	-0.0004572
59	1	59	60	1	beam	-32550	7238000	41240	-52880	-0.0004595
58	1	58	59	1	beam	-53110	7295000	21680	-40680	-0.0004632
57	1	57	58	1	beam	-57370	7346000	1171	-21890	-0.0004664
56	1	56	57	1	beam	-66010	7408000	-23000	-828.4	-0.0004703
55	1	55	56	1	beam	-63840	7466000	-47920	23200	-0.000474
54	1	54	55	1	beam	-67490	7526000	-71860	47800	-0.0004778
53	1	53	54	1	beam	-60270	7572000	-93370	71890	-0.0004808
52	1	52	53	1	beam	-54020	7627000	-117900	93310	-0.0004843
51	1	51	52	1	beam	-27500	7678000	-131500	118000	-0.0004875
50	1	50	51	1	beam	2773	7703000	-130900	131700	-0.0004891
49	1	49	50	1	beam	14000	7707000	-126800	130800	-0.0004893
48	1	48	49	1	beam	32000	7701000	-111600	126400	-0.0004889
47	1	47	48	1	beam	44940	7696000	-98580	110800	-0.0004886
46	1	46	47	1	beam	42220	7687000	-86920	98390	-0.000488
45	1	45	46	1	beam	60240	7646000	-56450	87000	-0.0004855
44	1	44	45	1	beam	72730	7584000	-21890	56430	-0.0004815
43	1	43	44	1	beam	62100	7520000	5028	21970	-0.0004774
42	1	42	43	1	beam	55690	7472000	24700	-5138	-0.0004744
41	1	41	42	1	beam	46170	7422000	40280	-24070	-0.0004712
40	1	40	41	1	beam	39090	7369000	55210	-40540	-0.0004679
39	1	39	40	1	beam	42460	7321000	70790	-54850	-0.0004648
38	1	38	39	1	beam	13970	7299000	76030	-70760	-0.0004634
37	1	37	38	1	beam	6144	7321000	77810	-75490	-0.0004648
36	1	36	37	1	beam	-604.7	7334000	77660	-77880	-0.0004657
35	1	35	36	1	beam	-8437	7345000	73230	-76240	-0.0004663
34	1	34	35	1	beam	1557	7387000	73460	-72650	-0.000469
33	1	33	34	1	beam	5483	7455000	76560	-73490	-0.0004733
32	1	32	33	1	beam	-4526	7540000	73600	-76220	-0.0004787

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop		F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	strain
-	-	-	-	-	-	[N]	[N]	[N m]	[N m]	-
31	1	31	32	1	beam	-16430	7618000	64210	-73700	-0.0004837
30	1	30	31	1	beam	-16710	7689000	54450	-63700	-0.0004882
29	1	29	30	1	beam	-18020	7749000	44780	-54050	-0.000492
28	1	28	29	1	beam	-31480	7782000	33990	-45120	-0.0004941
27	1	27	28	1	beam	-45180	7835000	17660	-33630	-0.0004974
26	1	26	27	1	beam	-45650	7870000	987.6	-17950	-0.0004997
25	1	25	26	1	beam	-58790	7919000	-21260	-576.9	-0.0005028
24	1	24	25	1	beam	-53440	7950000	-41060	21430	-0.0005047
23	1	23	24	1	beam	-58100	7988000	-62170	40830	-0.0005072
22	1	22	23	1	beam	-48250	8027000	-81330	61440	-0.0005097
21	1	21	22	1	beam	-36510	8059000	-94030	81260	-0.0005117
20	1	20	21	1	beam	-17740	8088000	-99980	93780	-0.0005135
19	1	19	20	1	beam	-5226	8108000	-101900	99440	-0.0005148
18	1	18	19	1	beam	10930	8109000	-96300	101700	-0.0005149
17	1	17	18	1	beam	22040	8073000	-84640	95940	-0.0005125
16	1	16	17	1	beam	23610	8002000	-72040	84220	-0.000508
15	1	15	16	1	beam	24660	7904000	-59570	72020	-0.0005018
14	1	14	15	1	beam	33400	7788000	-43380	59400	-0.0004945
13	1	13	14	1	beam	40610	7666000	-25530	43610	-0.0004867
12	1	12	13	1	beam	53440	7568000	-6901	25430	-0.0004805
11	1	11	12	1	beam	57470	7469000	12720	7211	-0.0004742
10	1	10	11	1	beam	53610	7355000	32240	-11940	-0.000467
9	1	9	10	1	beam	66760	7254000	57220	-31950	-0.0004605
8	1	8	9	1	beam	42940	7168000	73750	-57060	-0.0004551
7	1	7	8	1	beam	37960	7106000	88470	-73720	-0.0004512
6	1	6	7	1	beam	-2505	7035000	87020	-87950	-0.0004467
5	1	5	6	1	beam	-11950	7029000	82910	-87370	-0.0004463
4	1	4	5	1	beam	-22820	6990000	69620	-81910	-0.0004438
3	1	3	4	1	beam	-38750	6972000	55810	-68610	-0.0004427
2	1	2	3	1	beam	-32350	6984000	44210	-54890	-0.0004434
1	1	1	2	1	beam	-16500	6987000	34330	-43290	-0.0004436

