

LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese
Sezione transfrontaliera

NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE
PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE

PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE
(OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

GENIE CIVIL – OPERE CIVILI

TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE

GALERIE DE LA MADDALENA – GALLERIA DELLA MADDALENA

GALERIE MADDALENA 1 – GENIE CIVIL – GALLERIA MADDALENA 1 – OPERE CIVILI

NOTE DE CALCUL SECTION COURANTE – RELAZIONE DI CALCOLO SEZIONE CORRENTE

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	30/11/2012	Première diffusion / Prima emissione	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	31/01/2013	Révision suite aux commentaires LTF / Revisione a seguito commenti LTF	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
B	23/09/2016	Première émission PRV – intégration du retour d'expérience de la galerie de reconnaissance et révision des fonctionnalités / Prima revisione PRV – integrazione del ritorno di esperienza della galleria geognostica e revisione delle funzionalità	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
C	27/01/2017	Révision suite aux commentaires TELT / Revisione a seguito commenti TELT	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
D	14/03/2017	Révision suite aux commentaires TELT et passage au statut AP / Revisione a seguito commenti TELT e passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

CODE DOC	P	R	V	C	3	A	T	S	3	3	8	2	1	D
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	48	20	10	02
------------------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

ECHELLE / SCALA
-



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

Ce projet
est cofinancé par
l'Union européenne
(DG-TREN)



Questo progetto
è cofinanziato
dall'Unione europea
(TEN-T)

SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE	6
1.1 Generalità.....	6
1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato.....	6
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1 Quadro normativo di riferimento.....	7
2.2 Documenti di progetto	7
3. QUADRO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMECCANICO	7
3.1 Gallerie Maddalena 1 e Maddalena 1bis	7
3.2 Galleria di connessione 1	8
4. SEZIONI TIPO DI CARPENTERIA GALLERIA MADDALENA 1	8
4.1 Sezione corrente – tratta di accesso dei servizi di soccorso	8
4.2 Sezione corrente – tratta stoccaggio rocce verdi	10
5. SEZIONI TIPO DI SOSTEGNO E RIVESTIMENTO GALLERIA DI CONNESSIONE	110
6. SEZIONI TIPO DI SOSTEGNO GALLERIA MADDALENA 1BIS.....	11
7. DIMENSIONAMENTO GALLERIA MADDALENA 1	12
7.1 Generalità.....	12
7.2 Materiali e resistenze di calcolo	12
7.2.1 Materiali adottati per i sostegni.....	12
7.2.2 Materiali adottati per i rivestimenti definitivi.....	13
7.3 Verifica del rivestimento definitivo della tratta scavata con TBM.....	13
7.3.1 Metodologia	13
7.3.2 Calcoli	14
7.4 Verifica del rivestimento definitivo della tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T3-T3p	15
7.4.1 Metodologia	15
7.4.2 Parametri geomeccanici	17
7.4.3 Pressione idrostatica.....	18
7.4.4 Calcoli	18
7.5 Tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T5-T5i	21
8. DIMENSIONAMENTO GALLERIA DI CONNESSIONE 1.....	21
9. DIMENSIONAMENTO GALLERIA MADDALENA 1BIS.....	21
9.1 Metodologia.....	21
9.2 Materiali e resistenze di calcolo	22
9.2.1 Materiali adottati per i sostegni.....	22
9.3 Parametri geomeccanici e stato tensionale	22
9.4 Sezione tipo S1	23
9.4.1 Analisi convergenza-confinamento.....	23
9.4.2 Modello numerico	24
9.4.3 Verifica	25
9.5 Sezione tipo S2	30
9.5.1 Analisi convergenza-confinamento.....	30
9.5.2 Modello numerico	31

9.5.3	Verifica dei sostegni	32
10.	CONCLUSIONE	38

LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figura 1:	carpenteria tratta scavata con TBM	9
Figura 2:	carpenteria tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T3 e T3p	9
Figura 3:	rivestimento tratta con stoccaggio delle rocce verdi.....	10
Figura 4:	Confronto tra sezioni della galleria di connessione e dell'area di sicurezza di Clarea (in viola).....	11
Figura 5:	Modello FEM2D per il calcolo della sezione tipo T3p – modellazione dei sostegni.....	16
Figura 6:	Modello FEM2D per il calcolo della sezione tipo T3p – modellazione dei rivestimenti.....	17
Figura 7:	Diagramma dei momenti – sezione tipo T3p.....	18
Figura 8:	Diagramma degli sforzi normali – sezione tipo T3p	19
Figura 9:	Diagramma degli sforzi di taglio – sezione tipo T3p	19
Figura 10:	Diagramma d'interazione M+N – sezione tipo T3p.....	20
Figura 11:	Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio	20
Figura 12:	Comportamento di ammasso e sostegno – linee caratteristiche	24
Figura 13:	Zoom del modello FEM 2D nella zona dell'apertura con sostegni.....	25
Figura 14:	Sollecitazione al momento, S1	25
Figura 15:	Sollecitazione allo sforzo normale, S1	26
Figura 16:	Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1	26
Figura 17:	Interazione M-N per la sezione di 10 cm di cls proiettato.....	27
Figura 18:	Sforzi nei bulloni, GSI=65.....	28
Figura 19:	Spostamenti assoluti per sezione tipo S1, GSI=65	29
Figura 20:	Zone plastiche per sezione tipo S1, GSI=65.....	29
Figura 21:	Comportamento di ammasso e sostegno – linee caratteristiche	30
Figura 22:	Comportamento di ammasso equivalente e sostegno – linee caratteristiche – GSI equivalente	31
Figura 23:	Zoom del modello FEM 2D con rappresentazione dei sostegni.....	32
Figura 24:	Sollecitazione al momento, S2, GSI=49.....	33
Figura 25:	Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=49.....	33
Figura 26:	Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=49.....	34
Figura 27:	Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls	35
Figura 28:	Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180	36
Figura 29:	Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=49	37
Figura 30:	Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=49	37

LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1:	Verifica del rivestimento al taglio sezione T3p	21
Tabella 2 –	Parametri di calcolo utilizzati nei modelli 2D.....	23
Tabella 3:	Sollecitazioni nel cls	26
Tabella 4:	Verifica a taglio.....	28
Tabella 5:	Sollecitazioni nella sezione mista	34
Tabella 6:	Sollecitazioni nel cls	34
Tabella 7:	Sollecitazioni nella centina	34

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

RESUME / RIASSUNTO

La présente note de calcul concerne la galerie Maddalena 1 et la galerie de connexion 1 qui la relie au site de sécurité de Clarea au droit du pk 52+589.5 VP du Tunnel de Base.

La note décrit le dimensionnement des deux ouvrages pour leur section courante. Plus particulièrement, pour Maddalena 1 il s'agit uniquement du dimensionnement du revêtement, tandis que pour la connexion 1 et Maddalena 1bis aussi bien du soutènement que du revêtement.

Les calculs ont été réalisés par des simulations 2D aux éléments finis ou alors par analogie au soutènement déjà mis en place ou encore aux calculs effectués pour le site de sécurité de Clarea.

La presente relazione di calcolo ha come oggetto la galleria di Maddalena 1 e la galleria di connessione 1 che la collega all'area di sicurezza di Clarea in corrispondenza della progressiva pk 52+589.5 BP del Tunnel de Base.

La relazione descrive il dimensionamento delle due opere per la loro sezione corrente. In particolare, per Maddalena 1 si tratta del dimensionamento del solo rivestimento definitivo, mentre per la connessione 1 sia del sostegno che del rivestimento.

I calcoli sono stati effettuati con simulazioni 2D agli elementi finiti o mediante analogie con il sostegno già messo in opera o ancora ai calcoli svolti per l'area di sicurezza di Clarea.

1. Introduzione

1.1 Generalità

Il cunicolo esplorativo della Maddalena è un'opera realizzata ai fini di una migliore conoscenza geologica/geomeccanica/idrogeologica dell'ammasso roccioso. Dal portale situato alla Maddalena, in comune di Chiomonte, la galleria si avvicina al Tunnel di Base e successivamente si dispone tra le due canne del Tunnel di Base, in posizione superiore e correndo parallela ad esse, per una lunghezza di circa 4 km.

Nel Progetto Definitivo Approvato la galleria aveva la funzione di accesso dei veicoli bimodali e dei servizi di soccorso all'area di sicurezza di Clarea per tutta la sua lunghezza. La variante progettuale a seguito della prescrizione n. 235 in fase di approvazione del Progetto Definitivo da parte del CIPE porta allo spostamento dell'area di sicurezza e quindi all'utilizzo di solo una parte della galleria per l'accesso dei soccorsi. Per la restante tratta della galleria, si prevede la messa in deposito delle rocce verdi.

La galleria di connessione 1 permette di collegare la galleria Maddalena 1 al Tunnel di Base in corrispondenza dell'area di sicurezza.

La galleria Maddalena 1bis è una galleria parallela a Maddalena 1 di lunghezza 1.1 km circa destinata allo stoccaggio delle rocce verdi.

L'obiettivo della presente relazione presenta il dimensionamento delle due opere per la loro sezione corrente. Il dimensionamento delle nicchie e della zona di innesto tra le due gallerie è trattato nel documento PRV_C3A_3835_26-48-20_10-03_Relazione di calcolo delle nicchie.

Nella galleria Maddalena 1, i sostegni di prima fase sono già stati messi in opera ed il dimensionamento riguarda solo il rivestimento definitivo. Si sono considerati i sostegni sulla base dell'as built e/o del Progetto Esecutivo del cunicolo esplorativo.

1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato

Si elencano di seguito le variazioni rispetto allo stesso documento emesso nel Progetto Definitivo Approvato; si rimanda alla relazione PRV_C3A_3820_26-48-20 per la descrizione delle modifiche geometriche e funzionali della galleria della Maddalena.

- **Titolo:** la presente relazione di calcolo riguarda anche la galleria di connessione 1 e la galleria Maddalena 1 bis, non ancora scavate e quindi provviste di sostegni provvisori. Le nicchie, in conformità con il Progetto Definitivo Approvato, sono state trattate in una relazione separata. Per questa ragione si è modificato il titolo da "relazione di calcolo dei rivestimenti definitivi" a "relazione di calcolo sezione corrente".
- **Sezioni di carpenteria, tratta scavata in tradizionale:** la sezione troncoconica in corrispondenza alla sezione tipo di sostegno T5 è già stata messa in opera, si rimanda alla verifica effettuata nel Progetto Esecutivo del cunicolo esplorativo. La sezione cilindrica, in corrispondenza della sezione tipo T3, è stata ottimizzata riducendone lo spessore.
- **Sezioni di carpenteria, tratta scavata con TBM:** per la tratta in cui la galleria viene utilizzata per l'accesso dei servizi di soccorso, ovvero fino alla PM 2220, si mantiene la sezione di carpenteria del Progetto Definitivo Approvato, eccezion fatta che la sezione non è più armata in corrispondenza della sezione tipo F5 alla luce della miglior qualità geomeccanica osservata e della minor copertura.

La tratta successiva viene utilizzata per lo stoccaggio delle rocce verdi: si dispone un rivestimento di cls proiettato al fine di proteggere l'impermeabilizzazione ed in fase definitiva la sezione viene ritombata completamente per cui non vi è più un rivestimento definitivo vero e proprio.

- Integrazione as built: le sezioni tipo di sostegno e la loro ripartizione sono state aggiornate sulla base dell'as built e/o, laddove non disponibile, il Progetto Esecutivo. Il Progetto Definitivo Approvato considerava il Progetto Definitivo ed il Progetto di Variante Tecnica.
- Integrazione ritorno di esperienza della Maddalena: si è integrato il ritorno di esperienza dello scavo per quanto riguarda gli aspetti geologici e geomeccanici.

2. Documenti di riferimento

2.1 Quadro normativo di riferimento

Il quadro normativo di riferimento è trattato nell'allegato 4.1 del Dossier Preliminare della Sicurezza (documento PRF_C1_0003_00-00-00_10-03).

2.2 Documenti di progetto

- PRV_C3A_3820_26-48-20 Relazione tecnica descrittiva
- PRV_C3A_3826_26-48-20 Carpenterie – sezioni correnti
- PRV_C3A_7572_26-48-20 Rivestimento-sezione corrente stoccaggio rocce verdi
- PRV_C3A_7577_26-48-20 Galleria Maddalena 1bis – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_7578_26-48-20 Galleria Maddalena 1bis – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_7579_26-48-20 Rivestimento - Galleria Maddalena 1bis
- PRV_C3A_7623_26-48-22 Sezione corrente doppio senso – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_7624_26-48-22 Sezione corrente doppio senso – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_7625_26-48-22 Sezione corrente doppio senso – sezione tipo sostegno S3
- PRV_C3A_7626_26-48-22 Sezione corrente senso unico – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_7627_26-48-22 Sezione corrente senso unico – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_7628_26-48-22 Sezione corrente senso unico – sezione tipo sostegno S3
- PRV_C3A_7632_26-48-22 Carpenterie – sezioni correnti
- Cunicolo Esplorativo de La Maddalena – progetto Esecutivo (MAD_EXE_...)
- Cunicolo Esplorativo de La Maddalena – As built (MAD_EXE_..._AS BUILT).

3. Quadro geologico, idrogeologico e geomeccanico

3.1 Gallerie Maddalena 1 e Maddalena 1bis

Il ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo della Maddalena viene descritto nella relazione PRV_C3B_7200_26-48-01. Si veda inoltre il profilo geomeccanico as built con applicazione delle sezioni tipo PRV_C3B_7206_26-48-01. Si rimanda a questi documenti per la descrizione del quadro geologico, idrogeologico e geomeccanico e del comportamento allo scavo osservato.

In corrispondenza della galleria Maddalena 1bis, l'ammasso roccioso (micascisti di Clarea) presenta valori dell'indice RMR variabili tra 42 e 67, classi geomeccaniche variabili da II a III e GSI compreso tra 45 e 70.

3.2 Galleria di connessione 1

Per quanto riguarda la galleria di connessione 1, si veda il profilo geomeccanico PRV_C3B_7208_26-48-01. La galleria attraversa i micascisti e gneiss del complesso di Clarea. Si prevedono alcune zone con fratturazione spaziata ma persistente ma nessuna di faglia e/o tettonizzata.

L'ammasso si presenta di buona qualità, con indice GSI nel range 55-70 ed indice RMR che varia da II a III secondo le tratte (RMR da 51 a 70), con RMR III dominante.

I fenomeni di rilascio in calotta osservati nel cunicolo potrebbero riprodursi, sebbene questi fenomeni non siano stati di grande entità nella tratta di cunicolo corrispondente alla galleria in oggetto (si sono messi in opera dei centinini solo su circa 35% del lineare e non si sono mai messe in opera centine pesanti con pannellature) e considerando anche le differenze tra metodo tradizionale e meccanizzato descritte nella relazione dei sostegni dell'area di sicurezza di Clarea (documento PRV_C3A_3730_26-46-20).

Dal punto di vista idrogeologico, si prevedono venute d'acqua superiori a 125 l/min su 10 m di tunnel solo per una tratta di circa 100 m.

La copertura della galleria varia da 780 a 1390 m.

4. Sezioni tipo di carpenteria galleria Maddalena 1

4.1 Sezione corrente – tratta di accesso dei servizi di soccorso

Le sezioni correnti della galleria comprendono i seguenti 2 tipi di carpenteria:

- Tratta scavata con TBM (figura 1). Il rivestimento ha uno spessore variabile tra 40 cm in chiave calotta e 60 cm in chiave arco rovescio.
- Tratta scavata in tradizionale – Sezione cilindrica, illustrata in figura 2. A tale carpenteria corrispondono le sezioni tipo di sostegno T3 e T3p, messe in opera dalla pk 0+117.6 alla pk 0+198. La calotta, in calcestruzzo non armato, ha uno spessore di 50 cm. La sezione è chiusa mediante una soletta orizzontale in calcestruzzo armato di spessore minimo 50 cm. Si è operata un'ottimizzazione di questa carpenteria rispetto al Progetto Definitivo Approvato in quanto corrispondente solo alla sezione tipo T3, più leggera, e non più alla sezione tipo T4, più pesante e corrispondente ad ammassi rocciosi di qualità più scadente (RMR IV), che non sono stati incontrati.

Per la tratta scavata in tradizionale con sezione troncoconica, corrispondente alle sezioni T5 e T5i, il rivestimento definitivo è già messo in opera.

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

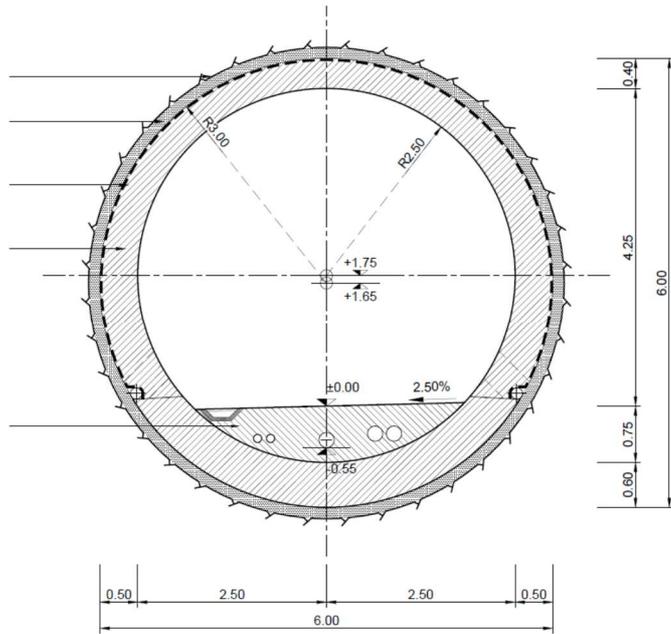


Figura 1: carpenteria tratta scavata con TBM

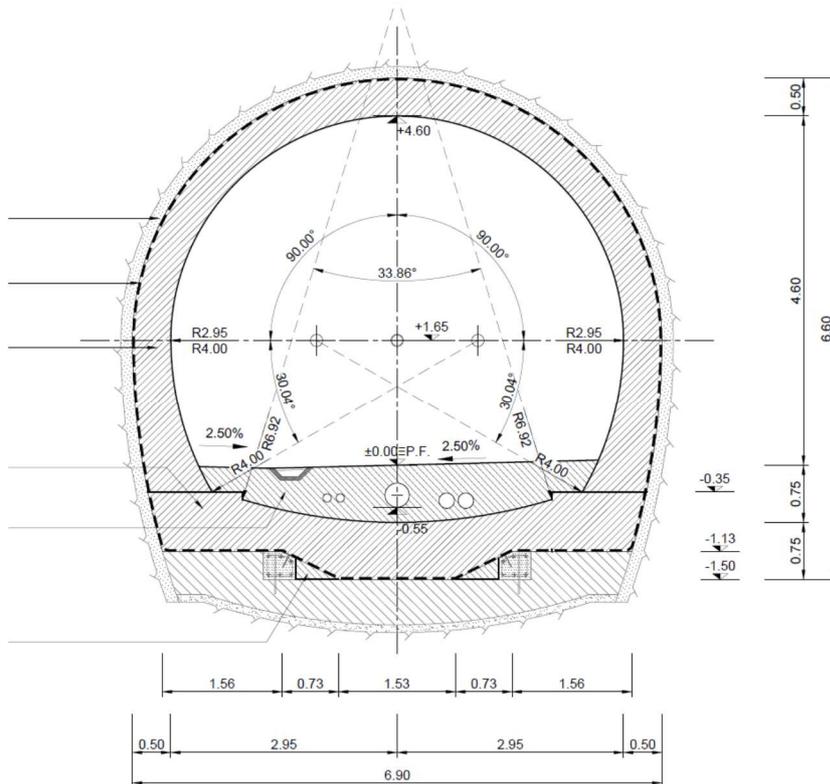


Figura 2: carpenteria tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T3 e T3p

Le sezioni tipo di sostegno messe in opera nel cunicolo sono descritte nella relazione PRV_C3B_7200_26-48-01.

4.2 Sezione corrente – tratta stoccaggio rocce verdi

La sezione viene descritta nella relazione PRV_C3A_3820_26-48-20. Al di sopra della membrana di impermeabilizzazione (a spruzzo) si proietta del cls proiettato di spessore 5 cm per evitare di rovinare la membrana durante le operazioni di manutenzione e posa dei contenitori. Questo costituisce l'unico rivestimento per questa tratta.

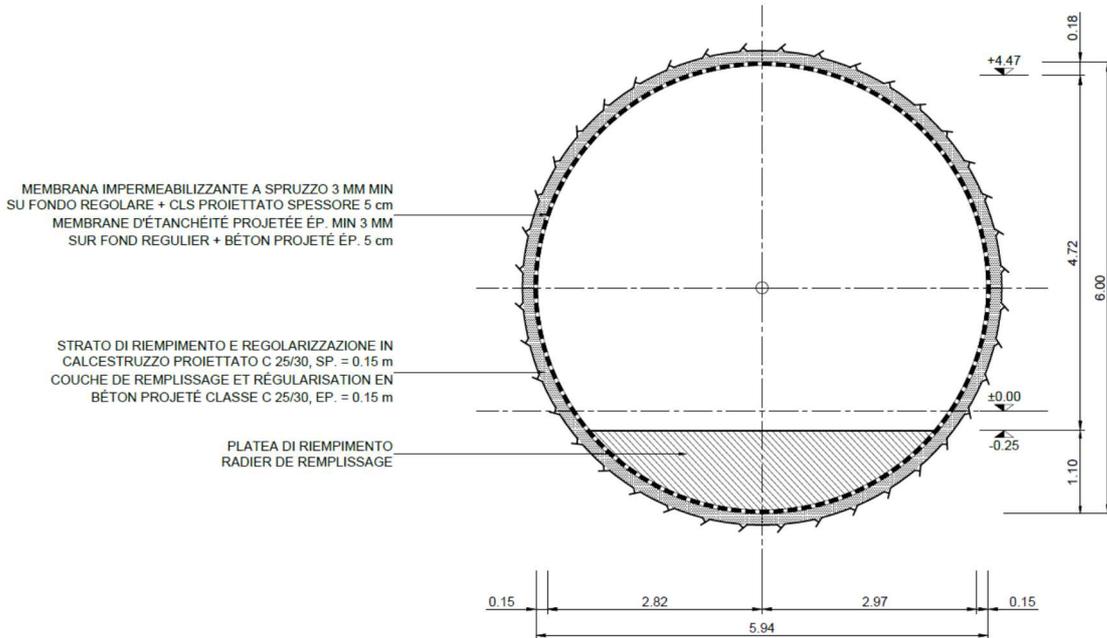


Figura 3: rivestimento tratta con stoccaggio delle rocce verdi

Dato che la sezione viene poi ritombata completamente, si può considerare che non vi è un rivestimento definitivo vero e proprio.

5. Sezioni tipo di sostegno e rivestimento galleria di connessione 1

Le stesse misure di sostegno definite per le gallerie dell'area di sicurezza di Clarea (si veda la relazione PRV_C3A_3730_26-46-20) sono state estese per la galleria di connessione 1, che presenta la stessa litologia e simile copertura. In particolare, a fronte del confronto geometrico in termini di forma e dimensioni (si veda la figura seguente) la sezione a senso unico di circolazione è stata assimilata alla sezione I-I e la sezione a doppio senso di circolazione alla sezione R-R, che è identica.

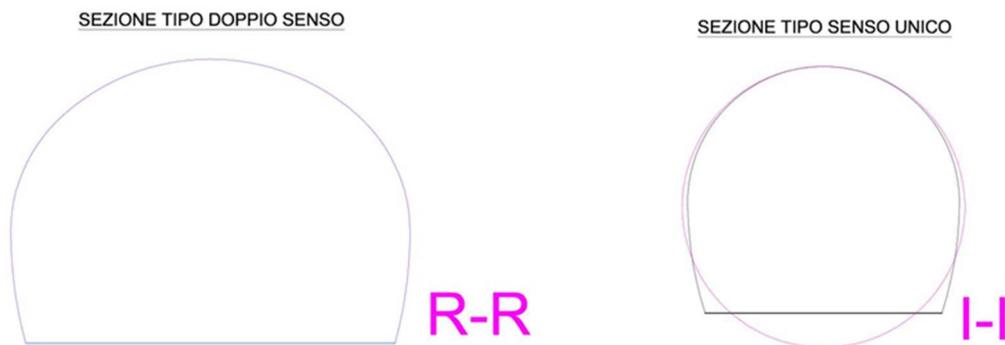


Figura 4: Confronto tra sezioni della galleria di connessione e dell'area di sicurezza di Clarea (in viola)

Data l'assenza di faglie ($GSI > 55$) e di importanti fenomeni di rilascio, non si è prevista una sezione tipo con centine HEB (denominata "sezione S3" per l'area di sicurezza).

Le tipologie di sostegno sono dunque le seguenti:

- **Tipo S1** (leggero): si compone di cls proiettato e di bullonature di tipo Swellex ed è previsto ai fini del controllo del sovrascavo, cadute di blocchi e defoliazioni del contorno di scavo ($GSI \geq 65$). Corrisponde alla sezione S1 dell'area di sicurezza.
- **Tipo S2** (medio): si compone di cls proiettato e di bullonature di tipo IBO in L1 e di tipo SN in L2. E' adatto per contrastare fenomeni di convergenza moderata del contorno del cavo e di moderata plasticizzazione ($GSI \sim 55-60$). Corrisponde alla sezione S2 dell'area di sicurezza.
- **Tipo S3** (per rilasci in calotta): si tratta di una sezione tipo analoga alla sezione tipo F3c1 del cunicolo. Oltre al cls proiettato, tale sezione tipo prevede una bullonatura densa e delle centine UPN in calotta con passo 1.2 m. Anche gli sfondi saranno pari a 1.2 m per seguire il passo delle centine e ridurre i fenomeni che si spiegano, nel caso del cunicolo, con una lunghezza non sostenuta pari a 6 m. Questa sezione corrisponde alla sezione S4 dell'area di sicurezza.

Per la definizione di L1 e L2 si veda la relazione PRV_C3A_3730_26-46-20.

Si ha un'unica sezione tipo di carpenteria associata alle tre tipologie di sostegno.

Lo spessore minimo del rivestimento è pari a 50 cm (in calotta ed in corrispondenza al dreno laterale).

6. Sezioni tipo di sostegno galleria Maddalena 1bis

Per questa galleria si sono definite le stesse misure di sostegno delle nicchie di Maddalena 1 (si veda la relazione PRV_C3A_3835_26-48-20), peraltro queste presentano la stessa forma e dimensioni molto simili (la galleria Maddalena 1bis è leggermente più piccola).

Si tratta delle seguenti sezioni tipo:

- **Sezione tipo S1**, composta da cls proiettato e bullonature. Viene applicata laddove le condizioni delle roccia e lo stato tensionale non sono tali da comportare fenomeni di convergenza ($GSI \geq 60$) ed in assenza di fenomeni importanti di rilascio (stimati sulla base delle sezioni tipo messa in opera nel cunicolo). La bullonatura ha la sola funzione di cucitura dei blocchi di roccia instabili.
- **Sezione tipo S2**, composta da cls proiettato e centine HEB 180. Viene applicata nel caso di ammassi di qualità da mediocre a discreta, mediamente fratturata ($45 \leq GSI < 60$). La presenza delle centine garantisce infatti una certa pressione di confinamento nel caso di fenomeni di plasticità moderata nell'intorno dello scavo. Viene inoltre applicata per i fenomeni di rilascio in calotta di una certa importanza, come osservati durante lo scavo del cunicolo esplorativo.

Le zone con $GSI < 60$ costituiscono una percentuale molto bassa. In queste zone, nel cunicolo si sono messe in opera le sezioni tipo F4 e F5.

Si stima inoltre che, nel caso di $GSI \geq 60$, laddove nel cunicolo sono state messe in opera le sezioni tipo F4 – al 100% – e FMV – al 50% –, si avranno fenomeni di rilascio di una certa

importanza tali da necessitare la messa in opera di sostegni più pesanti, ovvero la sezione tipo S2. La sezione tipo FMV è stata messa in opera per il 90% circa della tratta di cunicolo parallela a Maddalena 1bis. Si definisce dunque la seguente ripartizione delle **sezioni tipo: S1 (45%), S2 (55%)**.

Per il rivestimento, valgono le considerazioni descritte al § 4.2.

7. Dimensionamento galleria Maddalena 1

7.1 Generalità

Fino al PM 2220, si ha un rivestimento definitivo progettato per durare per la vita utile dell'opera, ovvero 120 anni. Il dimensionamento è stato svolto mediante analisi FEM 2D o a partire dai sostegni di prima fase messi in opera nel cunicolo esplorativo. In particolare, per la sezione scavata con TBM, di forma circolare, si è verificato come gli spessori del rivestimento sono tali da garantire una capacità resistente almeno uguale a quella dei sostegni, incrementata dei fattori di sicurezza previsti dalla normativa vigente. Per la sezione scavata in tradizionale e non ancora provvista di rivestimento (corrispondente alle sezioni tipo T3 e T3p) si è eseguita un'analisi FEM 2D.

Nella zona di deposito delle rocce verdi, dato il lasso di tempo limitato tra messa in opera del rivestimento in cls proiettato e le operazioni di stoccaggio e riempimento (vedere relazione PRV_C3A_7610_33-02-02), il rivestimento non presenta un ruolo strutturale in quel periodo.

Al momento del degrado dei sostegni esistenti, la sezione sarà riempita di malta cementizia negli interstizi tra rivestimento e contenitori. Ciascun contenitore costituisce peraltro un blocco solido, in quanto gli interstizi tra i frammenti di roccia vengono riempiti con addensante costituito da polimeri a catena lunga. Viene quindi a crearsi un confinamento radiale su tutto il contorno dello scavo che si oppone alla pressione dell'ammasso agente in precedenza sui sostegni, garantendone la stabilità.

L'assenza di drenaggio e la presenza di un'impermeabilizzazione totale non generano una pressione sulla sezione: le due canne del Tunnel di Base dal PM 3000 circa alla fine della galleria e la galleria di connessione 2 (dal PM 2245 al PM 3000 circa) si trovano infatti in prossimità ed al di sotto di Maddalena 1, per cui fungono da dreno. L'acqua circola nelle fessure dell'ammasso roccioso e, trovando impedita la via verso Maddalena 1, si crea un percorso fino alle gallerie sottostanti.

Alla luce di queste considerazioni, non sono necessari particolari calcoli per la tratta di stoccaggio delle rocce verdi.

7.2 Materiali e resistenze di calcolo

Di seguito sono riportati i materiali (e le relative resistenze di calcolo) adottati per i sostegni di prima fase e per i rivestimenti definitivi. Come anticipato, i primi sono definiti nel Progetto Esecutivo o as built del cunicolo esplorativo, mentre i secondi sono oggetto della presente fase progettuale. I coefficienti di sicurezza parziali sono conformi alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) per entrambi i progetti.

7.2.1 Materiali adottati per i sostegni

Calcestruzzo proiettato classe C20/25:

Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 13.3 \text{ MPa}$$

dove:

$\gamma_c = 1.5$ coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo

Acciaio da carpenteria S275:

Resistenza caratteristica a snervamento: $f_{yk} = 275 \text{ MPa}$

Resistenza a snervamento di calcolo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 262 \text{ MPa}$$

dove:

$\gamma_s = 1.05$ coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio da carpenteria

7.2.2 Materiali adottati per i rivestimenti definitivi

Calcestruzzo di classe C30/37:

Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ MPa}$$

dove:

$\alpha_{cc} = 0.85$ coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata

$\gamma_c = 1.5$ coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo.

7.3 Verifica del rivestimento definitivo della tratta scavata con TBM

7.3.1 Metodologia

La capacità resistente del rivestimento è stata verificata in termini di pressione radiale massima, ottenuta a partire dallo sforzo normale resistente della sezione di calotta mediante la formulazione di Mariotte, basata sulle seguenti assunzioni:

- Rivestimento di spessore costante e sottile
- Carichi radiali assialsimmetrici

Si è verificato che lo spessore del rivestimento in calotta sia tale da assicurare una capacità resistente pari almeno a quella dei rivestimenti di prima fase della sezione tipo più pesante messa in opera nel cunicolo. Lungo la tratta scavata con TBM, l'analisi delle sezioni tipo messe in opera (indicate nel profilo PRV_C3B_7206_26-48-01) mostra che, per le condizioni maggiormente sfavorevoli (corrispondenti generalmente alle zone di faglia), è stata messa in opera la sezione tipo di scavo e sostegno F5. Tale sezioni tipo risulta peraltro essere stata

verificata dal Progetto Esecutivo del cunicolo esplorativo; le verifiche sono contenute nelle relazioni di calcolo MAD_EXE_0144_08-01-00_10-02 per la tratta fissa (fino al PM 5765) e MAD_EXE_0174_08-02-00_10-02 per la tratta opzionale (dal PM 5765 fino alla fine della galleria). Le osservazioni durante lo scavo sono in linea con le ipotesi di calcolo in sede di Progetto Esecutivo.

Nella tratta con impermeabilizzazione full round ed in presenza di venute d'acqua, si è inoltre verificato che in quelle condizioni il rivestimento possa riprendere la pressione idrostatica massima pari a 10 bar.

La capacità resistente è espressa come segue:

$$p_{res} = \frac{N_{rd}}{R}$$

dove:

N_{rd} : sforzo normale resistente di calcolo

R: raggio della galleria, calcolato sul filo esterno dei sostegni

La pressione di calcolo agente sui rivestimenti definitivi è stata ottenuta moltiplicando la capacità resistente dei sostegni per un fattore $\gamma_G = 1.3$, corrispondente al fattore di sicurezza parziale per le azioni permanenti prescritto dalle NTC 2008.

7.3.2 Calcoli

Capacità resistente dei sostegni

I sostegni adottati per tale sezione sono costituiti da 2 centine accoppiate HEB120 in acciaio S275 disposte con passo pari a 0.42 m.

L'area della sezione di ciascuna centina è pari a:

$$A_{cen} = 34 \text{ cm}^2$$

Considerando una sezione di larghezza pari a 1.0 m (il calcolo è effettuato per 1.0 m di galleria), l'area di acciaio sarà pari a:

$$A_s = \frac{2 \cdot A_{cen}}{\text{passo}} = 162 \text{ cm}^2$$

Lo sforzo normale resistente sarà dato pertanto dal solo contributo delle centine:

$$N_{rd,sost} = A_s \cdot f_{yd} = 4244 \text{ KN}$$

La capacità resistente dei sostegni è data quindi da:

$$p_{res,sost} = \frac{N_{rd,sost}}{R} = 1347 \text{ kPa}$$

Dove:

$$R = 3.15 \text{ m.}$$

Pressione idrostatica

Al PM 318 vi è una venuta d'acqua, di circa 5 l/s secondo le ultime misure (quindi le più prossime alla stabilizzazione). Si assume che in corrispondenza di quella progressiva il carico idraulico sia ancora inferiore a 100 m. Si ricorda come si dispone un'impermeabilizzazione

totale nel caso di carico idraulico inferiore a 100 m, mentre se questo è superiore la sezione viene drenata (per maggiori dettagli si veda la relazione relativa al drenaggio PRV_C3A_3831_26-48-25).

La sezione tipo messa in opera a quella progressiva è la sezione tipo F2, il che significa che sono state installate solo bullonature occasionali. La pressione dell'ammasso è dunque minima e la pressione idrostatica è pari a 1000 kPa.

La situazione con sezione tipo F5 in zona di faglia è dunque dimensionante.

La pressione di calcolo agente sui rivestimenti è pari a:

$$p_d = \gamma_G \cdot p_{\text{res, sost}} = 1.3 \cdot 1347 = 1751 \text{ KPa}$$

Capacità resistente del rivestimento

La verifica del rivestimento definitivo è stata svolta assumendo lo spessore minimo in corrispondenza dei dreni, pari a 0.35 m.

Lo sforzo normale resistente per una sezione larga 1.0 m in calcestruzzo di classe C30/37 è pari a:

$$N_{\text{rd, riv}} = A_c \cdot f_{\text{cd}} = 5950 \text{ KN}$$

dove:

$$A_c = 0.35 \cdot 1.0 = 0.35 \text{ m}^2$$

$$A_s = 1608 \text{ mm}^2 = 0.00161 \text{ m}^2$$

La capacità resistente è infine pari a:

$$p_{\text{res, riv}} = \frac{N_{\text{rd, riv}}}{R} = 1888 \text{ KPa} > p_d$$

dove:

$$R = 3.15 \text{ m}$$

La capacità resistente del rivestimento è maggiore della pressione di calcolo (FS=1.1).

La verifica è dunque soddisfatta.

7.4 Verifica del rivestimento definitivo della tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T3-T3p

La sezione T3p viene utilizzata per condizioni geomeccaniche peggiori e rappresenta quindi il caso determinante per il dimensionamento.

7.4.1 Metodologia

Al fine di verificare il rivestimento definitivo, la sezione viene implementata in un modello FEM 2D con il programma ZSoil. Grazie alla simulazione dello scavo, la messa in opera del sostegno già presente (T3p) e in seguito del rivestimento definitivo, è possibile estrapolare i diagrammi di momento, sforzo normale e di taglio nella sezione.

Si effettua dunque la verifica a pressoflessione e ad interazione di taglio e sforzo normale.

Il sostegno esistente è stato modellato con elementi "BEAM", rappresentativi della sezione mista centine-calcestruzzo, aventi i parametri seguenti:

$$t_{eq} = 0.25 \text{ m}$$
$$E_{eq} = 11.9 \text{ GPa}$$

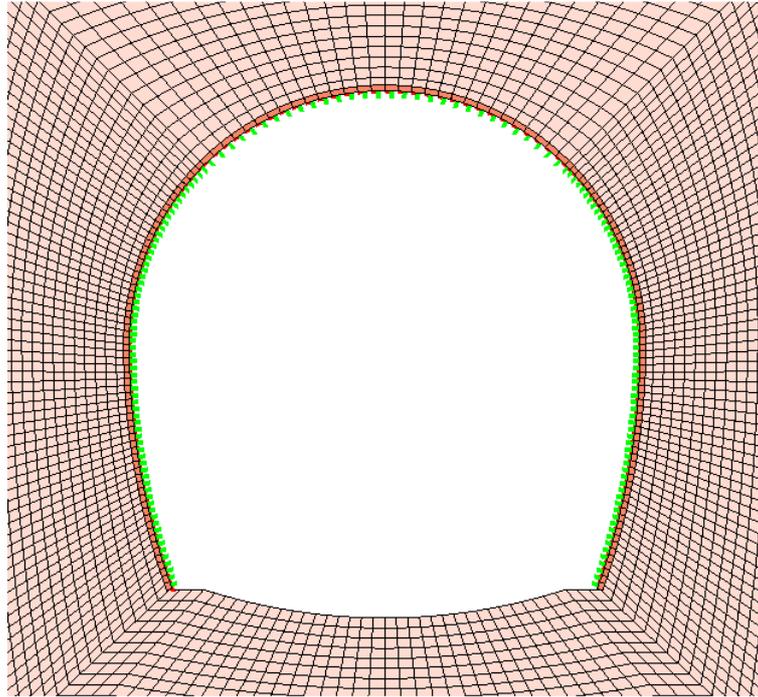


Figura 5: Modello FEM2D per il calcolo della sezione tipo T3p – modellazione dei sostegni

Si considera una distanza di posa pari a 2 m, che porta ad un tasso di deconfinamento del 76% (percentuale di rilascio libero).

Il rivestimento definitivo viene modellato con elementi volumici caratterizzati da un comportamento elastico con le proprietà del cls.

La figura seguente mostra il modello del rivestimento definitivo.

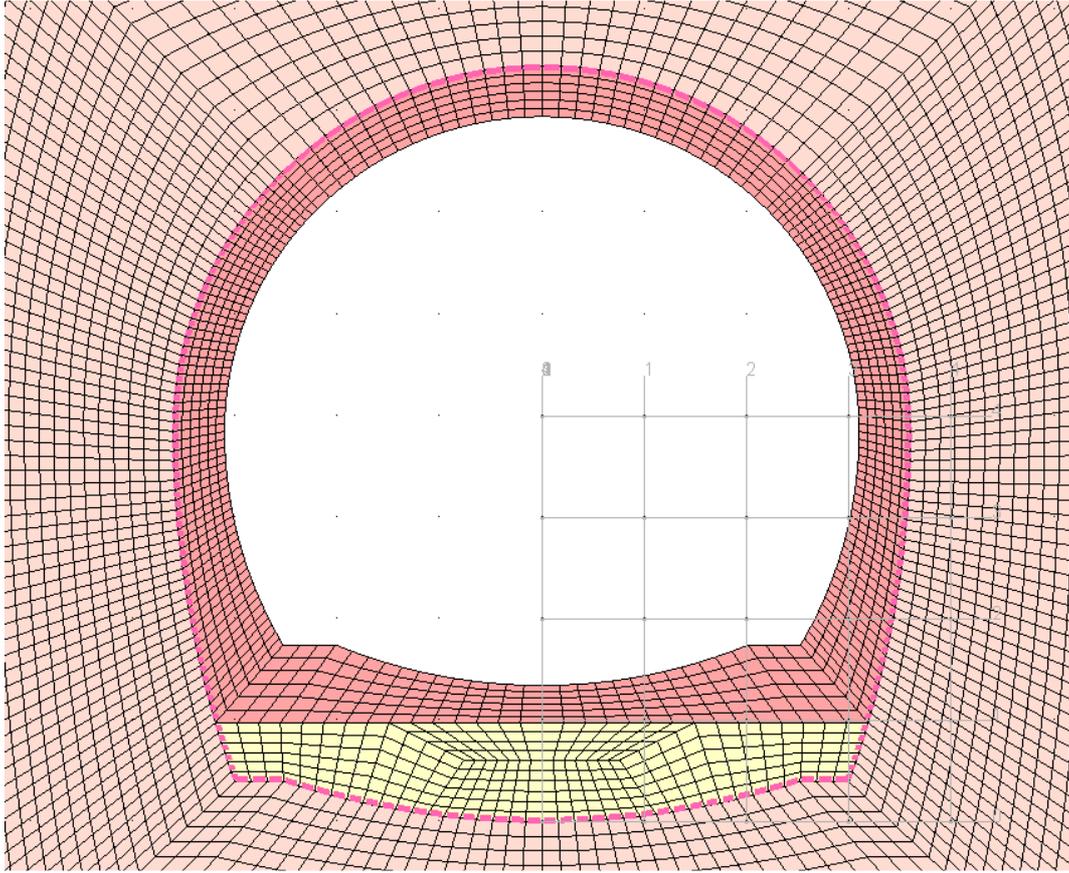


Figura 6: Modello FEM2D per il calcolo della sezione tipo T3p – modellazione dei rivestimenti

La parte di rivestimento in arco rovescio (illustrata in giallo) è preesistente e non verrà dunque presa in conto nella verifica strutturale.

7.4.2 Parametri geomeccanici

Le sezioni tipo T3 e T3p sono state applicate nelle litologie seguenti: dolomie (DGA), micascisti e scisti carbonatici (CMS).

Il valore di GSI minimo rilevato nella tratta di applicazione di tali sezioni tipo è pari a 47.

Altri parametri geomeccanici per questa tratta non sono stati misurati o comunque non sono disponibili dai dati provenienti dallo scavo disponibili da TSE3.

Nel Progetto Esecutivo del cunicolo (relazione MAD_EXE_0240_07-00-00_10-06), in questa tratta (in cui si prevedeva di mettere in opera le sezioni tipo T3, T4 e T4a) si prevedevano principalmente degli scisti carbonatici filladici (GCC), che, pur non corrispondendo dal punto di vista litologico (specie per le dolomie), sono assimilabili dal punto di vista geomeccanico alle litologie incontrate. Si considerano dunque i parametri di calcolo considerati nel Progetto Esecutivo per queste unità, che sono i seguenti:

Peso volumico γ [kN/m ³]	Geological Strength Index GSI [-]	Resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} [MPa]	Costante di Hoek-Brown m_i [-]	Fattore di disturbo D [-]	Modulo elastico dell'ammasso roccioso E_{rm} [MPa]
27	40	40	4	0	3986

La copertura massima della tratta di applicazione di questa tratta è 75 m. Si considera la tensione verticale pari alla litostatica.
Lo stato tensionale orizzontale è caratterizzato da $k_0=1$.

7.4.3 Pressione idrostatica

Sebbene tra sostegno esistente (compreso l'arco rovescio) e rivestimento si disponga un'impermeabilizzazione full round sulla base dei principi generali (impermeabilizzazione full round nel caso di pressione idrostatica inferiore a 10 bar), si considera una pressione idrostatica nulla in quanto, secondo il ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena, non si sono registrate venute d'acqua nella tratta di applicazione delle sezioni T3 e T3p.

7.4.4 Calcoli

Effetti delle azioni:

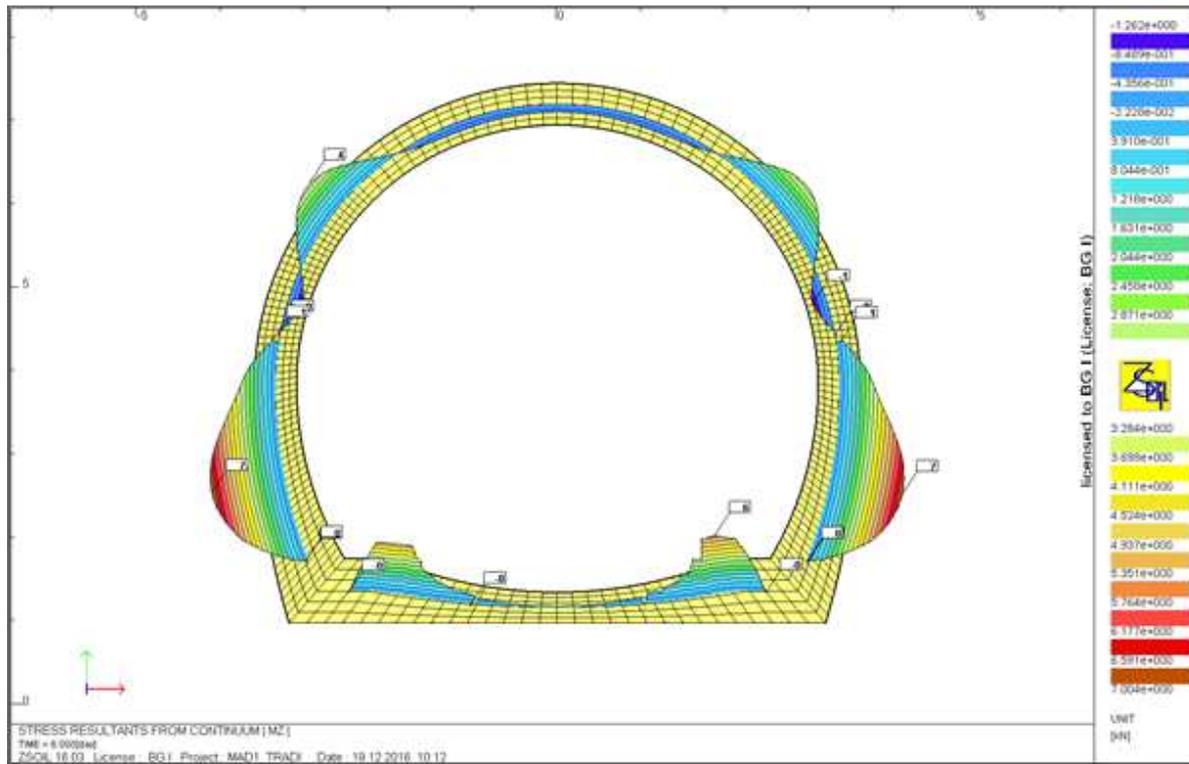


Figura 7: Diagramma dei momenti – sezione tipo T3p

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

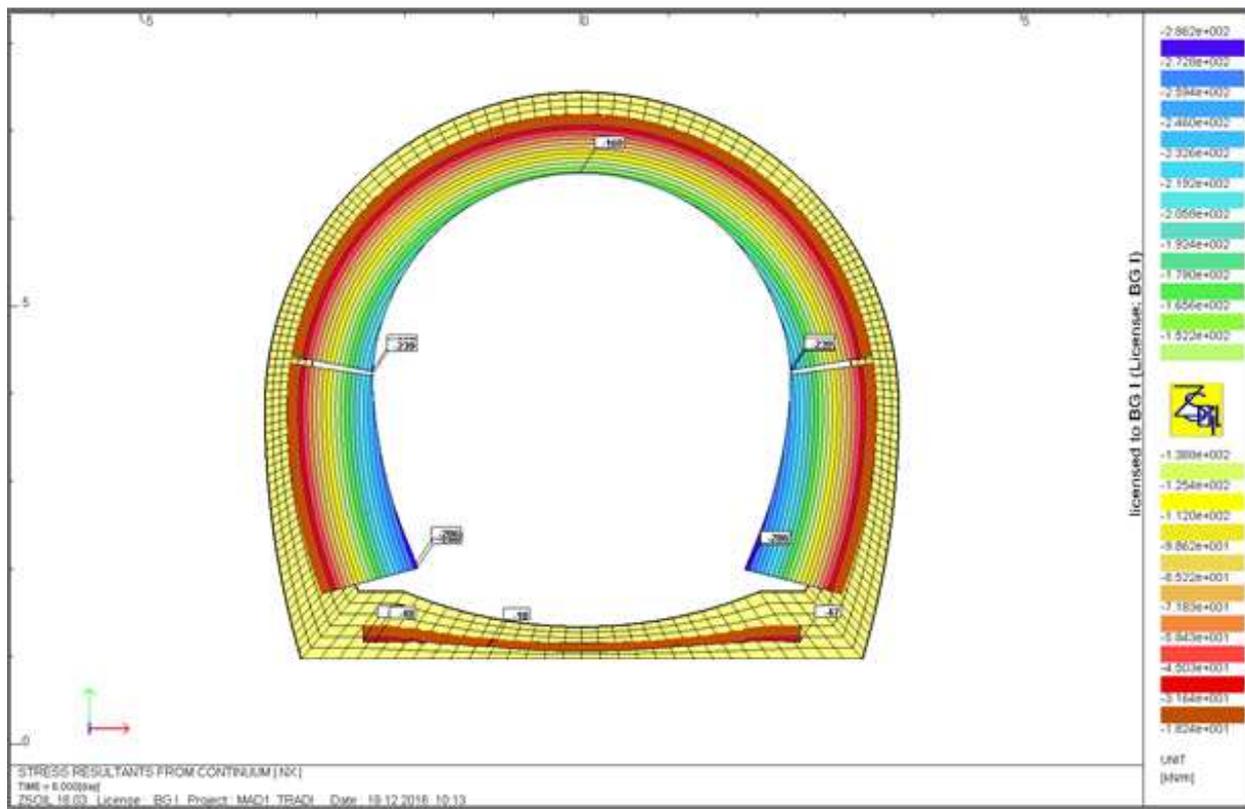


Figura 8: Diagramma degli sforzi normali – sezione tipo T3p

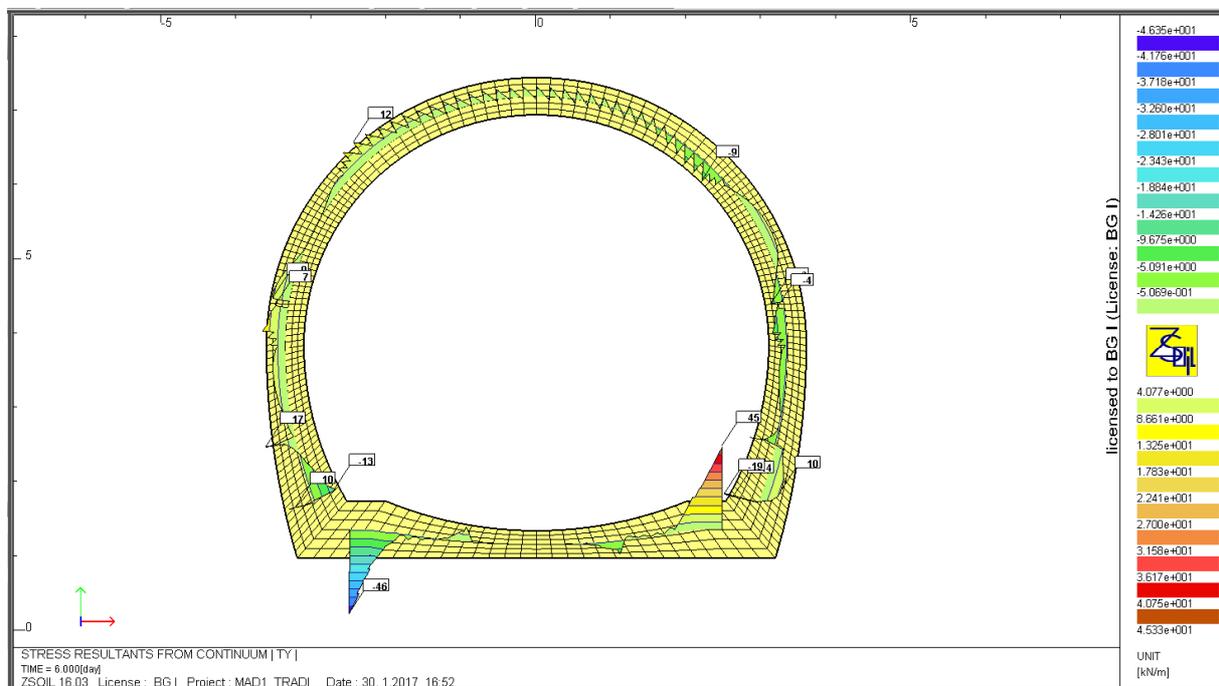


Figura 9: Diagramma degli sforzi di taglio – sezione tipo T3p

Verifica a pressoflessione:

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,5 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	0,85
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ELU} =	1,3

Résultats

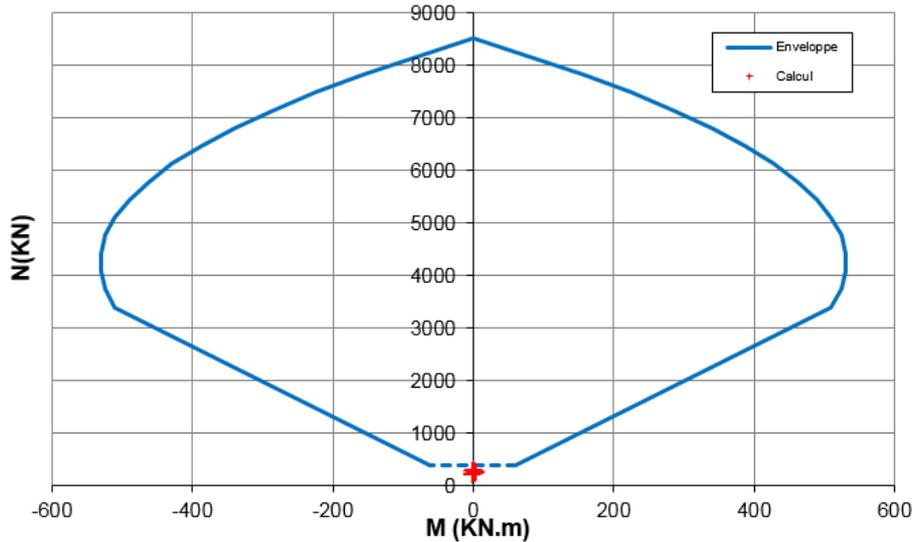


Figura 10: Diagramma d'interazione M+N – sezione tipo T3p

La sezione in calcestruzzo non armato è verificata con un fattore di sicurezza di FS >> 1.

Verifica all'interazione di taglio e sforzo normale:

Per rivestimenti non armati, la resistenza al taglio si valuta secondo la raccomandazione AFTES GT29 ("Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec les Eurocodes") con:

$$\tau_{cp} \leq f_{cvt}$$

Sollecitazione

$$\tau_{cp} = 1.5 \frac{V_{Ed}}{A_{cc}}$$

$$A_{cc} = b \cdot x$$

x: spessore compresso secondo la figura 11.

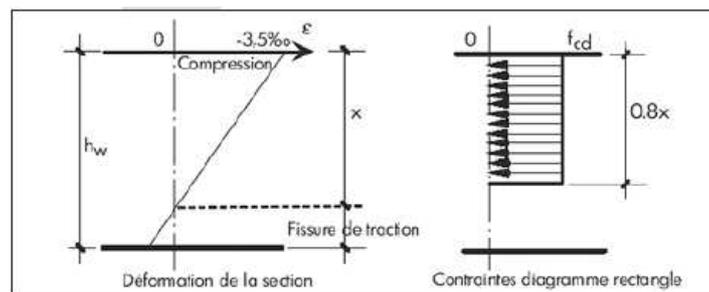


Figura 11: Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio

Resistenza

$$f_{cva} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad \text{se} \quad \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}$$

$$f_{cva} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd} - \left(\frac{(\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim})}{2}\right)^2} \quad \text{se} \quad \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}$$

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd}(f_{ctd} + f_{cd})}$$

Tra tutte le coppie N-V viene illustrata quella da cui risulta il fattore di sicurezza minore.
 La sezione dimensionante è la seguente:

V _{Rd} [kN]	x [m]	τ _{cp} [MPa]	σ _{cp} [MPa]	f _{ctd} [MPa]	σ _{clim} [MPa]	f _{cva} [MPa]	Verifica	FS
-60,25	0,5	-0,18	0,12	1,15	7,87	1,21	OK	6,7

Tabella 1: Verifica del rivestimento al taglio sezione T3p

Conclusioni

Nessuna armatura strutturale è necessaria per le verifiche statiche.

7.5 Tratta scavata in tradizionale – sezioni tipo T5-T5i

Il rivestimento delle sezioni tipo T5 e T5i, già presente, è stato verificato nell'ambito del Progetto Esecutivo del cunicolo esplorativo. Si rimanda al documento MAD_EXE_0261_07-00-00_10-03 "Galleria naturale – scavo in tradizionale – rivestimenti definitivi – relazione di calcolo".

8. Dimensionamento galleria di connessione 1

I sostegni ed i rivestimenti della sezione corrente a senso unico (superficie di scavo: 30 m²) sono verificati tramite le sezioni "piccole" dell'area di sicurezza di Clarea, ovvero mediante la sezione I-I (superficie di scavo: 35 m²) e le sezioni tipo S1, S2 e S4.

I sostegni ed i rivestimenti della sezione corrente a doppio senso sono verificati tramite la sezione R-R dell'area di sicurezza di Clarea, identica ad essa, e le sezioni tipo S1, S2 e S4.

Per la definizione delle sezioni tipo lungo la tratta valgono le regole definite nella relazione PRV_C3A_3730_26-46-20, considerando S4 per la sezione S3 della galleria di connessione.

Sulla base del profilo geomeccanico PRV_C3B_7208_26-48-01, si definisce la seguente ripartizione delle sezioni tipo lungo la tratta:

- **Tratta a senso unico: S1 (35%), S2 (60%) e S3 (5%).**
- **Tratta a doppio senso: S1 (60%), S2 (30%) e S3 (10%).**

9. Dimensionamento galleria Maddalena 1bis

9.1 Metodologia

Al fine di verificare la capacità resistente dei sostegni, la sezione viene implementata in un modello FEM 2D in condizioni di deformazione piana con il programma ZSoil. Grazie alla simulazione dello scavo e della messa in opera del sostegno, è possibile estrapolare i diagrammi di momento, sforzo normale e di taglio nella sezione. Il tasso di deconfinamento da inserire nel modello viene determinato mediante un'analisi con le linee caratteristiche.

Si effettua dunque la verifica a pressoflessione e ad interazione di taglio e sforzo normale.
Il rivestimento non viene verificato per le ragioni già descritte al § 7.1.

9.2 Materiali e resistenze di calcolo

9.2.1 Materiali adottati per i sostegni

Calcestruzzo proiettato classe C25/30:

Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 16.6 \text{ MPa}$$

dove:

$\gamma_c = 1.5$ coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo

Acciaio da carpenteria S235 per centine HEB:

Resistenza caratteristica a snervamento: $f_{yk} = 235 \text{ MPa}$

Resistenza a snervamento di calcolo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 252 \text{ MPa}$$

dove:

$\gamma_s = 1.05$ coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio da carpenteria

Bullonatura tipo Swellex Mn24:

Resistenza caratteristica di rottura: $F_{tk} = 200 \text{ kN}$

Resistenza di calcolo: $F_{td} = \frac{F_{tk}}{\gamma_s} = 190.5 \text{ MPa}$

dove:

$\gamma_s = 1.05$ coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio da carpenteria

9.3 Parametri geomeccanici e stato tensionale

La sezione tipo S1 si applica nel caso di ammassi rocciosi competenti. Si è quindi definito un GSI pari a 65. I parametri della roccia intatta sono relativi ai micascisti di Clarea, ovvero all'unità UGD(7) della classificazione geomeccanica generale (si veda la relazione PRV_C3B_0100_00-03-03), che sono stati sostanzialmente confermati dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena. Si considerano i valori medi di tali parametri.

Sulla base del ritorno di esperienza della Maddalena, si considera precauzionalmente un k_0 pari a 1.3 ed una tensione verticale pari alla litostatica. La massima copertura per questa galleria è pari a 1800 m circa.

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

La sezione tipo S2 si applica invece in ammassi rocciosi più fratturati. Il cunicolo della Maddalena ha incontrato, nella tratta in corrispondenza a Maddalena 1bis, un GSI minimo pari a 45 per una lunghezza di 30 m (ad una copertura pari a 1550 m). Per i parametri della roccia intatta si considerano sempre quelli della classificazione geomeccanica generale. Si considera un $k_0=1$ e tensione verticale corrispondente alla litostatica.

I parametri geomeccanici considerati per i calcoli (secondo i criteri di rottura di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb) sono sintetizzati nella tabella seguente.

Sezione tipo	GSI [-]	UCS [MPa]	D [-]	m_i [-]	c [MPa]	ϕ [°]	ψ [°]	E_i [GPa]	E_{rm} [GPa]	ν [-]	γ [kN/m ³]	k_0	H [m]
S1	65	97,9	0	10	6.3	34.8	8.7	78	49.27	0.25	27.7	1.3	1800
S2	45	97,9	0	10	3.7	31.4	7.85	78	17.74	0.25	27.7	1	1500

Legenda:

GSI: Geological Strength Index

UCS: resistenza a compressione monoassiale

D: fattore di disturbo secondo il criterio di Hoek-Brown

m_i : costante di Hoek-Brown

ϕ : angolo di resistenza al taglio (criterio di Mohr-Coulomb)

c: coesione (criterio di Mohr-Coulomb)

Ψ : angolo di dilatanza

E_i : modulo elastico della roccia intatta

E_{rm} : modulo elastico dell'ammasso roccioso

ν : coefficiente di Poisson

γ : peso specifico

k_0 : rapporto tra tensione orizzontale e tensione verticale (stato tensionale in situ dell'ammasso roccioso)

H: copertura considerata per determinare la tensione verticale (γH)

Tabella 2 – Parametri di calcolo utilizzati nei modelli 2D

Il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato calcolato a partire dal modulo elastico della roccia intatta mediante la formulazione di Hoek & Diederichs (2006) implementata nel software RocLab (Rocscience). La dilatanza è stata calcolata mediante l'espressione seguente (da letteratura): $\psi = \frac{1}{4} \phi$.

9.4 Sezione tipo S1

9.4.1 Analisi convergenza-confinamento

Nel metodo di convergenza-confinamento, si è utilizzata una legge di comportamento di tipo Mohr-Coulomb ottenuta per interpolazione del criterio di Hoek-Brown mediante l'ausilio del software Roclab (Rocscience).

Si è utilizzato il raggio della calotta per il raggio dell'intera sezione circolare.

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

La pressione iniziale p_0 è pari ad un valore medio tra la tensione verticale e quella orizzontale.

La distanza di posa dal fronte è stata calcolata mediante la formula seguente:

$$d_{\text{calcolo}} = d_1 + d_2 = 5 \text{ m}$$

con:

$d_1 = 1 \text{ m}$ presa del cls proiettato di prima fase

$d_2 = 4 \text{ m}$ volata

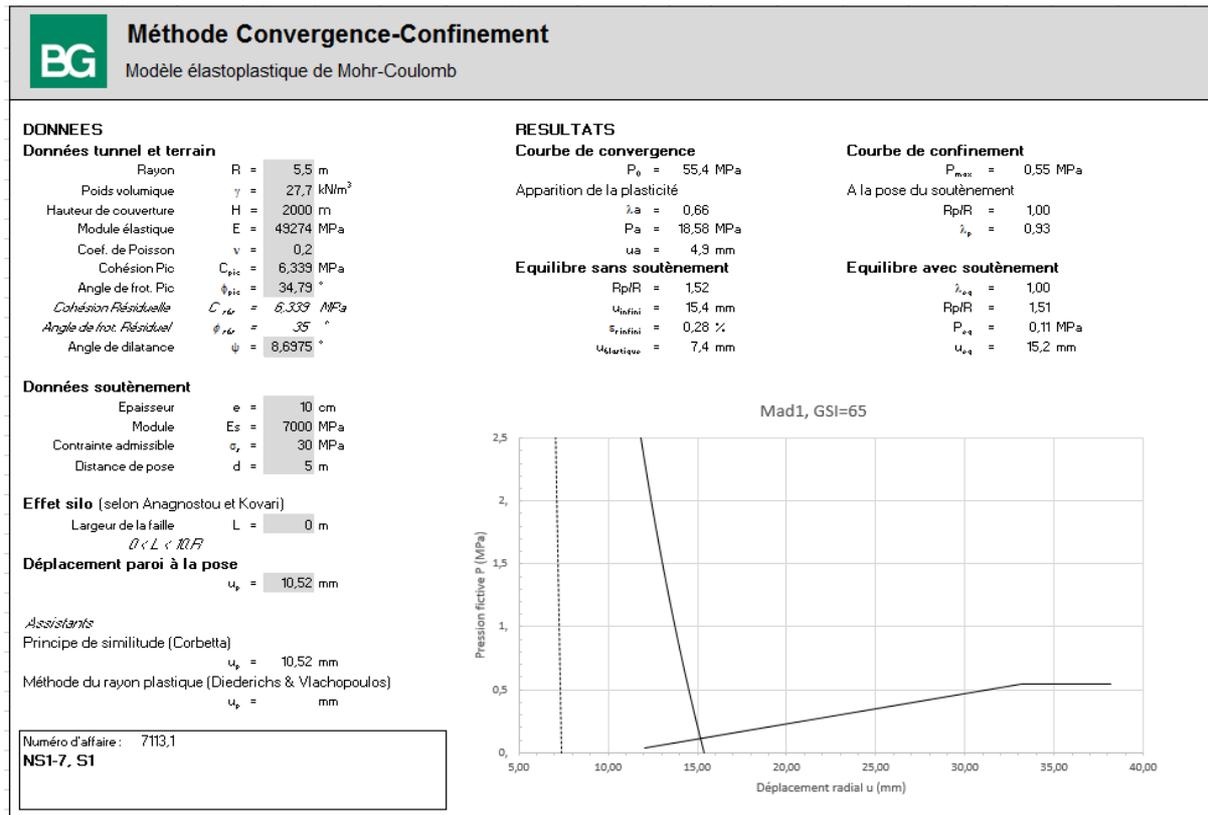


Figura 12: Comportamento di ammasso e sostegno – linee caratteristiche

Il tasso di deconfinamento ottenuto è di $\lambda=0.93$: il sostegno viene attivato quando il 93% della convergenza in termini di pressione è già avvenuta.

Gli spostamenti attesi ai contorni di scavo sono dell'ordine di 1.5 cm e lo spessore della banda plastica di 2.8 m.

9.4.2 Modello numerico

La sezione viene scavata in una sola fase, il modello dei sostegni è illustrato nella figura seguente:

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

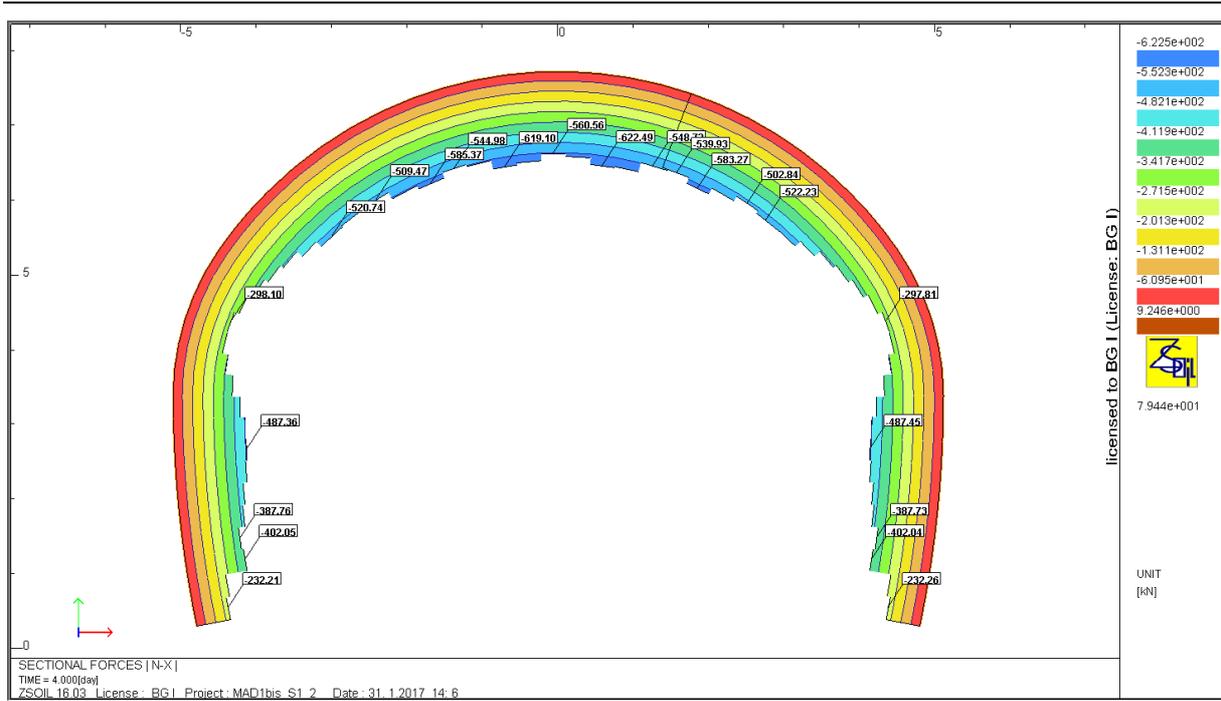


Figura 15: Sollecitazione allo sforzo normale, S1

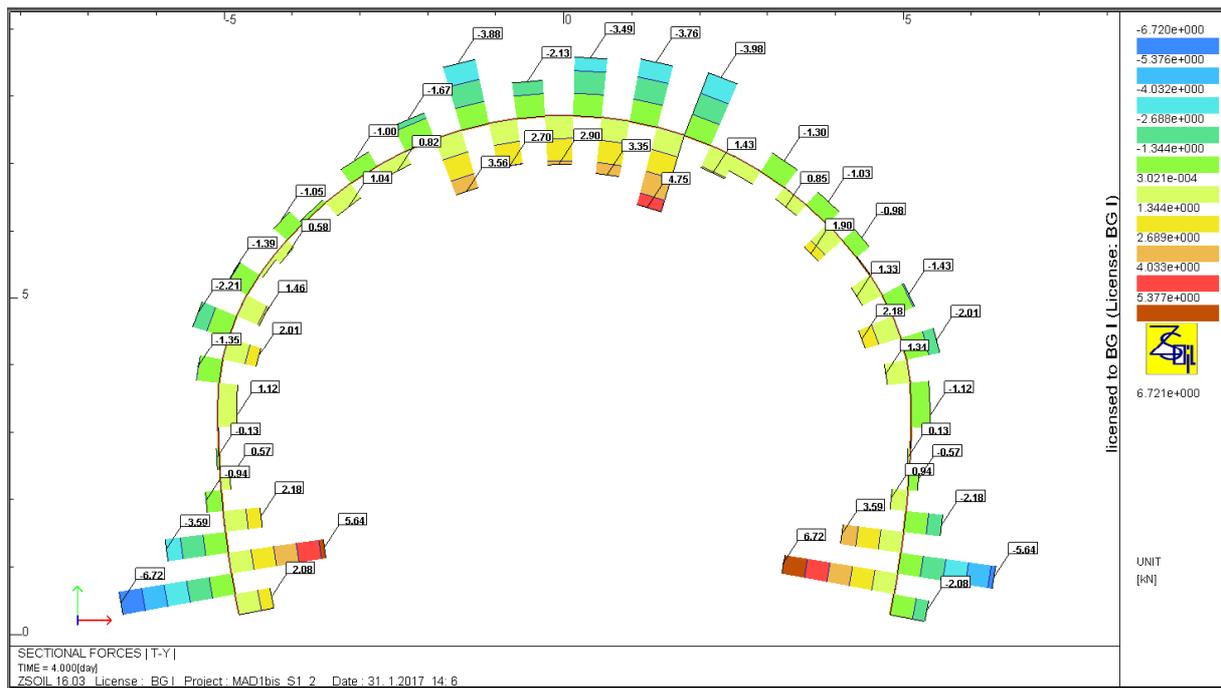


Figura 16: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1

	Mb,SLS [kNm]	Nb,SLS [kN]	Vb,SLS [kN]	Mb,SLU [kNm]	Nb,SLU [kN]	Vb,SLU [kN]
N _{max} ,M,V	-1,44	402,50	-6,72	-1,87	523,25	-8,74
N,M _{max} ,V _{max}	-0,62	622,50	3,56	-0,81	809,25	4,63

Tabella 3: Sollecitazioni nel cls

Verifica dell'interazione M e N

La verifica è svolta con il diagramma di interazione definito dalle raccomandazioni AFTES GT29 e GT7 ("L'utilisation du béton non armé en tunnel"). In modo conservativo, la presenza di fibre in acciaio nel calcestruzzo è stata trascurata sebbene sia prevista durante la messa in opera.



Calcul de la courbe d'interaction du béton non fibré
 selon les recommandations de l'AFTES "utilisation du béton non armé en tunnel"
 et "compatibilité avec les Eurocodes"
 BG - 2014

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,1 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	25 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ELU} =	1,3

Résultats

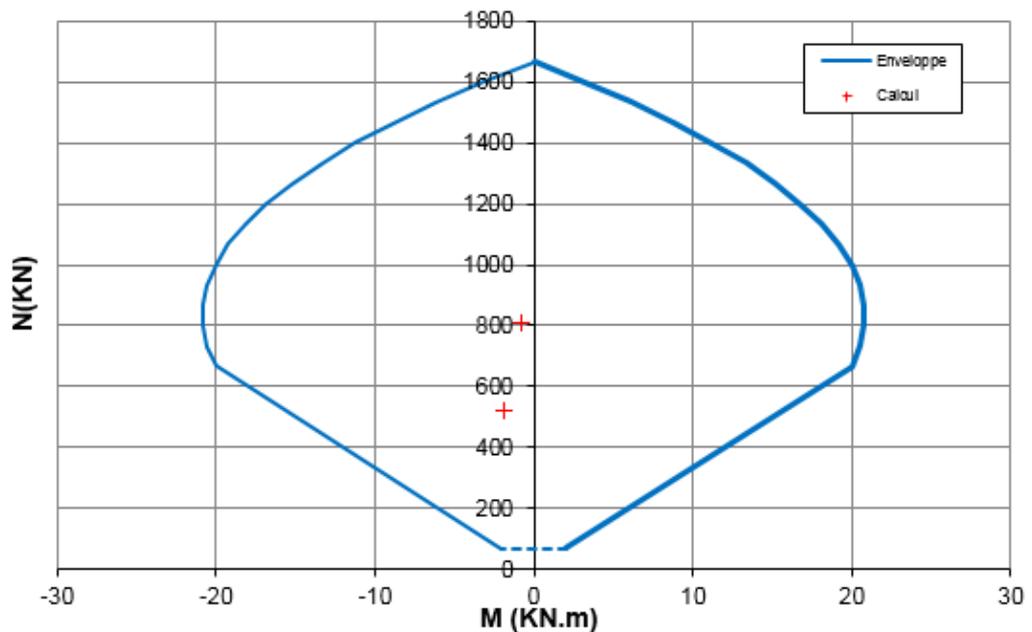


Figura 17: Interazione M-N per la sezione di 10 cm di cls proiettato

Il calcestruzzo proiettato è verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=2.

Verifica interazione N+V

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

V _{Ed} [kN]	x [m]	τ _{cp} [MPa]	σ _{cp} [MPa]	f _{ctd} [MPa]	σ _{clim} [MPa]	f _{cvd} [MPa]	Verifica	FS
-8,74	0,10	-0,13	5,23	1,20	7,42	2,77	OK	21,2
4,63	0,10	0,07	8,09	1,20	7,42	3,32	OK	47,8

Tabella 4: Verifica a taglio

Verifica a trazione dei bulloni



Figura 18: Sforzi nei bulloni, GSI=65

Per il bullone più sollecitato:

$$79 \text{ kN} \cdot 1.3 = 102.7 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{102.7} = 1.07$$

$$0.28\% < 7 - 10\%$$

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

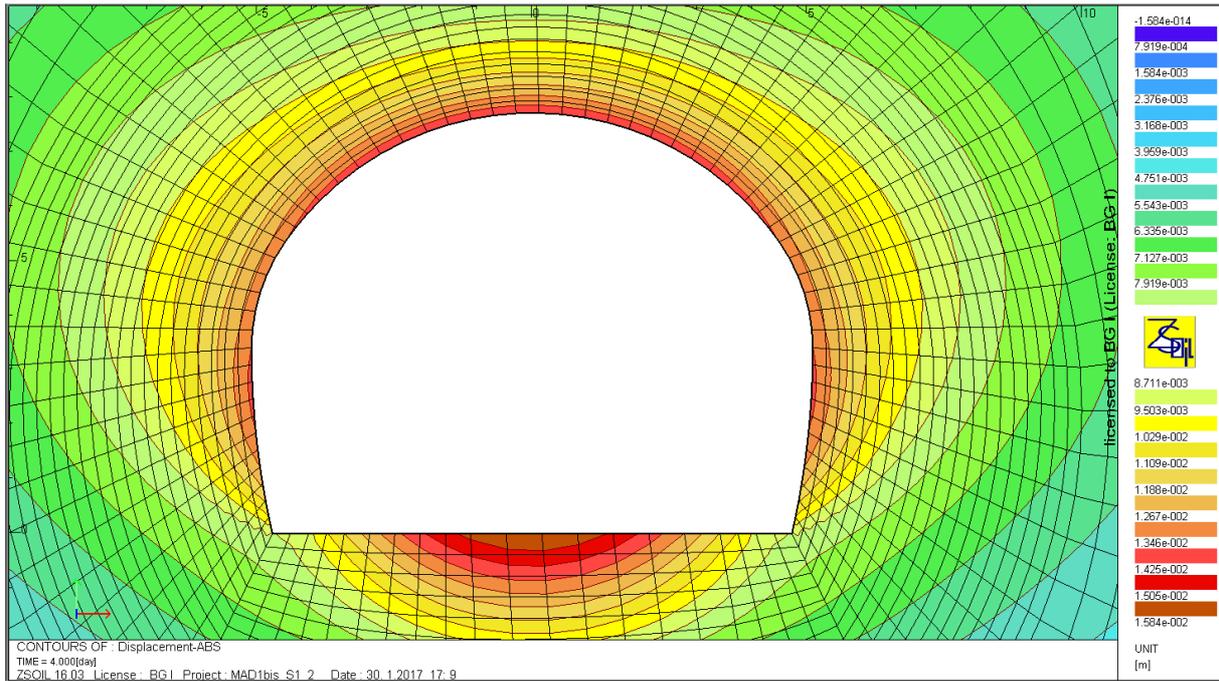


Figura 19: Spostamenti assoluti per sezione tipo S1, GSI=65

Gli spostamenti maggiori si manifestano in platea e sono pari a massimo 1.58 cm. In calotta e piedritti lo spostamento radiale è piuttosto uniforme e pari a 1.4 cm.

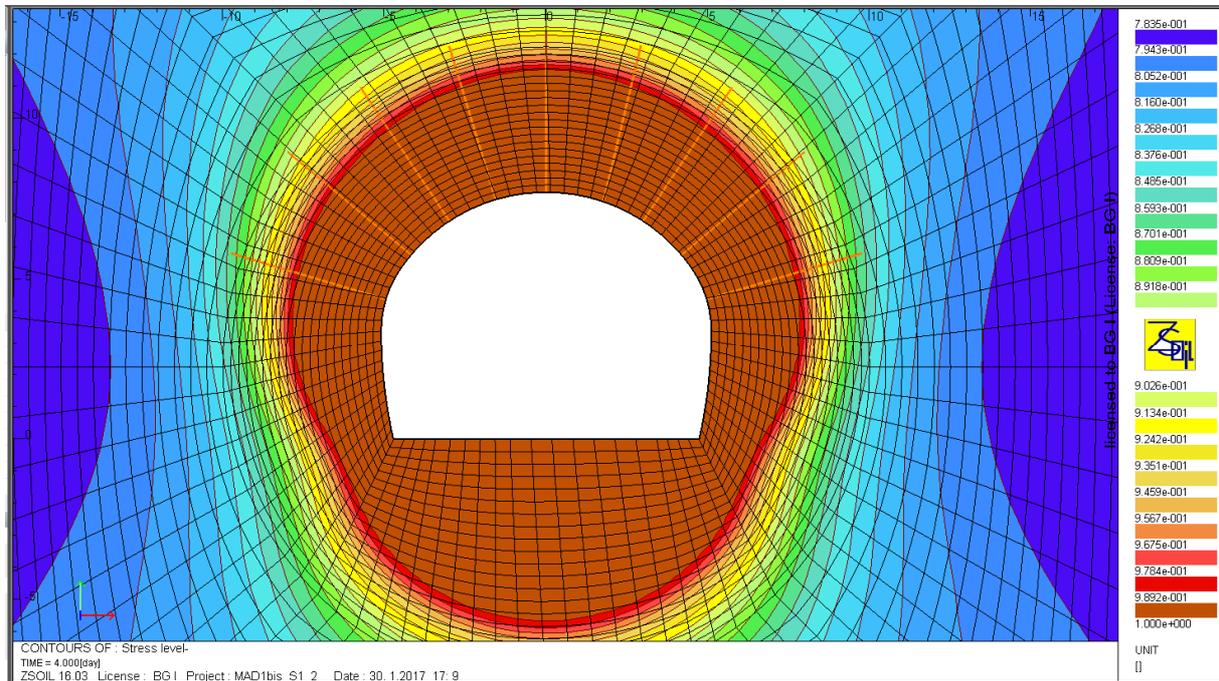


Figura 20: Zone plastiche per sezione tipo S1, GSI=65

La banda plastica è circa costante sul contorno di calotta e piedritti ed ha uno spessore di 3.85 m. Sotto la platea raggiunge i 5.8 m.

9.5 Sezione tipo S2

9.5.1 Analisi convergenza-confinamento

L'analisi alle linee caratteristiche è svolta nella figura seguente. Al fine di considerare che la zona interessata da un ammasso roccioso avente un GSI di 45 si estende su massimo 30m, mentre il resto dell'ammasso è competente, si è utilizzato il metodo di Anagnostou e Kovari (2003). Si veda la relazione PRV_C3A_3730_26-46-20 per i dettagli relativi a questo metodo che modifica le curve caratteristiche originali.

La distanza di applicazione da considerare nei calcoli è stata calcolata secondo la formula seguente:

$$d_{\text{calcolo}} = (d_1 + d_2) / 2 = 5,1 \text{ m}$$

con:

$d_1 = 4,6 \text{ m}$ distanza tra la posa del 2° strato di cls proiettato tra le centine ed il fronte, prima dell'avanzamento

$d_2 = p + d_1 = 5,6 \text{ m}$ distanza tra la posa del 2° strato di cls proiettato tra le centine ed il fronte, dopo l'avanzamento.

$p = 1 \text{ m}$ passo tra le centine (corrispondente anche al passo di scavo).

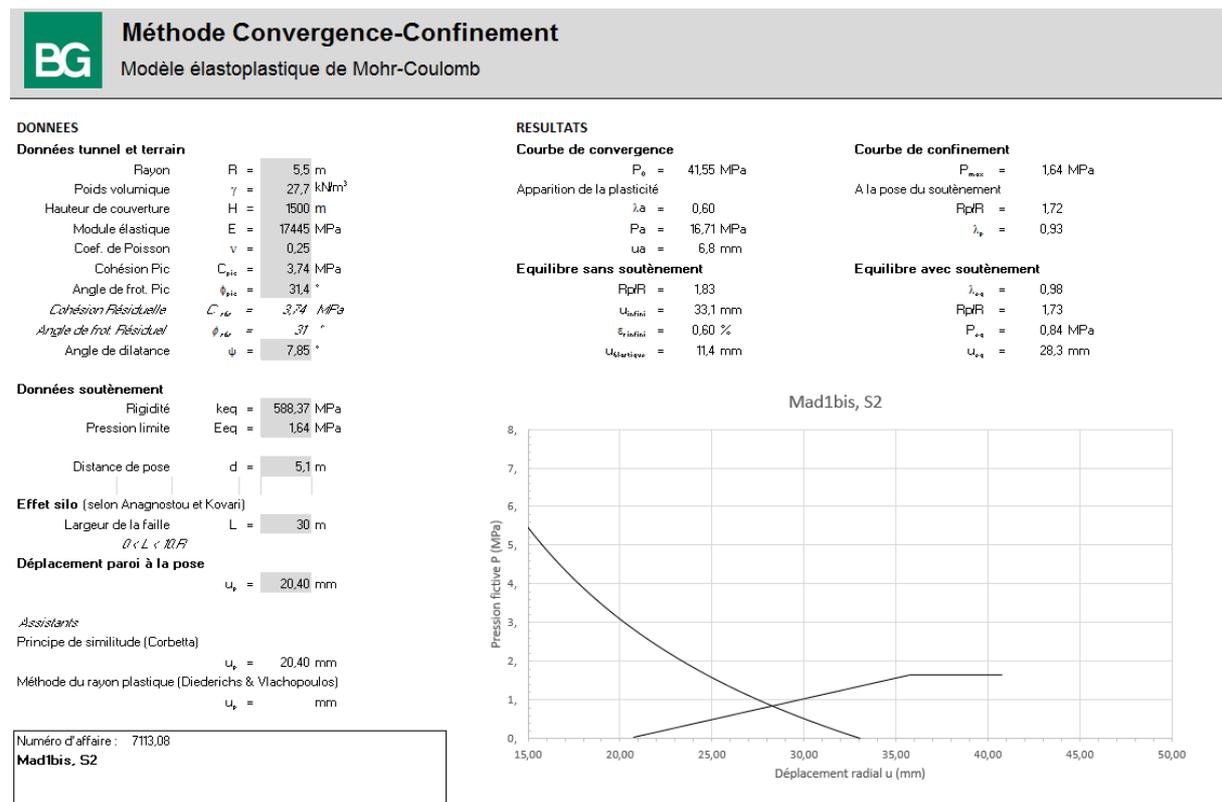


Figura 21: Comportamento di ammasso e sostegno – linee caratteristiche

Tuttavia, nel modello FEM 2D non è possibile tener conto della lunghezza limitata della zona caratterizzata da un ammasso fratturato se non per mezzo di un valore di GSI che porti ad un comportamento equivalente dell'ammasso su di una lunghezza infinita.

Un GSI pari a 49 in un ammasso omogeneo (senza faglia) porta ad avere gli stessi spostamenti radiali massimi rispetto al GSI di 45 su una lunghezza di 30 m.

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

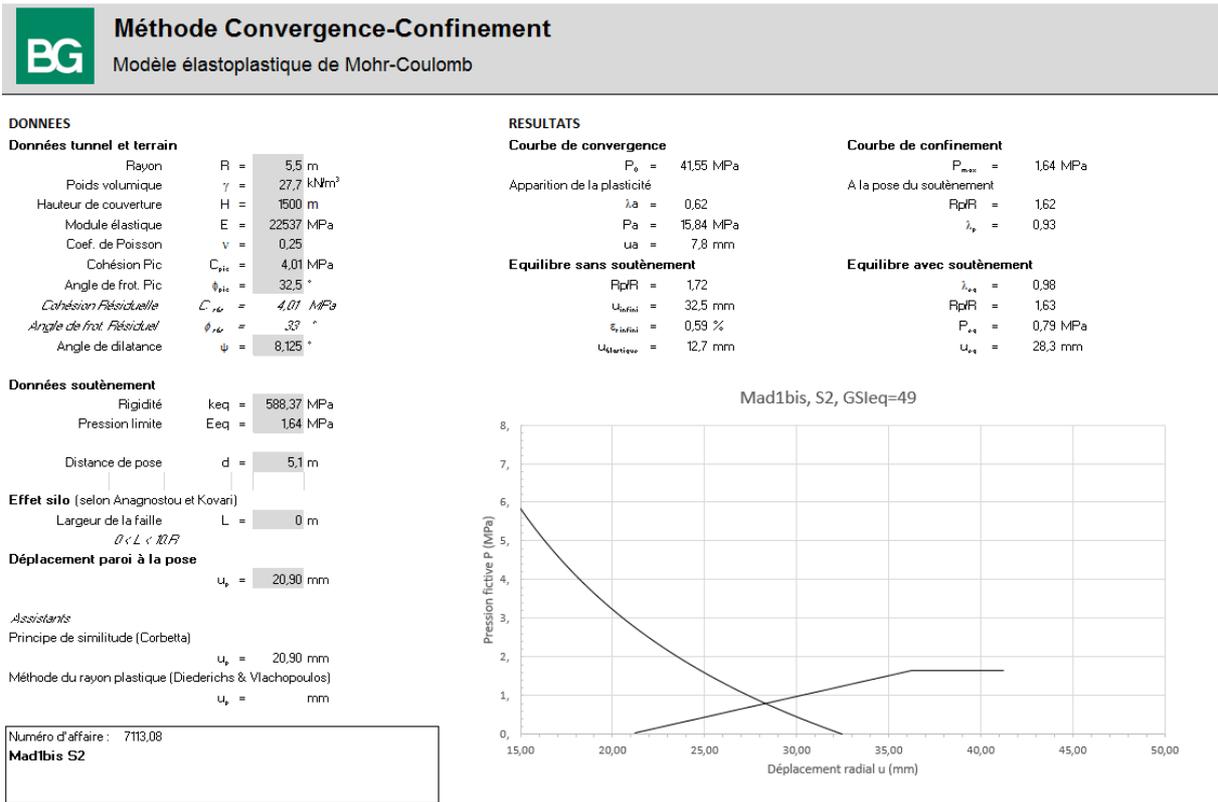


Figura 22: Comportamento di ammasso equivalente e sostegno – linee caratteristiche – GSI equivalente

Il tasso di deconfinamento ottenuto è di $\lambda=0.93$: il sostegno viene attivato quando il 93% del rilascio tensionale è già avvenuto.

Gli spostamenti attesi ai contorni di scavo sono dell'ordine di 2.8 cm e lo spessore della banda plastica di 3.5 m.

9.5.2 Modello numerico

La sezione viene scavata in una sola fase, il modello dei sostegni è illustrato nella figura seguente.

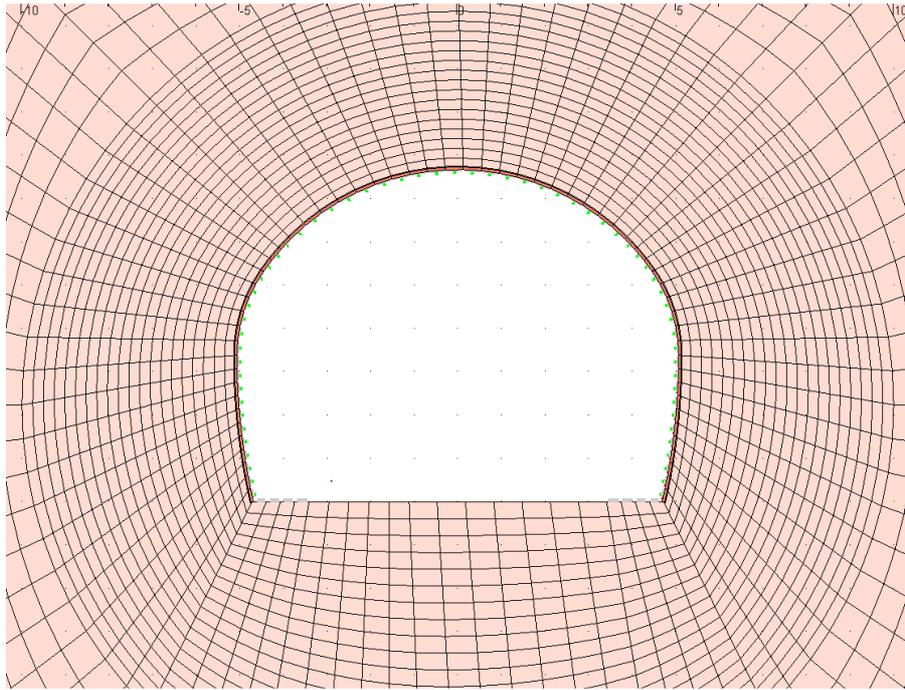


Figura 23: Zoom del modello FEM 2D con rappresentazione dei sostegni

Il calcestruzzo proiettato viene modellato con elementi BEAM aventi le caratteristiche meccaniche e geometriche equivalenti della sezione mista. I sostegni sono costituiti da centine HEB 180 con passo 1m e uno strato di cls proiettato di 5cm in prima fase e di 25 cm in seconda fase. Le caratteristiche equivalenti sono le seguenti:

Prima fase:

$$t_{eq} = 0.24 \text{ m}$$
$$E_{eq} = 7.23 \text{ GPa}$$

Seconda fase:

$$t_{eq} = 0.26 \text{ m}$$
$$E_{eq} = 12.35 \text{ GPa}$$

9.5.3 Verifica dei sostegni

Sollecitazioni

NOTE de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1



Figura 24: Sollecitazione al momento, S2, GSI=49



Figura 25: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=49

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

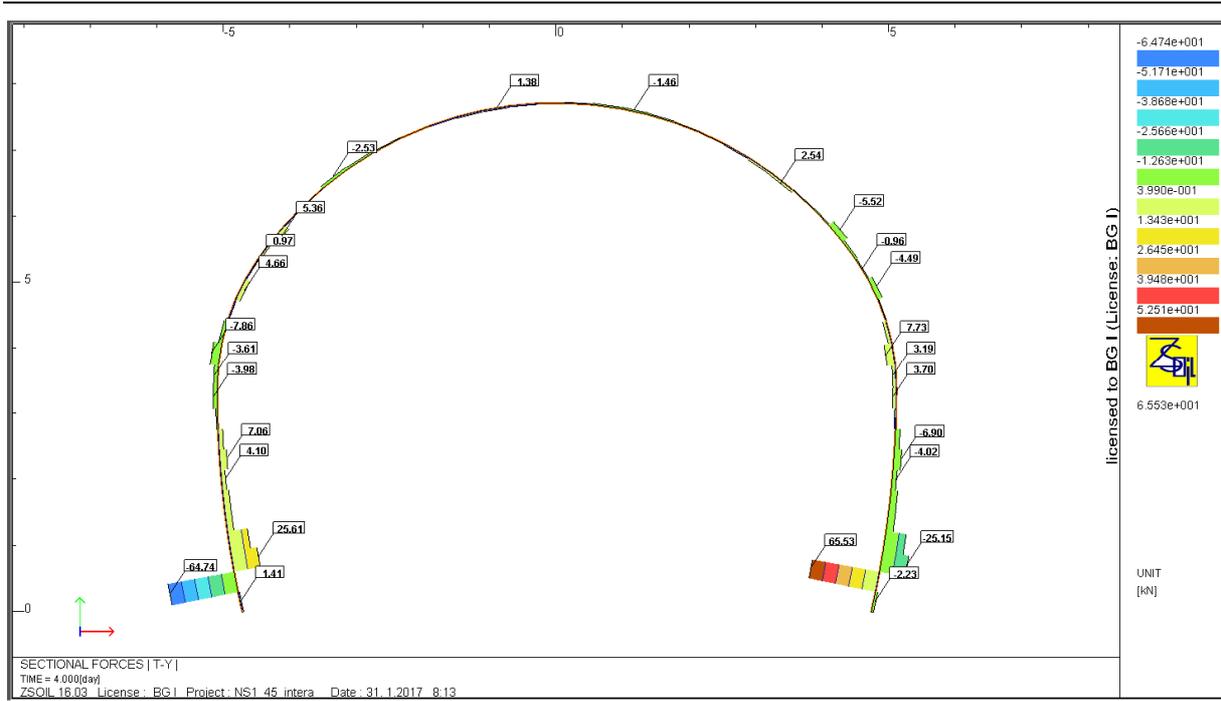


Figura 26: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=49

Combinazione	N_{eq} [kNm]	M_{eq} [kN]	V_{eq} [kN]
$M_{max}, N_{max}, V_{max}$	1740,9	19,7	-64,7
M, N_{min}, V	360,4	3,0	6,9

Tabella 5: Sollecitazioni nella sezione mista

Gli sforzi nella sezione equivalente si redistribuiscono tra centine e calcestruzzo:

Sforzi nel CLS					
$N_{b,SLS}$ [kN]	$M_{b,SLS}$ [kNm]	$V_{b,SLS}$ [kN]	$N_{b,SLU}$ [kN]	$M_{b,SLU}$ [kNm]	$V_{b,SLU}$ [kN]
975,4	10,4	-34,3	1268,0	13,6	-44,6
201,9	1,6	3,7	262,5	2,0	4,8

Tabella 6: Sollecitazioni nel cls

Sforzi nella centina					
$N_{a,SLS}$ [kN]	$M_{a,SLS}$ [kNm]	$V_{a,SLS}$ [kN]	$N_{a,SLU}$ [kN]	$M_{a,SLU}$ [kNm]	$V_{a,SLU}$ [kN]
765,5	9,3	-30,4	995,2	12,0	-39,5
158,5	1,4	3,2	206,0	1,8	4,2

Tabella 7: Sollecitazioni nella centina

Verifica dell'interazione M e N

La verifica è svolta con il diagramma di interazione definito dalle raccomandazioni AFTES GT29 e GT7.



Calcul de la courbe d'interaction du béton non fibré

selon les recommandations de l'AFTES "utilisation du béton non armé en tunnel"
et "compatibilité avec les Eurocodes"

BG - 2014

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,25 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	25 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

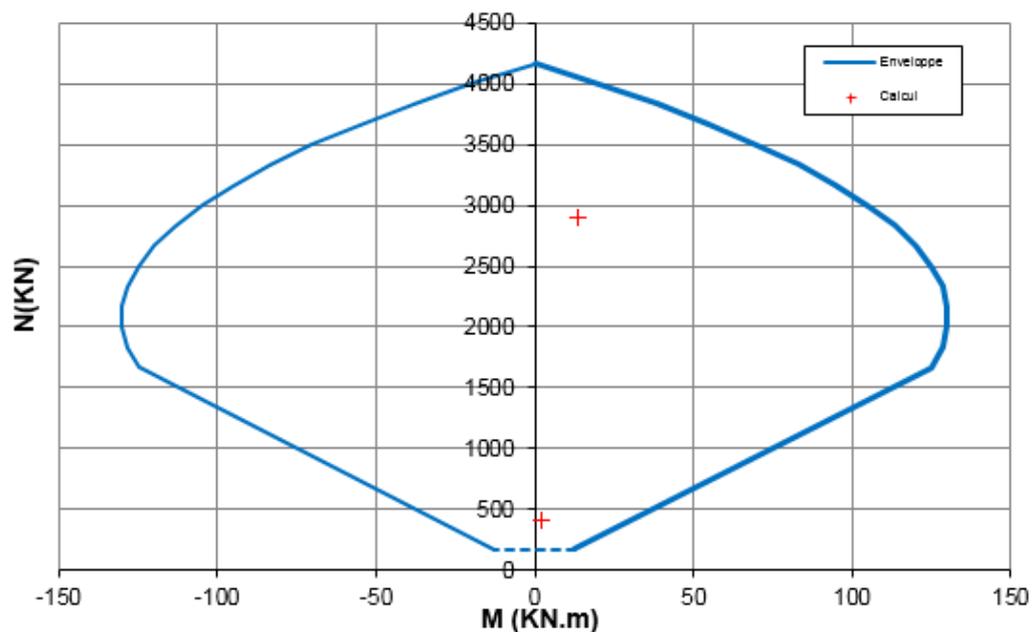


Figura 27: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls

Il calcestruzzo progettato è verificato con un fattore di sicurezza pari a $FS=1.35$.



Calcul de la courbe d'interaction de l'acier (cintres)

conforme aux Eurocodes 1 et 3

BG - 2015

Données

Surface A =	0,00653 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000383 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,18 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	235 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

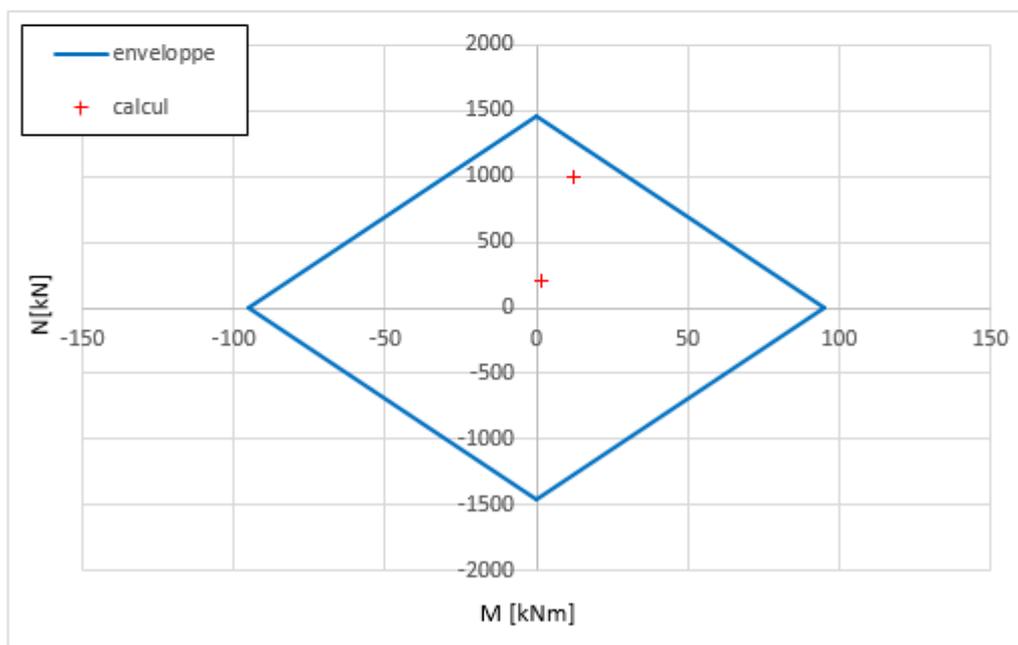


Figura 28: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180

Le centine HEB 180 sono verificate con un fattore di sicurezza pari a FS=1.3.

Verifica interazione N+V

Calcestruzzo:

V_{Ed} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
-44,58	0,25	-0,27	11,62	1,20	7,42	3,31	OK	12,4
4,75	0,25	0,03	1,61	1,20	7,42	1,83	OK	64,3

Acciaio:

Note de calcul section courante Maddalena 1 / Relazione di calcolo sezione corrente Maddalena 1

Il contributo dello sforzo normale non viene considerato e si verifica la sezione dove lo sforzo di taglio è maggiore:

$$V_{max,Ed} = 39.5 \text{ kN} < V_{Rd,HEB180} = 262 \text{ kN}$$

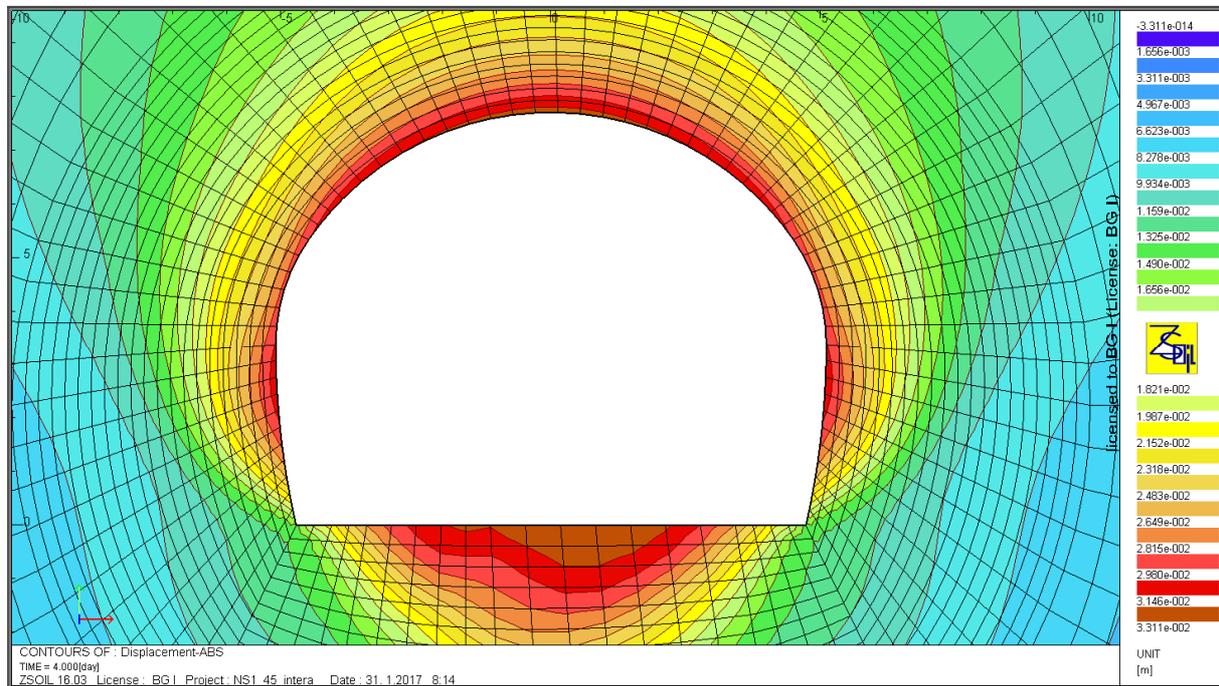


Figura 29: Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=49

Lo spostamento radiale massimo è nella zona della platea e in chiave di volta, ed è pari a circa 3.3 cm.

Nei piedritti lo spostamento massimo è di circa 3.1 cm.

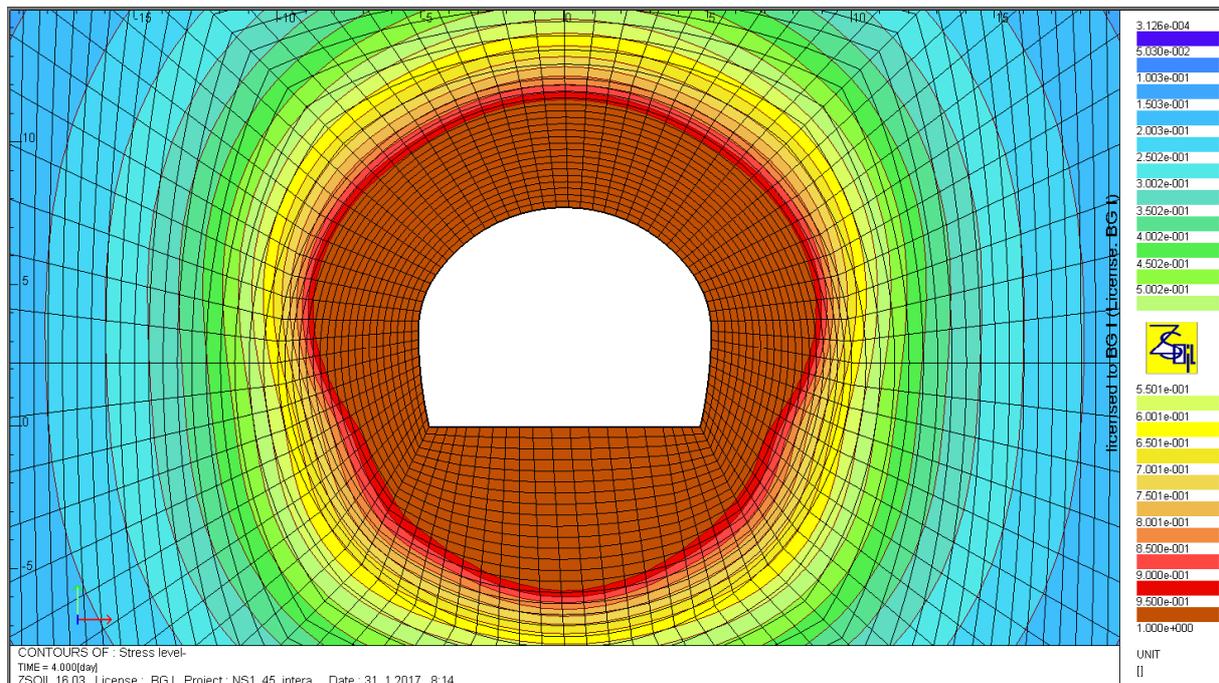


Figura 30: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=49

La banda plastica è circa costante sul contorno di calotta e piedritti ed ha uno spessore di 3.8 m. Sotto la platea raggiunge i 5.8 m.

10. Conclusione

La presente relazione descrive le procedure adottate e gli aspetti considerati per il dimensionamento dei rivestimenti definitivi della sezione corrente della galleria Maddalena 1, per il dimensionamento dei sostegni e rivestimenti della galleria di connessione 1 nonché per il dimensionamento dei sostegni della galleria Maddalena 1bis.

Le verifiche sono risultate soddisfatte, confermando le misure di sostegno e/o gli spessori di rivestimento previsti.