

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

**REVISIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO - REVISION DE L'AVANT-PROJET DE REFERENCE  
CUP C11J05000030001**

**GENIE CIVIL – OPERE CIVILI**

**TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE  
GALERIE DE LA MADDALENA – GALLERIA DELLA MADDALENA  
DESCENDERIE – GENIE CIVIL – DISCENDERIA – OPERE CIVILI**

**NOTE DE CALCUL DES NICHES – RELAZIONE DI CALCOLO DELLE NICCHIE**

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	31/01/2013	Première diffusion / Prima emissione	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	08/02/2013	Révision suite aux commentaires LTF / Revisione a seguito commenti LTF	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO

CODE DOC	<b>P</b>	<b>D</b>	<b>2</b>	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>P</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>T</b>
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	Statut / Stato		Type / Tipo			

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	48	20	10	03
------------------------------	-----	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA	-
-----------------	---

**Tecnimont  
Civil Construction**  
Dotl. Ing. Aldo Mancarella  
Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R




LTF sas - 1091 Avenue de la Boisse - BP 80631 - F-73006 CHAMBERY CEDEX (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 LTF Tous droits réservés - Proprietà LTF 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

RESUME/RIASSUNTO .....	4
1. INTRODUZIONE .....	5
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	5
2.1 Documenti di progetto .....	5
2.2 Normativa .....	5
3. DESCRIZIONE DELLE NICCHIE .....	5
3.1 Generalità.....	5
3.2 Sezioni tipo .....	6
4. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI SULLE STRUTTURE .....	6
4.1 Caso di calcolo.....	6
4.2 Parametri dell'ammasso roccioso .....	7
4.3 Calcolo dei carichi su sostegni e rivestimenti.....	8
4.4 Calcolo delle sollecitazioni.....	12
4.4.1 Modelli di calcolo .....	12
4.4.2 Combinazioni di carico .....	12
4.4.3 Risultati .....	14
5. VERIFICHE STRUTTURALI SULLE SEZIONI.....	19
5.1 Materiali e resistenze di calcolo .....	19
5.1.1 Sostegni di prima fase .....	19
5.1.2 Rivestimento definitivo.....	19
5.2 Verifiche allo SLU sui sostegni di prima fase .....	20
5.3 Verifiche allo SLU sui rivestimenti definitivi .....	21
5.3.1 Verifiche a pressoflessione .....	21
5.3.2 Verifiche a taglio.....	22
5.4 Verifiche allo SLE – controllo delle tensioni nei rivestimenti definitivi.....	24
6. CONCLUSIONI.....	25
ALLEGATO 1 : VERIFICHE ALLO SLE – CONTROLLO DELLE TENSIONI .....	26

## LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1</b> – Linea caratteristica della nicchia in condizioni intrinseche .....	10
<b>Figura 2</b> – Linea caratteristica della nicchia in presenza dei sostegni .....	11
<b>Figura 3</b> – Modello di calcolo dei sostegni di prima fase .....	13
<b>Figura 4</b> – Modello di calcolo dei rivestimenti definitivi .....	13
<b>Figura 5</b> – SLU – Sforzo normale sui sostegni di prima fase .....	14
<b>Figura 6</b> – SLU – Momento flettente sui sostegni di prima fase .....	15
<b>Figura 7</b> – SLU – Sforzo normale sui rivestimenti definitivi.....	16
<b>Figura 8</b> – SLU – Momento flettente sui rivestimenti definitivi.....	16
<b>Figura 9</b> – SLU – Sforzo di taglio sui rivestimenti definitivi .....	17
<b>Figura 10</b> – SLE – Sforzo normale sui rivestimenti definitivi .....	18
<b>Figura 11</b> – SLE – Momento flettente sui rivestimenti definitivi .....	18

<b>Figura 12</b> – Diagramma di interazione sostegni di prima fase.....	20
<b>Figura 13</b> – Diagramma di interazione per calotta e piedritto .....	21
<b>Figura 14</b> – Diagramma di interazione per l'arco rovescio.....	22
<b>Figura 15</b> – Diagramma di interazione per la calotta (con effetto dell'armatura a taglio).....	24

## LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1</b> – Sostegni di prima fase delle nicchie .....	6
<b>Tabella 2</b> – Rivestimenti definitivi delle nicchie.....	6
<b>Tabella 3</b> – Combinazioni di carico per sostegni e rivestimenti .....	14
<b>Tabella 4</b> – Combinazioni di sollecitazioni allo SLU per i rivestimenti definitivi .....	21
<b>Tabella 5</b> – Sollecitazioni di taglio e corrispondenti valori di sforzo normale .....	22
<b>Tabella 6</b> – Verifiche a taglio .....	23
<b>Tabella 7</b> – Combinazioni di sollecitazioni allo stato limite di esercizio.....	25
<b>Tabella 8</b> – Tensioni di esercizio nei rivestimenti definitivi.....	25

## RESUME/RIASSUNTO

La présente note décrit le dimensionnement et la vérification des soutènements et des revêtements définitifs des niches de la Galerie de La Maddalena.

Celles-ci sont conçues comme niches de croisement des véhicules. Toutefois, leur longueur est variable, puisque certaines niches contiendront aussi les cabines électriques et les cabines pour les télécommunications. Il est aussi prévu une niche de croisement et retournement des véhicules.

Les niches seront réalisées par démolition des soutènements de la galerie de la Maddalena et élargissement de la section d'excavation.

Les pressions agissantes sur les soutènements et sur les revêtements ont été déterminées avec les courbes convergence-confinement.

Le calcul des efforts a été effectué au moyen du logiciel à éléments finis SCIA Engineering, tandis que les vérifications des sections ont été exécutées avec le logiciel Fagus.

La presente relazione descrive il dimensionamento e la verifica dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi delle nicchie della galleria della Maddalena.

Esse sono concepite come nicchie di incrocio dei veicoli. Tuttavia la loro lunghezza è variabile in quanto alcune di esse conterranno anche le cabine elettriche e le cabine per telecomunicazioni. È inoltre prevista una nicchia di incrocio e inversione.

La realizzazione delle nicchie avviene mediante la demolizione dei sostegni del cunicolo esplorativo della Maddalena e l'allargamento della sezione di scavo.

Le pressioni agenti sui sostegni e sui rivestimenti sono state determinate con il metodo delle linee caratteristiche.

Il calcolo delle sollecitazioni è stato effettuato mediante il codice ad elementi finiti SCIA Engineering, mentre le verifiche delle sezioni sono state compiute con il programma Fagus.

## 1. Introduzione

L'obiettivo del presente documento è il dimensionamento dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi delle nicchie della galleria della Maddalena.

Il documento si articola come segue:

- Il **Capitolo 2** riporta i documenti di riferimento progettuali e normativi adottati.
- Il **Capitolo 3** riassume i tipi di sostegno e rivestimento previsti per le nicchie.
- Il **Capitolo 4** descrive il calcolo delle sollecitazioni su sostegni e rivestimenti.
- Il **Capitolo 5** riporta i risultati delle verifiche delle sezioni resistenti
- Il **Capitolo 6** riporta le considerazioni conclusive al lavoro svolto.

L' **Allegato 1** riporta i dettagli delle verifiche dei rivestimenti definitivi allo SLE.

Per le verifiche della protezione contro le correnti vaganti si veda il documento “**PD2-C3A-TS3-1629 Progetto dei tunnel – Predisposizioni civili per la messa a terra elettrica ai fini della protezione contro i contatti indiretti e le correnti vaganti**”.

## 2. Documenti di riferimento

### 2.1 Documenti di progetto

- PD2-C3B-TS3-0002 Profilo geologico verticale del Tunnel di Base;
- PD2-C3B-TS3-0100 Relazione geomeccanica di sintesi;
- PD2-C3B-TS3-0090 Relazione geologica di sintesi;
- PD2-C3A-TS3-3826 Carpenterie sezione corrente – Galleria de La Maddalena;
- PD2-C3A-TS3-3820 Galleria della Maddalena - Relazione tecnica descrittiva;
- PD2-C3A-TS3-1629 Progetto dei tunnel – Predisposizioni civili per la messa a terra elettrica ai fini della protezione contro i contatti indiretti e le correnti vaganti.
- VEN-CMC-0027a0041-A – Sezioni tipo di scavo e consolidamento meccanizzato
- VEN-CMC-0010-A – Profilo geologico-geomeccanico con applicazione delle sezioni tipo.

### 2.2 Normativa

Il quadro normativo di riferimento è trattato all'interno del documento PD2-C3A-TSE3-1113 "Soumission 44 - Normes Techniques - Cadre réglementaire".

## 3. Descrizione delle nicchie

### 3.1 Generalità

Lungo il tracciato della Galleria della Maddalena sono previste 22 nicchie di incrocio dei veicoli e 1 nicchia di incrocio e inversione.

La sagoma libera per l'incrocio dei mezzi è di 6.6 x 3.5 m (b x h).

Nella nicchia di inversione, il gabarit nella zona di manovra è di 3.5 x 3.5 m (b x h).

Le nicchie per il solo incrocio dei mezzi hanno una lunghezza pari a 30 m, aumentata a 35 m se dotate di cabine per telecomunicazioni (TCL), 52 m se equipaggiate di cabina elettrica, e 57 m per la nicchia N7 (Pk 1+851.5 – 1+908.5), che ospita entrambi i tipi di cabina.

Per maggiori dettagli circa l'ubicazione e distribuzione delle nicchie lungo il tracciato, si veda il documento **PD2-C3A-TS3-3820 Galleria della Maddalena - Relazione tecnica descrittiva**.

### 3.2 Sezioni tipo

La **Tabella 1** e la **Tabella 2** riassumono rispettivamente le misure di sostegno e i rivestimenti definitivi delle nicchie. Per maggiori dettagli si veda il documento **PD2-C3A-TS3-3820 Galleria della Maddalena - Relazione tecnica descrittiva**.

SEZ. TIPO	Bulloni radiali	Cls proiettato calotta	Cls proiettato fronte	Dosaggio fibre d'acciaio	Centine
Nicchia incrocio Sez. tipo S1	Swellex Mn 24 (o equiv.), L= 4.0m, passo trasv. 1.5 m passo long. 1.5 m	15cm fibrorinf.+ 5cm senza fibre	10cm fibrorinf. (se necessario)	35kg/m <sup>3</sup>	-
Nicchia incrocio Sez. tipo S2	-	20cm fibrorinf.+ 5cm senza fibre	10cm fibrorinf (se neces.)	35kg/m <sup>3</sup>	HEB 180 passo 1.00m
Nicchia inversione	-	20cm fibrorinf.+ 5cm senza fibre	10cm fibrorinf (se neces.)	35kg/m <sup>3</sup>	HEB 180 passo 1.00m

*Tabella 1 – Sostegni di prima fase delle nicchie*

SEZ. TIPO	Spessore calotta (cm)	Incid. armatura calotta (kg/m <sup>3</sup> )	Spessore A.R. (cm)	Incid. armatura A.R. (kg/m <sup>3</sup> )
Incrocio – Sez.S1	50	-	-	-
Incrocio – Sez.S2	50	50	60	50
Inversione	50	50	60	50

*Tabella 2 – Rivestimenti definitivi delle nicchie*

## 4. Calcolo delle sollecitazioni sulle strutture

### 4.1 Caso di calcolo

La sezione tipo S1 è applicata laddove le condizioni della roccia e lo stato tensionale non siano tali da comportare fenomeni di convergenza. La bullonatura ha la sola funzione di cucitura dei blocchi di roccia instabili. Non sono previsti carichi importanti sui sostegni e sui rivestimenti definitivi.

La sezione tipo S2 è applicata nel caso di ammassi di qualità da mediocre a discreta, mediamente fratturata. La presenza di centine di tipo HEB 180 garantisce una certa pressione di confinamento nel caso di fenomeni di plasticità moderata nell'intorno dello scavo.

La nicchia di incrocio ed inversione sarà realizzata in rocce competenti. Tuttavia, data la complessa geometria, sono stati adottati sostegni analoghi alla sezione tipo S2 delle nicchie di incrocio.

I calcoli sono dunque stati effettuati sulla sezione tipo S2 della nicchia di incrocio per il caso peggiore in termini di copertura e qualità dell'ammasso roccioso.

#### 4.2 Parametri dell'ammasso roccioso

La distribuzione delle nicchie lungo il tracciato potrà essere adattata nel caso si incontrassero faglie o zone con ammasso roccioso particolarmente fratturato. In particolare, lo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena potrà fornire importanti informazioni in proposito.

Partendo dalle considerazioni contenute nel documento “**PD2-C3B-TS3-0100 Relazione geomeccanica di sintesi**”, cui si rimanda per ogni dettaglio, i parametri di resistenza e deformabilità degli ammassi rocciosi sono stati determinati sulla base dell'indice GSI (Hoek, Carranza Torres & Corkum, 2002). Gli autori, sulla base del criterio di rottura di Hoek-Brown, definiscono un metodo per calcolare le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso in funzione dei livelli tensionali presenti.

Nel caso delle nicchie della Galleria della Maddalena, il calcolo dei carichi sui sostegni e sui rivestimenti è stato compiuto assumendo parametri relativi alle rocce del complesso di Clarea (Unità di Ambin), costituite da alternanze di micacicsti e gneiss. In tali unità, al di fuori dalle zone di faglia, sono stati stimati valori dell'indice GSI variabili tra 57 e 67. È stato assunto un indice GSI pari a 50, in modo da simulare il comportamento di una roccia mediamente fratturata, tuttavia al di fuori delle zone di faglia.

Lo stato tensionale considerato corrisponde ad una copertura di 1800 m.

Di seguito sono riportati i parametri di input, relativi alla roccia intatta e i parametri dell'ammasso roccioso derivanti dalla linearizzazione del criterio di Hoek-Brown in funzione dello stato tensionale.

##### Stato tensionale:

- Peso specifico:  $\gamma = 27.5 \text{ kN/m}^3$
- Copertura:  $H = 1800 \text{ m}$
- Stato tensionale iniziale:  $p_0 = \gamma \cdot H = 49500 \text{ kPa}$

##### Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale:  $UCS = 67.4 \text{ MPa}$
- Geological Strength Index:  $GSI = 50$
- Costante di Hoek-Brown:  $m_i = 10$

- Fattore di disturbo:  $D = 0$  (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico:  $E_i = 54 \text{ GPa}$

Ammasso roccioso:

- Coesione:  $c = 3900 \text{ kPa}$
- Angolo di attrito:  $\phi = 29^\circ$
- Modulo elastico:  $E_{rm} = 16.6 \text{ MPa}$

### 4.3 Calcolo dei carichi su sostegni e rivestimenti

I carichi da applicare ai sostegni di prima fase e ai rivestimenti definitivi della nicchia sono stati calcolati analiticamente con il metodo delle linee caratteristiche, con il quale è possibile determinare la deformazione radiale di una galleria al diminuire della pressione interna di confinamento. L'approccio parte dall'ipotesi di tunnel circolare e stato tensionale radiale.

Allo scopo di simulare le fasi costruttive, è stata dapprima creata la linea caratteristica del cunicolo esplorativo, in modo da tenere in conto il detensionamento già avvenuto nell'ammasso prima del successivo allargo. Considerando un raggio del cunicolo pari a 3.15 m e un raggio equivalente della nicchia pari a 4.75 m, le due opere sono state schematizzate come coassiali. Lo spostamento radiale dovuto allo scavo del cunicolo ad una distanza di 4.75 m dall'asse rappresenta la deformazione in corrispondenza del contorno della futura nicchia. Tale spostamento è stato determinato applicando al contorno del cunicolo una pressione di confinamento di 400 kPa, pari alla capacità portante dei sostegni del cunicolo stesso per la sezione tipo F4 (si veda il relativo Progetto Definitivo - CMC – 2011).

Per il calcolo dello spostamento in un punto situato ad una certa distanza dall'asse di una galleria occorre dapprima appurare che esso si trovi all'interno o al di fuori della fascia plastica. Il raggio plastico del cunicolo è stato calcolato con la seguente formulazione:

$$R_{pl} = R \cdot \left[ \frac{(p_0 + c_r \cot g\phi_r) - (p_0 + c_p \cot g\phi_p) \cdot \sin\phi_p}{p_i + c_r \cot g\phi_r} \right]^{\frac{1}{N_r - 1}} = 6.5 \text{ m}$$

Dove:

- $R = 3.15$  raggio del cunicolo
- $p_0 = 49500 \text{ kPa}$  stato tensionale iniziale
- $p_i = 400 \text{ kPa}$  pressione interna di confinamento
- $c_p = 3900 \text{ kPa}$  coesione di picco
- $\phi_p = 29^\circ$  angolo di attrito di picco
- $c_r = 3900 \text{ kPa}$  coesione residua
- $\phi_r = 29^\circ$  angolo di attrito residuo

$$N_r = \frac{1 + \sin\phi_r}{1 - \sin\phi_r} = 2.88$$

I parametri residui sono da considerarsi coincidenti con quelli di picco (comportamento elastico – perfettamente plastico).

È stato ottenuto un raggio plastico di 6.5 m. Il contorno della futura nicchia si trova dunque all'interno della fascia plastica del cunicolo. La deformazione radiale in zona plastica è calcolata come segue:

$$u_r' = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{pl}^{k+1}}{r^k} \cdot (p_0 + c_p \cot g\phi_p) \cdot \sin\phi_p + (1-2\nu) \cdot (p_0 + c_r \cot g\phi_r) \cdot \left( \frac{R_{pl}^{k+1}}{r^k} - r \right) + \\ - \frac{(p_i + c_r \cot g\phi_r) \cdot [1 + N_r k - \nu \cdot (k+1) \cdot (1 + N_r)]}{(N_r + k) \cdot R^{N_r-1}} \cdot \left( \frac{R_{pl}^{N_r+k}}{r^k} - r^{N_r} \right) \end{array} \right\}$$

Si sono assunti:

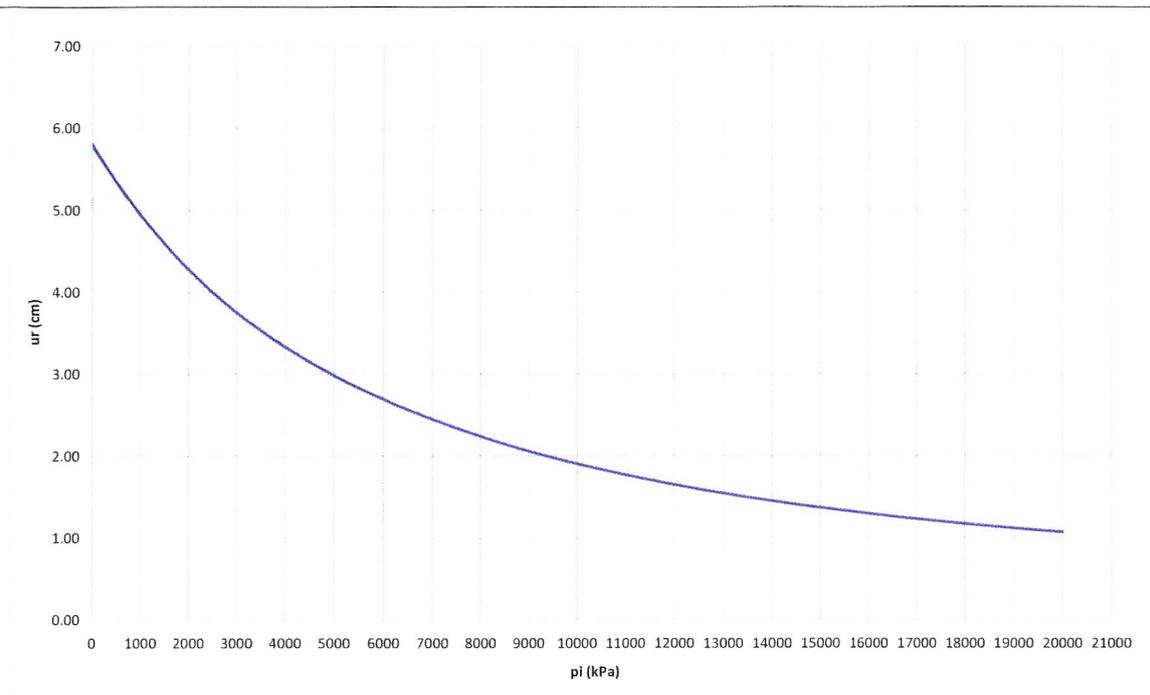
$r = 4.75$  m      distanza radiale dall'asse del cunicolo

$$k = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} = 1$$

Si è ottenuto uno spostamento radiale  $u_r' = 2.1$  cm, da intendersi come una deformazione iniziale già avvenuta prima dello scavo della nicchia, da sommarsi alla deformazione dovuta al successivo allargamento e ai giochi di posa dei sostegni della nicchia stessa.

Con la stessa formulazione è stata tracciata la linea caratteristica della nicchia, ponendo il raggio di scavo pari a 4.75 m e facendo diminuire la pressione di confinamento fino al completo annullamento.

La linea caratteristica della nicchia in condizioni intrinseche (assenza di sostegni) è rappresentata in **Figura 1**.



**Figura 1** – Linea caratteristica della nicchia in condizioni intrinseche

La deformazione in assenza di sostegni è pari a  $u_{\infty} = 5.8$  cm.

Il raggio plastico, ottenuto con la stessa formulazione adottata per il cunicolo, è pari a 10.1 m (corrispondente ad una fascia plastica di 5.35 m).

La deformazione al momento della messa in opera dei sostegni è stata calcolata come segue:

$$u_0 = u_r' + u_1 + u_2 \quad \text{dove:}$$

$u_1 = 1.2$  cm    deformazione dovuta all' allargo della nicchia prima della messa in opera dei sostegni.

$u_2 = 2$  cm    gioco di posa dei sostegni

La deformazione dovuta all'allargo è stata assunta come segue:

$$u_1 = \frac{1}{3}(u_{\infty} - u_r') = \frac{1}{3}(5.8 - 2.1) = 1.2 \text{ cm}$$

Il gioco di posa dei sostegni è stato assunto pari a 2 cm. Tale valore, comprensivo degli assestamenti della centina e della deformazione dovuta alla non immediata maturazione del calcestruzzo proiettato, appare conforme al tipo di sostegno e alle dimensioni della nicchia.

In totale la deformazione al momento della messa in opera dei sostegni pari a  $u_0 = 5.3$  cm.

Come si può osservare, i sostegni si attivano quando gran parte della deformazione è già avvenuta. Il fenomeno è tipico di gallerie molto profonde.

Nel caso in esame, la cavità troverebbe facilmente un equilibrio anche in condizioni intrinseche. Tuttavia, la presenza di una fascia plastica importante e di convergenze di circa

6 cm impongono la messa in opera di un intervento di sostegno costituito da centine e calcestruzzo proiettato allo scopo di garantire la sicurezza delle maestranze in fase di scavo.

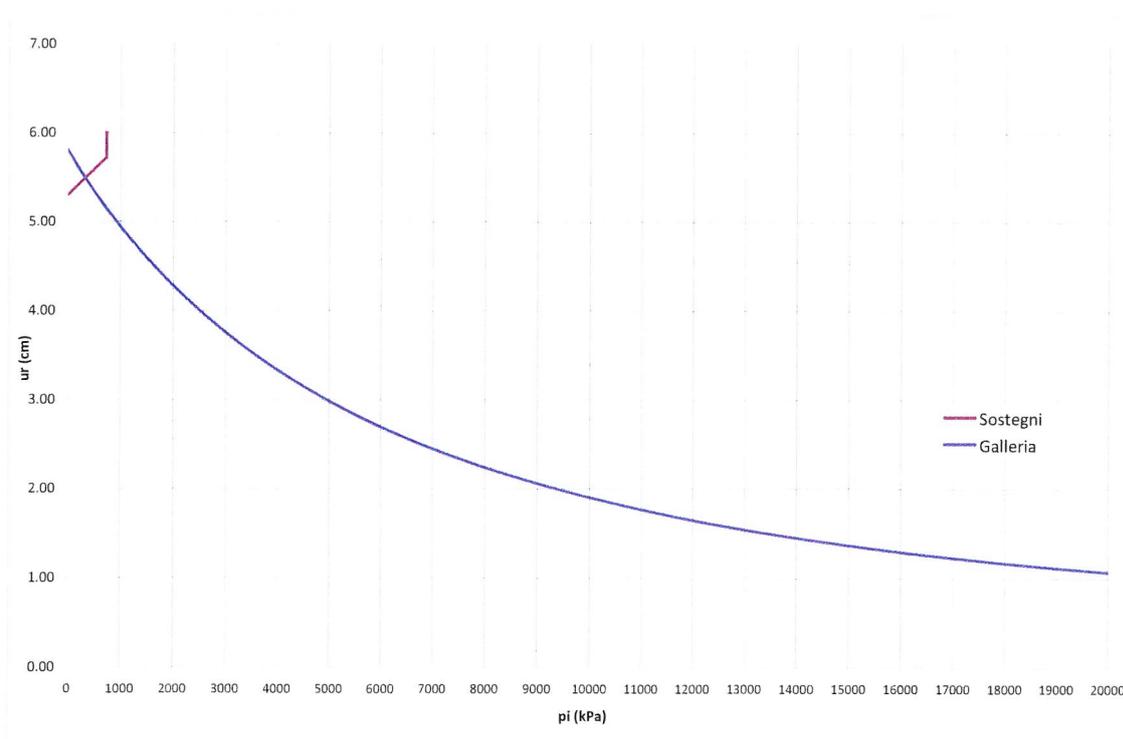
Lo spessore equivalente del sostegno è stato calcolato come segue:

$$s_{eq} = s_c + (n-1) \frac{A_{centina}}{passo} = 0.26 \text{ m} \quad \text{dove:}$$

$s_c = 0.2 \text{ m}$  spessore calcestruzzo proiettato  
 $n = 10$  coefficiente di omogeneizzazione  
 $A_{centina} = 0.0065 \text{ m}^2$  per centine HEB 180  
 $passo = 1.0 \text{ m}$

Il modulo elastico del sostegno di spessore equivalente 0.26 m è stata assunta pari a 15 GPa, valore tipico di un calcestruzzo proiettato non completamente maturo.

In **Figura 2** è illustrata la linea caratteristica in presenza di sostegno. L' equilibrio è ottenuto per una pressione di confinamento pari a **330 kPa**.



**Figura 2** – Linea caratteristica della nicchia in presenza dei sostegni

## 4.4 Calcolo delle sollecitazioni

### 4.4.1 Modelli di calcolo

Il calcolo delle sollecitazioni all'interno dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi è stato effettuato con l'ausilio del codice agli elementi finiti SCIA Engineering. Il programma consente di effettuare calcoli di tipo non lineare con il metodo delle reazioni iperstatiche

La struttura è stata suddivisa in elementi monodimensionali incastrati tra loro. L'interazione tra la struttura e l'ammasso roccioso circostante è stata simulata con molle di tipo "no-tension". Il modulo di reazione  $k$  di tali molle è calcolato con il metodo di Galerkin:

$$k = \frac{E_{rm}}{R_{eq}(1+\nu)} \text{ dove:}$$

$R_{eq} = 4.75 \text{ m}$	raggio equivalente della nicchia
$E_{rm} = 16.6 \text{ GPa}$	modulo di Young dell'ammasso roccioso
$\nu = 0.25$	coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso

Il risultato è stato cautelativamente ridotto del 50%. Una rigidità eccessiva delle molle rischierebbe di conferire al modello un comportamento poco realistico, che renderebbe la struttura poco sollecitata, con concentrazione delle sollecitazioni nelle zone in cui le molle si annullano in trazione.

È stato ottenuto un modulo di reazione pari a:

$$k = 1'400'000 \text{ kN/m}^3$$

Per i sostegni di prima fase gli elementi del modello sono stati considerati con uno spessore pari a quello del calcestruzzo proiettato (20 cm). Non è stata considerata una sezione equivalente che tenesse conto della presenza delle centine in quanto poco realistica. La presenza di fessure nel calcestruzzo proiettato comporterebbe in ogni caso un'importante riduzione dell'inerzia effettiva dell'elemento strutturale.

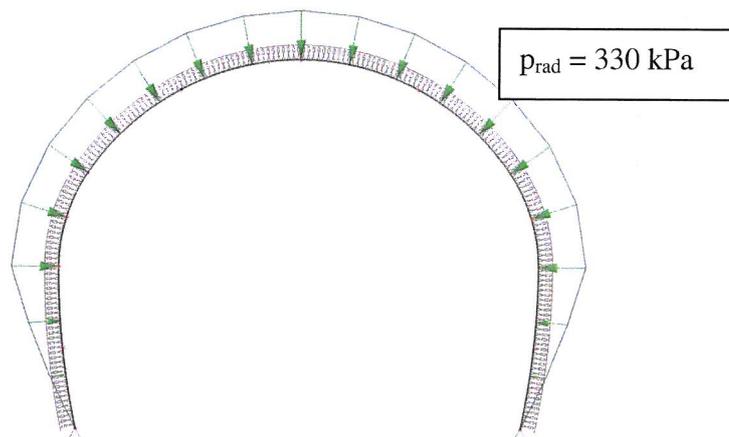
Per i rivestimenti è stato considerato lo spessore degli elementi strutturali, pari rispettivamente a 50 cm in calotta ed a 60 cm in arco rovescio. Le murette sono state simulate come elementi più tozzi, di lunghezza 1.29 m e spessore 90 cm.

### 4.4.2 Combinazioni di carico

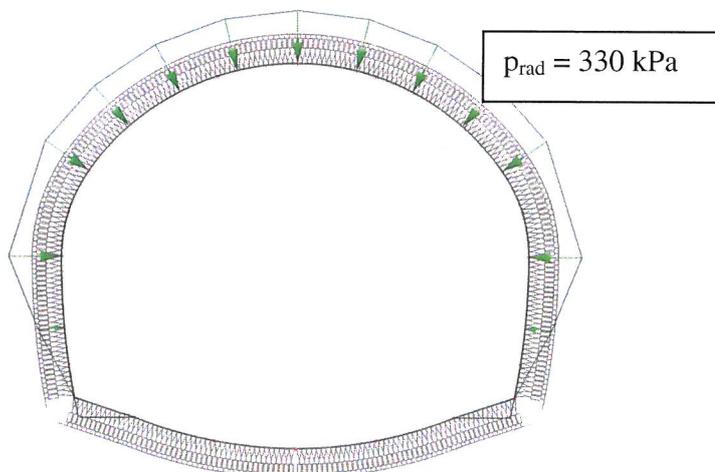
La pressione di equilibrio ottenuta con il metodo delle linee caratteristiche (pari a 330 kPa) è stata considerata come carico permanente agente sui sostegni. Il carico agente sui rivestimenti è stato conservativamente assunto pari a quello agente sui sostegni di prima fase (ipotesi di rivestimento infinitamente rigido).

La pressione è stata applicata radialmente alla calotta della nicchia, mentre sui piedritti essa si riduce linearmente fino ad annullarsi al piede. Tale distribuzione appare più realistica rispetto ad una pressione costante fino al piede, in quanto la reale interazione tra la struttura e il terreno tende a ridurre le pressioni sul piedritto.

I modelli di calcolo con le distribuzioni di pressione sui sostegni e sui rivestimenti definitivi sono illustrate nella **Figura 3** e nella **Figura 4**.



**Figura 3** – Modello di calcolo dei sostegni di prima fase



**Figura 4** – Modello di calcolo dei rivestimenti definitivi

Per le verifiche allo SLU la pressione è stata moltiplicata per il coefficiente di sicurezza parziale  $\gamma_G = 1.3$  per carichi permanenti.

Per le verifiche allo stato limite di esercizio (effettuate per il solo rivestimento definitivo) si sono assunti i carichi con il loro valore caratteristico ( $\gamma_G = 1.0$ ).

La **Tabella 3** riporta i casi di carico considerati per i sostegni e i rivestimenti. In particolare sono indicate le pressioni radiali  $p_{rad}$ , i coefficienti di sicurezza parziali  $\gamma_G$  e le pressioni di calcolo  $p_d$ .

	Combinazione	$p_{rad}$ (kPa)	$\gamma_G$	$p_d$ (kPa)
Sostegni	SLU	330	1.3	<b>429</b>
Rivestimenti	SLU	330	1.3	<b>429</b>
	SLE	330	1.0	<b>330</b>

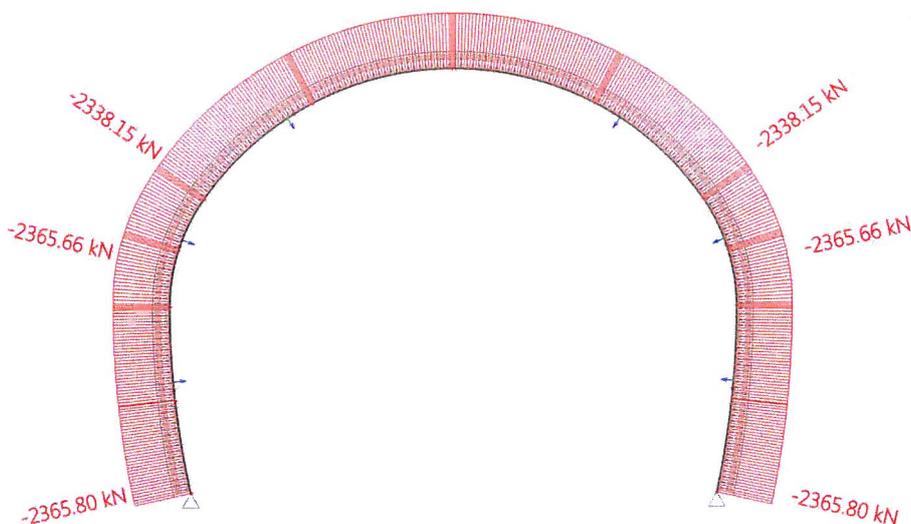
*Tabella 3 – Combinazioni di carico per sostegni e rivestimenti*

#### 4.4.3 Risultati

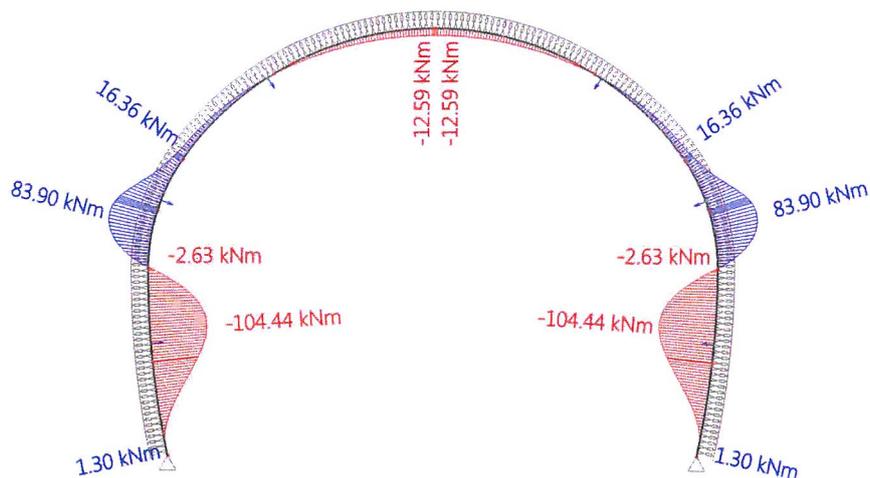
Di seguito sono riportati i diagrammi delle sollecitazioni per i sostegni e i rivestimenti nelle varie combinazioni considerate.

##### Sostegni - SLU

La **Figura 5** e la **Figura 6** mostrano i diagrammi di sforzo normale e momento flettente per la combinazione a SLU sui sostegni di prima fase.



*Figura 5 – SLU – Sforzo normale sui sostegni di prima fase*

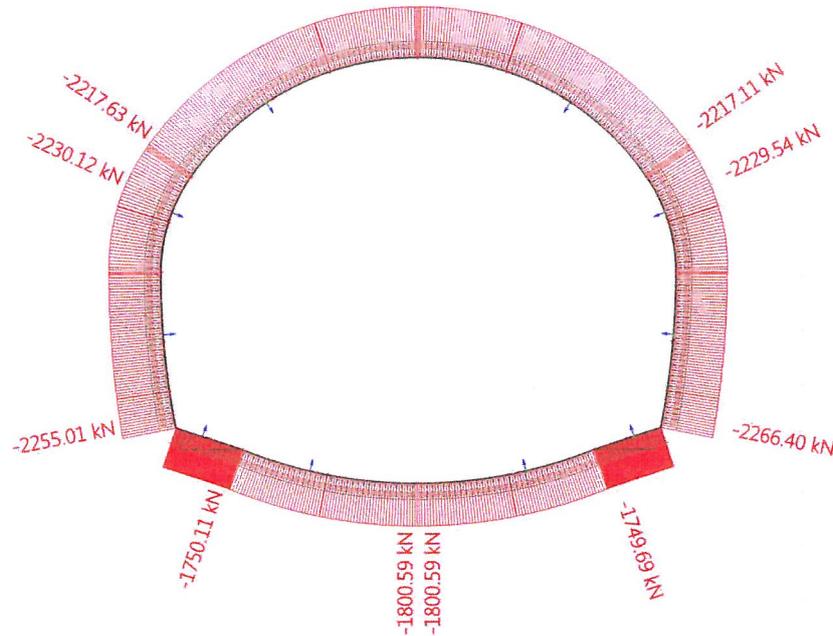


**Figura 6** – SLU – Momento flettente sui sostegni di prima fase

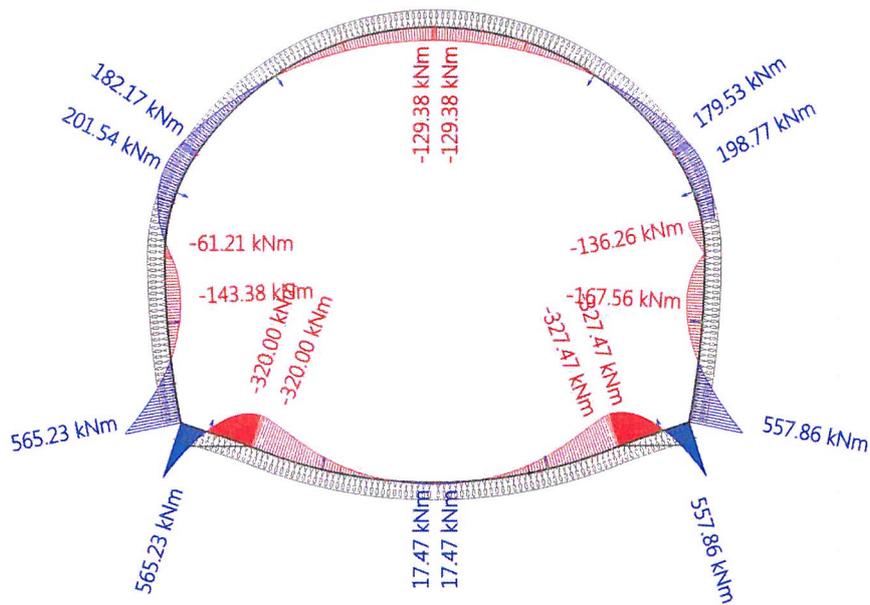
La combinazione di sollecitazioni determinante si trova sui piedritti, in corrispondenza della sezione con momento flettente massimo.

### Rivestimenti definitivi - SLU

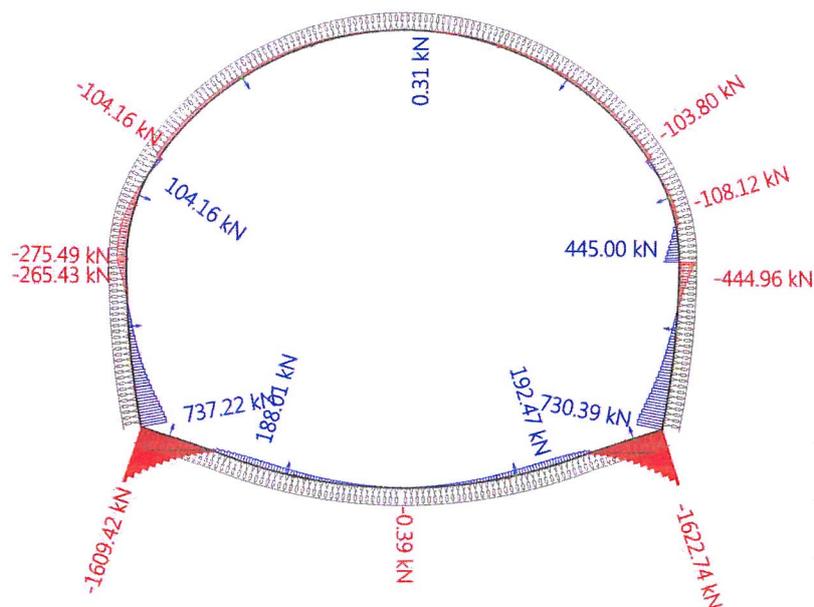
I diagrammi di sforzo normale, momento flettente e taglio per la combinazione a SLU sui rivestimenti definitivi sono illustrati nella **Figura 7**, nella **Figura 8** e nella **Figura 9**.



**Figura 7** – SLU – Sforzo normale sui rivestimenti definitivi



**Figura 8** – SLU – Momento flettente sui rivestimenti definitivi



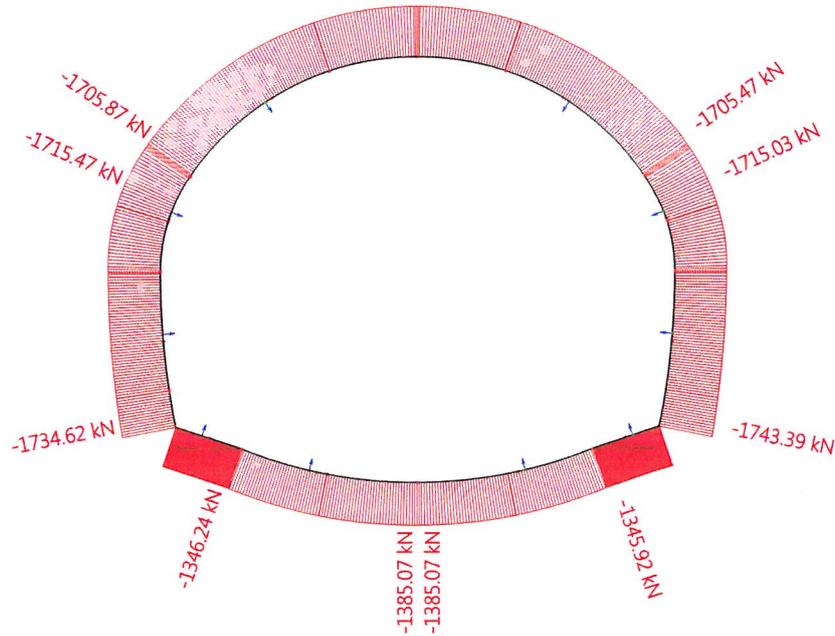
**Figura 9** – SLU – Sforzo di taglio sui rivestimenti definitivi

Il picco di momento flettente (565.23 kNm) si raggiunge nel nodo di giunzione tra calotta e piedritto. Tuttavia tali picchi sono stati scartati, in quanto il nodo risulta situato all'interno della muretta, elemento tozzo non simulabile con un comportamento a trave. La verifica a sforzo normale e momento flettente è stata dunque compiuta in corrispondenza delle reali sezioni di attacco del piedritto e della calotta con la muretta.

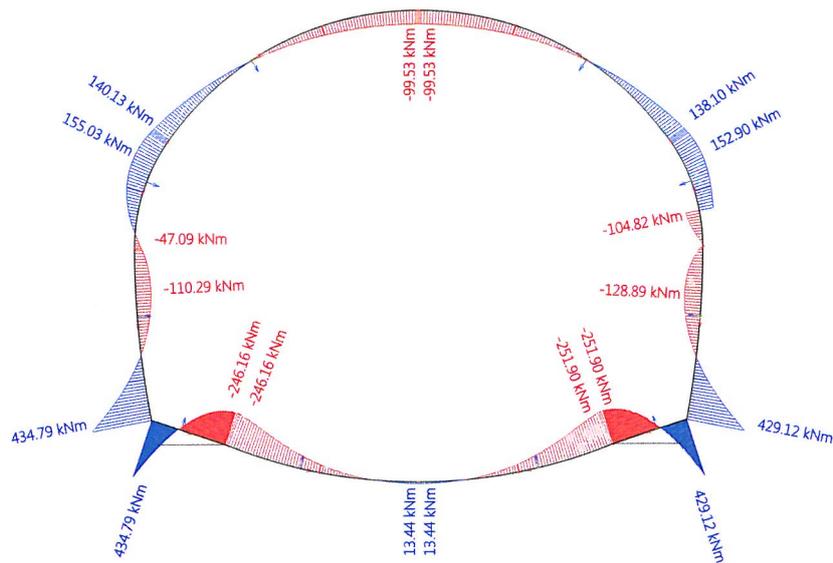
Per quanto riguarda lo sforzo di taglio, la verifica è stata compiuta ad una distanza pari a  $d/2$  (metà dell'altezza utile della sezione) dalle sezioni di attacco del piedritto e dell'arco rovescio con la muretta (secondo la teoria del traliccio di Morsch).

### Rivestimenti definitivi - SLE

I diagrammi di sforzo normale e momento flettente per la combinazione a SLE sui rivestimenti definitivi sono illustrati nella **Figura 10** e nella **Figura 11**.



**Figura 10** – SLE – Sforzo normale sui rivestimenti definitivi



**Figura 11** – SLE – Momento flettente sui rivestimenti definitivi

## 5. VERIFICHE STRUTTURALI SULLE SEZIONI

### 5.1 Materiali e resistenze di calcolo

Di seguito sono riportati i materiali impiegati e le resistenze di calcolo considerate per i sostegni di prima fase e i rivestimenti definitivi.

#### 5.1.1 Sostegni di prima fase

Calcestruzzo proiettato C25/30 fibrorinforzato, spessore 20 cm:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1.5} = 20 \text{ MPa}$$

Lo strato di calcestruzzo proiettato senza fibre (5 cm) non è stato considerato ai fini del calcolo in quanto ha una funzione di semplice finitura e protezione del sistema di impermeabilizzazione.

Centine HEB 180 in acciaio S235, passo 1.0 m:

$$f_{yk} = 235 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.05} = 223.8 \text{ MPa}$$

#### 5.1.2 Rivestimento definitivo

Calcestruzzo C30/37

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{1.5} = 17 \text{ MPa}$$

Dove:

$\alpha_{cc} = 0.85$  coefficiente da applicarsi in caso di azioni di lunga durata

Acciaio per armature B450C

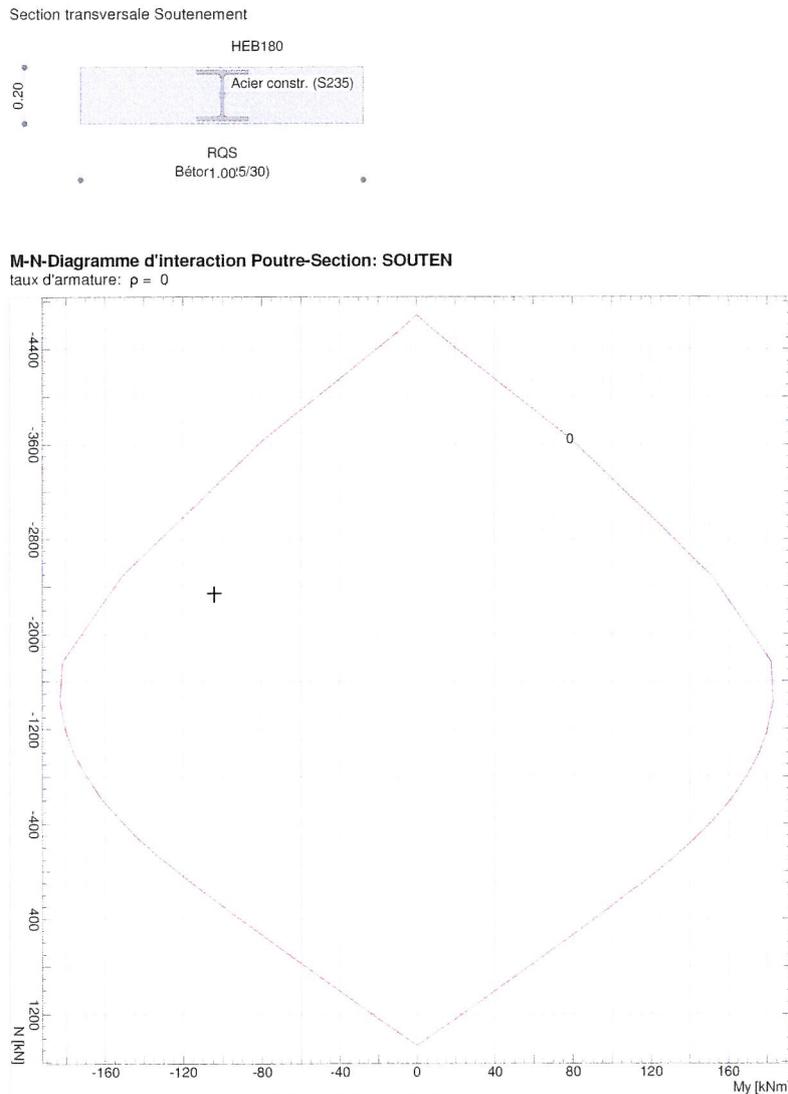
$$f_{yk} = 450 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = 391 \text{ MPa}$$

La verifica è stata effettuata per la calotta/piedritto con barre  $\phi 16$  disposte con passo 20 cm, e per l'arco rovescio  $\phi 20$  con passo 20 cm. In entrambi i casi l'armatura è stata ipotizzata come simmetrica (uguale in intradosso ed estradosso).

## 5.2 Verifiche allo SLU sui sostegni di prima fase

Per i sostegni di prima fase sono state compiute le verifiche a SLU per pressoflessione. Il diagramma di interazione della sezione mista (calcestruzzo proiettato + centine), determinato mediante il programma Fagus, è illustrato nella **Figura 12**.



*Figura 12 – Diagramma di interazione sostegni di prima fase*

La coppia di sollecitazioni di momento e sforzo normale maggiormente dimensionanti si produce all'altezza del piedritto, in corrispondenza del momento flettente massimo:

$$N_d = 2344.6 \text{ kN}$$

$$M_d = 104.4 \text{ kNm}$$

Tale coppia di sollecitazioni cade all'interno del diagramma di interazione. Le condizioni di sicurezza richieste sono dunque soddisfatte.

### 5.3 Verifiche allo SLU sui rivestimenti definitivi

#### 5.3.1 Verifiche a pressoflessione

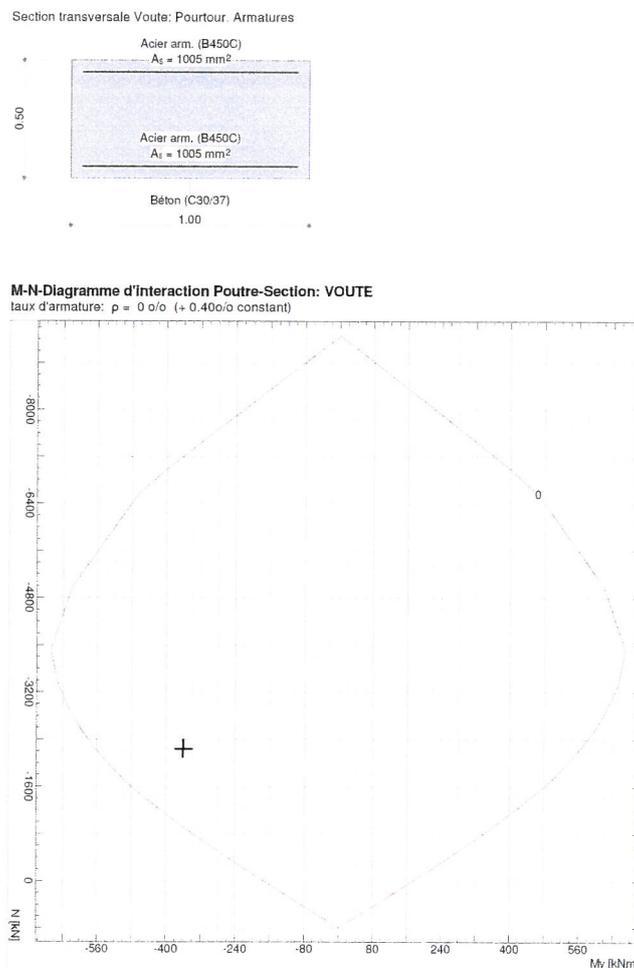
La **Tabella 4** riassume le sollecitazioni di calcolo  $N_d$  ed  $M_d$  per le verifiche a pressoflessione.

Elem. strutturale	$N_d$ (kN)	$M_d$ (kNm)
Calotta - piedritto	2237.1	364.7
Arco rovescio	1748.9	327.5

**Tabella 4** – Combinazioni di sollecitazioni allo SLU per i rivestimenti definitivi

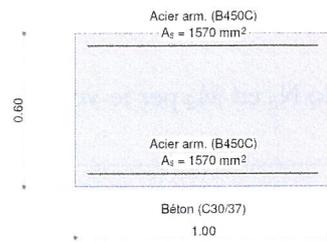
Come detto, tali combinazioni di sollecitazione hanno luogo in corrispondenza delle sezioni di attacco del piedritto e dell'arco rovescio con la muretta.

Le coppie di sollecitazioni risultano all'interno dei domini di resistenza, riportati rispettivamente nella **Figura 13** e nella **Figura 14**. Le condizioni di sicurezza richieste sono dunque soddisfatte.



**Figura 13** – Diagramma di interazione per calotta e piedritto

Section transversale Contre-voute: Pourtour, Armatures



M-N-Diagramme d'interaction Poutre-Section: CONTRE-VOUTE  
 taux d'armature:  $\rho = 0$  o/o (+ 0.52o/o constant)

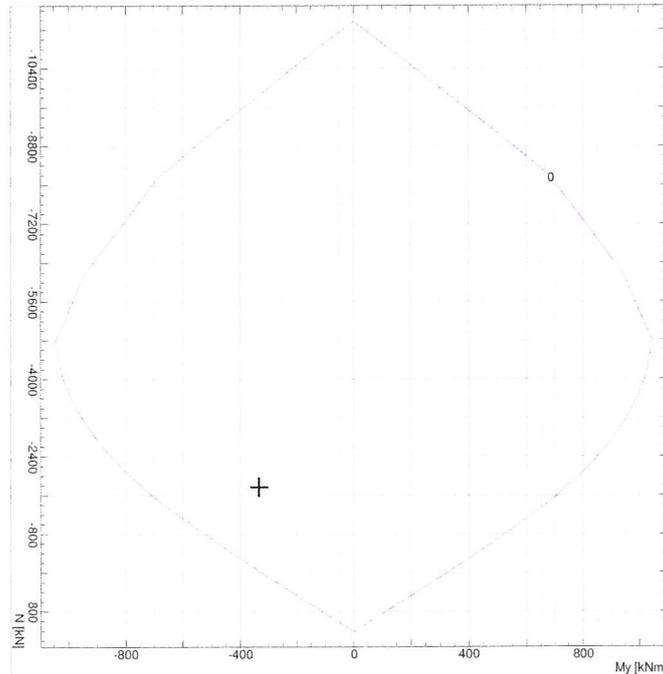


Figura 14 – Diagramma di interazione per l'arco rovescio

### 5.3.2 Verifiche a taglio

In **Tabella 5** sono riportate le sollecitazioni di taglio e le sollecitazioni di sforzo normale corrispondente, determinate ad una distanza  $d/2$  dall'attacco del piedritto e dell'arco rovescio con la muretta.

Elem. strutturale	$V_d$ (kN)	$N_d$ (kNm)
Calotta - piedritto	615.3	2243.0
Arco rovescio	157.5	1753.7

Tabella 5 – Sollecitazioni di taglio e corrispondenti valori di sforzo normale

Le verifiche hanno evidenziato l'esigenza di armature a taglio alla base del piedritto. Si sono disposte staffe chiuse  $\phi 14$  con passo 20 cm nella direzione trasversale e 40 cm in direzione

longitudinale (lungo l'asse della galleria). La disposizione di tali staffe sarà studiata in dettaglio nella fase di progettazione esecutiva.

Per il piedritto si è considerato il reale spessore (60 cm) in corrispondenza della sezione di verifica.

In **Tabella 6** le azioni di taglio sono messe a confronto con le sollecitazioni resistenti per elementi non armati a taglio ( $V_{rd,c}$ ) e per elementi armati a taglio ( $V_{rd}$ ).

Elem. strutturale	$V_d$ (kN)	$V_{rd,c}$ (kN)	$V_{rd}$ (kN)
Calotta - piedritto	615.3	543.5	<b>745.4</b>
Arco rovescio	157.5	<b>513.9</b>	-

*Tabella 6 – Verifiche a taglio*

Per il piedritto, la presenza di armatura a taglio comporta uno sforzo normale di trazione aggiuntivo nelle armature a trazione pari a  $\Delta F_{td} = 307.65$  kN.

Da cui uno sforzo di momento aggiuntivo pari a:

$$\Delta M = \Delta F_{td} \cdot 0.9d = 152.3 \text{ kNm}$$

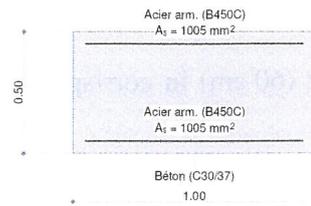
I valori di momento e sforzo normale in tale sezione saranno dunque pari a:

$$N_d = 2243 \text{ kN}$$

$$M_d' = M_d + \Delta M = 450.1 \text{ kN}$$

Entrando con tali valori nel dominio di interazione della sezione resistente per calotta e piedritti, si può vedere come le verifiche risultino soddisfatte (**Figura 15**).

Section transversale Voute: Pourtour, Armatures



M-N-Diagramme d'interaction Poutre-Section: VOUTE

taux d'armature:  $\rho = 0$  o/o (+ 0.40 o/o constant)

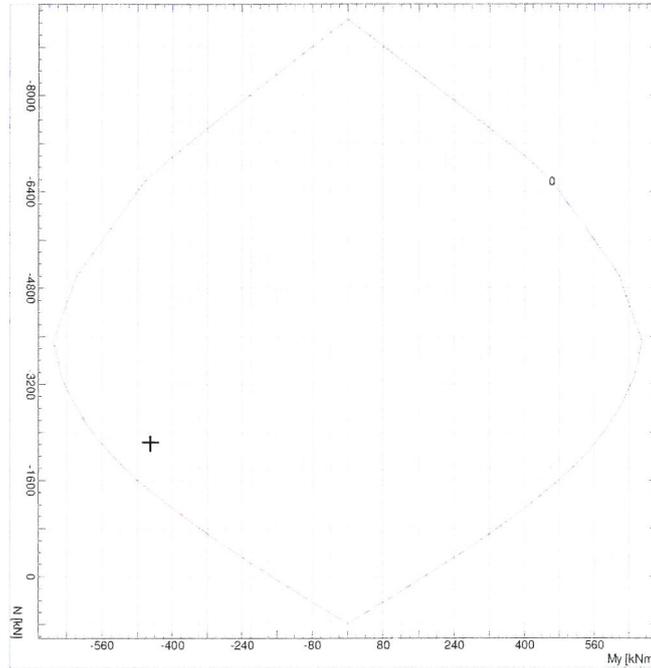


Figura 15 – Diagramma di interazione per la calotta (con effetto dell'armatura a taglio)

#### 5.4 Verifiche allo SLE – controllo delle tensioni nei rivestimenti definitivi

Per i rivestimenti definitivi è stata compiuta la verifica allo SLE per il controllo delle tensioni in esercizio.

Le tensioni massime nel calcestruzzo e nell'acciaio in esercizio dovranno rispettare le seguenti condizioni:

$$\sigma_c < 0.45 f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s < 0.8 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$$

La riassume le sollecitazioni di calcolo  $N_d$  ed  $M_d$  allo SLE.

<b>Elem. strutturale</b>	<b>N<sub>d</sub> (kN)</b>	<b>M<sub>d</sub> (kNm)</b>
Calotta - piedritto	1720.8	280.5
Arco rovescio	1345.3	251.9

*Tabella 7 – Combinazioni di sollecitazioni allo stato limite di esercizio*

Si sono ottenuti i valori di tensione in esercizio riportati in **Tabella 8**.

<b>Elem. strutturale</b>	<b><math>\sigma_c</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_s</math> (MPa)</b>
Calotta - piedritto	11.8	39.7
Arco rovescio	7.1	19.8

*Tabella 8 – Tensioni di esercizio nei rivestimenti definitivi*

I valori di tensione nelle sezioni sono inferiori ai valori limite imposti dalla norma. Le verifiche sono pertanto soddisfatte.

I dettagli delle verifiche, eseguite con il programma Fagus, sono riportati nell'**Allegato 1**.

## 6. Conclusioni

La presente relazione descrive il dimensionamento e la verifica dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi delle nicchie della galleria della Maddalena.

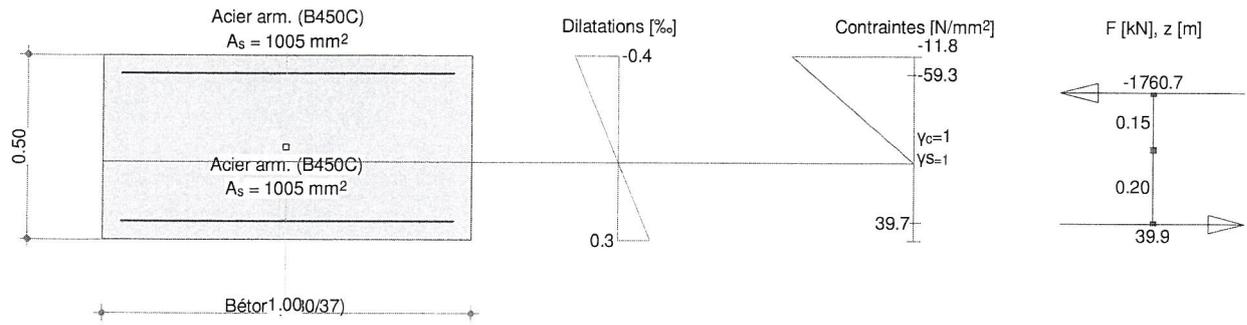
Per i sostegni di prima fase sono state compiute le verifiche di pressoflessione a SLU. Per i rivestimenti definitivi si sono svolte verifiche allo stato SLU per pressoflessione e per taglio, e allo SLE per il controllo delle tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio.

Tutte le verifiche compiute risultano soddisfatte.

## **ALLEGATO 1 : Verifiche allo SLE – Controllo delle tensioni**

Controllo tensioni SLE:  $N_x = -1720.8; M_y = 280.5;$

Échelle 1 : 19.8



### Calcul des contraintes Poutre-Section: VOUTE

#### Sollicitations

No	Paramètres d'analyse	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]	Remarques
1	AP1: Aptitude au service	-1720.8	280.5	XXX	

XXX : Calcul à la flexion simple autour de l'axe Y!!

#### Paramètres d'analyse "AP1: Aptitude au service", Norme: Eurocode ENV/EN

ID	σ-ε-Diagramme				Élong. limite			Contraint.	Facteurs de résistance				Divers			
	c	s	p	a	ε <sub>cu,c</sub> [‰]	ε <sub>cu,b</sub> [‰]	ε <sub>su</sub> [‰]		σ <sub>s,adm</sub> [N/mm²]	γ <sub>c</sub> [-]	γ <sub>s</sub> [-]	γ <sub>p</sub> [-]	γ <sub>a</sub> [-]	α [-]	φ [-]	P(t) [-]
AP1	1/0	1	1	1				200.0	1.00	1.00	1.00	1.00	45.00	0	t=0	-

#### Contraintes et dilatations extrêmes

Nom	Classe	y <sub>q</sub> [m]	z <sub>q</sub> [m]	ε [‰]	σ <sub>d</sub> [N/mm²]	γ [-]
RQS	C30/37	0.50	0.25	-0.4	-11.8	1.00
RQS	C30/37	-0.50	-0.25	0.3	0	1.00
RE1	B450C	-0.45	0.20	-0.3	-59.3	1.00
RE2	B450C	-0.45	-0.20	0.2	39.7	1.00

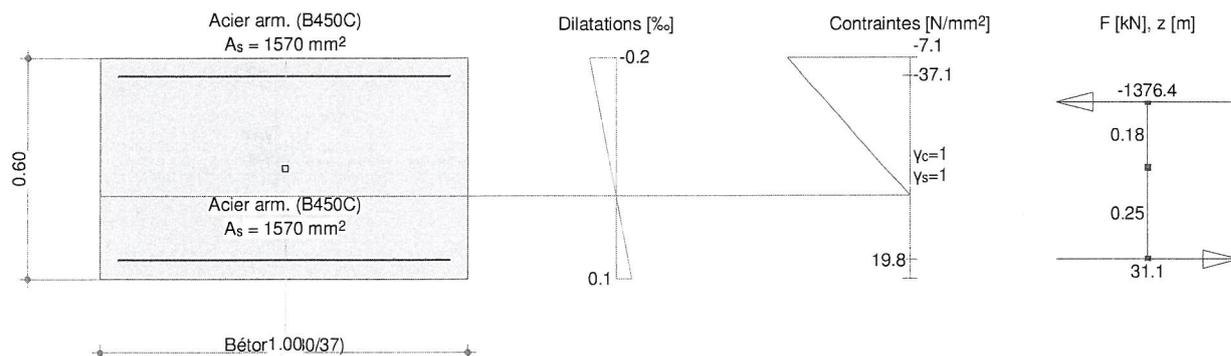
#### Contraintes calculées dans la section homogène (matériau linéaire)

Nom	Pondération	y <sub>q</sub> [m]	z <sub>q</sub> [m]	σ <sub>elast</sub> [N/mm²]
RQS	1.00	0.50	0.25	-10.2
RQS	1.00	-0.50	-0.25	3.3

Nr.:

Controllo tensioni:  $N_x=-1345.3; M_y=251.9;$

Échelle 1 :19.8



### Calcul des contraintes Poutre-Section: CONTRE-VOUTE

#### Sollicitations

No	Paramètres d'analyse	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]	Remarques
1	AP1: Aptitude au service	-1345.3	251.9	XXX	

XXX : Calcul à la flexion simple autour de l'axe Y!!

#### Paramètres d'analyse "AP1: Aptitude au service", Norme: Eurocode EN/EN

ID	σ-ε-Diagramme				Élong. limite			Contraint.	Facteurs de résistance				Divers			
	c	s	p	a	ε <sub>cu,c</sub> [%]	ε <sub>cu,b</sub> [%]	ε <sub>su</sub> [%]		σ <sub>s,adm</sub> [N/mm²]	γ <sub>c</sub> [-]	γ <sub>s</sub> [-]	γ <sub>p</sub> [-]	γ <sub>a</sub> [-]	α [-]	φ [-]	P(t) [-]
AP1	1/0	1	1	1				200.0	1.00	1.00	1.00	1.00	45.00	0	t=0	-

#### Contraintes et dilatations extrêmes

Nom	Classe	y <sub>q</sub> [m]	z <sub>q</sub> [m]	ε [%]	σ <sub>d</sub> [N/mm²]	γ [-]
RQS	C30/37	0.50	0.30	-0.2	-7.1	1.00
RQS	C30/37	-0.50	-0.30	0.1	0	1.00
RE1	B450C	-0.45	0.25	-0.2	-37.1	1.00
RE2	B450C	-0.45	-0.25	0.1	19.8	1.00

#### Contraintes calculées dans la section homogène (matériau linéaire)

Nom	Pondération	y <sub>q</sub> [m]	z <sub>q</sub> [m]	σ <sub>elast</sub> [N/mm²]
RQS	1.00	0.50	0.30	-6.4
RQS	1.00	-0.50	-0.30	2.0

Nr.: