

ITINERARIO INTERNAZIONALE E78 S.G.C. GROSSETO – FANO  
Tratto Selci Lama (E45) – S. Stefano di Gaifa  
Adeguamento a 2 corsie della Galleria della Guinza (lotto 2)  
e del tratto Guinza – Mercatello Ovest (lotto 3)  
1° stralcio

**PROGETTO ESECUTIVO**

COD. AN58

PROGETTAZIONE:  
RAGGRUPPAMENTO  
TEMPORANEO PROGETTISTI

MANDATARIA:



MANDANTI:



**sinergo**

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI  
SPECIALISTICHE:

Ing. Riccardo Formichi – Società Pro Iter Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. 18045

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Massimo Mezzanica – Società Pro Iter Srl  
Albo Geol. Lombardia n. A762

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Massimo Mangini – Società Erre.Via Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Varese n. 1502

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO:

Dott. ing. Vincenzo Catone

PROTOCOLLO:

DATA:

OPERE D'ARTE MAGGIORI:

Ing. Enrico Maria Pizzarotti – Società Pro Iter Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. A29470



*Catone*

**06 - OPERE D'ARTE MAGGIORI IN SOTTERRANEO**  
**06.01 - GN.01 - GALLERIA GUINZA - GALLERIA NATURALE**

Relazione di calcolo - Intervento Tipo A - Sezione corrente

CODICE PROGETTO			NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00GN01OSTRE01A.pdf			
L0702M	E	2101	CODICE ELAB. T00GN01OSTRE01		A	-
D						
C						
B						
A	EMISSIONE		FEBBRAIO 2023	CASSANEGO	MOJA	PIZZAROTTI
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

# INDICE

1	INTRODUZIONE .....	1
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	4
2.1	Normativa .....	4
2.2	Documenti del Progetto Definitivo .....	4
2.3	Documenti del Progetto Esecutivo .....	4
2.4	Bibliografia .....	4
2.5	Programmi di calcolo .....	4
3	MATERIALI.....	5
3.1	Calcestruzzo per rivestimenti definitivi .....	5
3.2	Betoncino proiettato fibrorinforzato.....	5
3.3	Malta per la cementazione di infilaggi e ancoraggi.....	6
3.4	Acciaio per cemento armato tipo B450C .....	6
3.5	Acciaio per centine S275 .....	7
3.6	Elementi tubolari in vetroresina .....	7
4	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA .....	8
5	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	9
6	FASI ESECUTIVE E DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO .....	10
6.1	Fasi esecutive dell'intervento tipo A .....	10
6.1.1	<i>Fase 1</i> .....	10
6.1.2	<i>Fase 2</i> .....	10
6.1.3	<i>Fase 3</i> .....	10
6.1.4	<i>Fase 4</i> .....	10
6.1.5	<i>Fase 5</i> .....	11
6.2	Sezione corrente – stato di fatto .....	11
6.3	Sezione corrente – configurazione finale.....	11
7	DESCRIZIONE DELL'ANALISI.....	13
7.1.1	<i>Modello di calcolo</i> .....	13

7.1.2	<i>Geometria</i> .....	13
7.1.3	<i>Legame costitutivo dell'ammasso</i> .....	14
7.1.4	<i>Elementi strutturali</i> .....	14
7.2	Step di calcolo .....	19
7.3	Condizioni di carico sul rivestimento definitivo .....	20
7.3.1	<i>Carico idraulico</i> .....	20
7.3.2	<i>Applicazione del carico sismico</i> .....	21
7.4	Risultati .....	23
8	VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....	24
8.1.1	<i>Verifiche dei rivestimenti allo stato limite ultimo</i> .....	24
8.1.1.1	<i>Verifica a pressoflessione</i> .....	24
8.1.1.2	<i>Verifica a taglio</i> .....	24
8.1.2	<i>Verifiche a Stato Limite di Esercizio</i> .....	24
8.1.2.1	<i>Verifica di limitazione delle tensioni</i> .....	25
8.1.2.2	<i>Verifica dello stato limite di fessurazione</i> .....	25
8.2	Rivestimento di prima fase – stato di fatto .....	26
8.2.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	26
8.2.2	<i>Risultati</i> .....	26
8.3	Rivestimento definitivo - stato di fatto .....	27
8.3.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	27
8.3.2	<i>Risultati</i> .....	27
8.4	Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto .....	29
8.4.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	29
8.4.2	<i>Risultati</i> .....	29
8.5	Rivestimento definitivo – configurazione di progetto .....	30
8.5.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	30
8.5.2	<i>Verifiche a Stato Limite di Esercizio</i> .....	30
8.5.3	<i>Risultati</i> .....	31
9	CONCLUSIONI .....	32

10	ELENCO ALLEGATI .....	33
11	ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE .....	34
12	ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL’ANALISI .....	36
13	ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....	83
13.1	Rivestimento di prima fase – stato di fatto.....	83
13.1.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	83
13.1.1.1	<i>Verifiche a pressoflessione</i> .....	84
13.1.1.2	<i>Verifiche a taglio</i> .....	84
13.2	Rivestimento definitivo - stato di fatto.....	85
13.2.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	85
13.2.1.1	<i>Verifiche a pressoflessione</i> .....	86
13.2.1.2	<i>Verifiche a taglio</i> .....	87
13.3	Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto .....	91
13.3.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	91
13.3.1.1	<i>Verifiche a pressoflessione</i> .....	92
13.3.1.2	<i>Verifiche a taglio</i> .....	92
13.4	Rivestimento definitivo – configurazione di progetto .....	93
13.4.1	<i>Verifiche a Stato Limite Ultimo</i> .....	93
13.4.1.1	<i>Verifiche a pressoflessione</i> .....	94
13.4.1.2	<i>Verifiche a taglio</i> .....	95
13.4.2	<i>Verifiche a Stato Limite di Esercizio</i> .....	99
13.4.2.1	<i>Verifica di limitazione delle tensioni</i> .....	100
13.4.2.2	<i>Verifica dello stato limite di fessurazione</i> .....	103

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione si inserisce nel contesto del Progetto Esecutivo – Itinerario Internazionale E78 S.G.C. Grosseto–Fano – Adeguamento a 2 corsie della Galleria della Guinza (lotto 2) e del tratto Guinza - Mercatello Ovest (lotto 3) – e ha come obiettivo quello di illustrare i risultati delle analisi svolte per il dimensionamento degli interventi consolidamento previsti per la messa in sicurezza della sezione corrente della Galleria Naturale della Guinza

Le operazioni di consolidamento si sono rese necessarie in seguito ai risultati delle indagini georadar che hanno evidenziato, in diversi tratti della galleria, spessori del rivestimento definitivo inferiori a quelli di progetto. L'intervento, denominato di tipo A, consiste nella completa demolizione (a meno di una porzione centrale di arco rovescio) dei tratti di galleria interessati da sottospessori inferiori a 30 cm sia in calotta che in corrispondenza dei piedritti. L'ammasso viene successivamente sottoposto a fresatura al fine di garantire gli spessori minimi di progetto. Vengono infine realizzati il rivestimento di prima fase e il rivestimento definitivo nelle tratte riprofilate.

In Figura 1 sono riportati gli architettonici della sezione corrente allo stato attuale e in condizione di esercizio, ovvero ad intervento realizzato. La galleria ospiterà una piattaforma stradale costituita da una corsia di marcia, di larghezza pari a circa 3.5 m, una corsia di emergenza di larghezza pari a 3.5 m e una banchina larga 1 m.

Allo stato di fatto la Galleria della Guinza è una galleria naturale a canna singola di lunghezza pari a 5960 m, realizzata nell'Appennino umbro-marchigiano. Il tracciato ha origine nel comune di Mercatello sul Metauro (PU) a 580 m s.l.m. e termina sul lato umbro nel comune di San Giustino (PG) a circa 556 m s.l.m., con una pendenza dello 0.4%.

La galleria si sviluppa interamente nella formazione flyshoide Marnoso Arenacea, caratterizzata da alternanze di arenarie e marne più o meno argillitiche e con una denominazione che va da GA2-GA5 in funzione del rapporto tra le percentuali di marne e arenarie. L'analisi è stata condotta considerando i parametri relativi all'unità GA4, in quanto quella con caratteristiche meccaniche peggiori tra le due unità più frequenti lungo il tracciato (Paragrafo 4 - 5).

L'analisi del comportamento tensio-deformativo del cavo è stata condotta dapprima mediante il metodo delle Linee Caratteristiche e, successivamente, mediante analisi numeriche alle differenze finite FDM 2D (Paragrafo 7). Quest'ultime hanno consentito di valutare lo stato tensio-deformativo dell'ammasso e le sollecitazioni nei rivestimenti in tutte le fasi realizzative dell'opera.

Il dimensionamento dell'intervento di consolidamento (Paragrafo 8) si compone inizialmente di una back-analysis della sezione corrente a partire dallo scavo del cunicolo esplorativo fino allo stato di fatto. Lo studio viene effettuato considerando i valori caratteristici delle sollecitazioni e delle resistenze, al fine di ottenere un modello aderente alla realtà e di individuare le condizioni critiche dei rivestimenti definitivi in cui è necessario un rifacimento della sezione. I risultati della back analysis sono inoltre messi a confronto con le sollecitazioni misurate nelle indagini in galleria.

A partire dallo stato di fatto viene dimensionato il rivestimento di prima fase, costituito da centine e betoncino spruzzato, e successivamente il rivestimento definitivo in calotta e sui piedritti.

Per il dimensionamento del rivestimento definitivo, nelle analisi si è tenuto conto, oltre al peso proprio dei rivestimenti e al carico dell'ammasso, degli effetti indotti da:

- Il carico idraulico
- l'azione sismica.

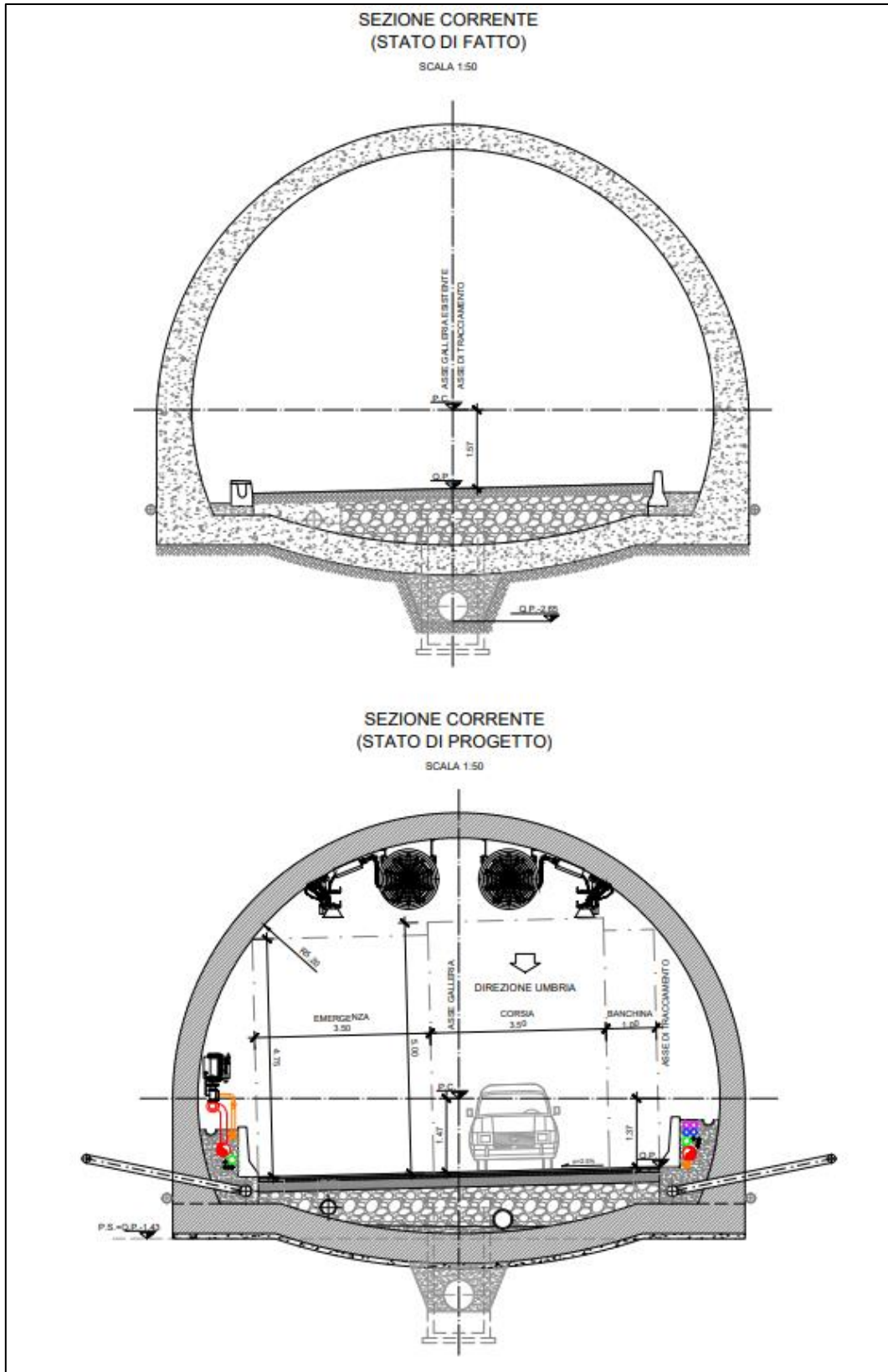


Figura 1 - Architettonici della sezione corrente allo stato di fatto e in condizioni di esercizio [8]

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa

- [1]. Ministero dei LL.PP. - D.M. 17.01.2018: "Norme tecniche per le Costruzioni".
- [2]. Ministero dei LL.PP. - Circ. 7 del 21.01.2019: Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;

### 2.2 Documenti del Progetto Definitivo

- [3]. T00GN01OSTRE01B – Galleria Guinza - Relazione descrittiva
- [4]. T00GN01OSTRE04B - Galleria Guinza - Relazione geomeccanica
- [5]. T00GN01OSTRE05B - Galleria Guinza – Relazione di calcolo interventi di consolidamento
- [6]. T00GE00GETRE02B - Geotecnica – Relazione sismica
- [7]. T00GN01OSTRE03B – Galleria Guinza - Relazione indagini in galleria

### 2.3 Documenti del Progetto Esecutivo

- [8]. T00GN01OSTSE01A – Galleria Guinza - Sezione corrente - Intervento tipo A - Fasi esecutive
- [9]. T00GN01OSTFG01A – Galleria Guinza - Profilo geomeccanico - Tav. 1
- [10]. T00SG03GENRE01A - As built e documentazione storica – Galleria Guinza
- [11]. T00GN01OSTST04A – Galleria Guinza - Sezione corrente - Intervento tipo A - Scavo
- [12]. T00SG05GENSV01A - Laserscan - Sezioni trasversali stato attuale

### 2.4 Bibliografia

- [13]. Serafim, J.L. and Pereira, J.P. (1983) Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski. Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Openings, Lisbon, Portugal, 1983, 1133-1144.
- [14]. Itasca Consulting Group, Inc. (2019) FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.1. User's Manual. Minneapolis: Itasca.
- [15]. Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I., & Yao, C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 247-293.
- [16]. No, W. G. (1996). AFTES recommendations on fibre-reinforced sprayed concrete technology and practice. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 205-214.

### 2.5 Programmi di calcolo

#### Flac 2D 8.0

HarpaCeAS – Centro di Analisi Strutturale s.r.l.

*Programma di calcolo per analisi bidimensionali alle differenze finite*



### 3 MATERIALI

#### 3.1 Calcestruzzo per rivestimenti definitivi

Classe di resistenza	C32/40	-
Rapporto massimo acqua / cemento	0.50	-
Slump	S4	-
Contenuto minimo di cemento	340	kg/m <sup>3</sup>
Diametro massimo inerte	50	mm
Classe di esposizione	XC2-XA2	-
Copriferro minimo	5.0	cm

Resistenza caratteristica a compressione cubica	$R_{ck}$	=	40.00	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza caratteristica a compressione cilindrica	$f_{ck}$	=	33.2	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza media a compressione cilindrica	$f_{cm}$	= $f_{ck}+8$	= 41.2	N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico	$E_c$	= $22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3}$	= 33642	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a trazione semplice	$f_{ctm}$	= $0.30 \times f_{ck}^{2/3}$	= 3.1	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a trazione caratteristica (frattile 5%)	$f_{ctk}$	= $0.70 \times f_{ctm}$	= 2.17	N/mm <sup>2</sup>

#### Stato Limite Ultimo

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_c$	=	1.50	-
Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata	$\alpha_{cc}$	=	0.85	-
Resistenza a compressione di calcolo	$f_{cd}$	= $\alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_c$	= 18.81	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{ctd}$	= $f_{ctk} / \gamma_c$	= 1.45	N/mm <sup>2</sup>

#### Stato Limite di Esercizio

Tensione max di compressione - Comb. rara	$\sigma_c$	< $0.60 \times f_{ck}$	= 19.92	N/mm <sup>2</sup>
Tensione max di compressione - Comb. quasi permanente	$\sigma_c$	< $0.45 \times f_{ck}$	= 14.94	N/mm <sup>2</sup>

#### 3.2 Betoncino proiettato fibrinforzato

Classe di resistenza	C25/30
a 48h	>16MPa
a 28gg	>30MPa
Rapporto massimo acqua / cemento	<0.50
Dosaggio in fibre	≥30kg/m <sup>3</sup>

Progetto Esecutivo

Resistenza caratteristica a compressione cubica	$R_{ck} =$	<b>30</b>	$N/mm^2$
Resistenza caratteristica a compressione cilindrica	$f_{ck} = 0.83 \times R_{ck}$	$= 24.90$	$N/mm^2$
Resistenza media a compressione cilindrica	$f_{cm} = f_{ck} + 8$	$= 32.90$	$N/mm^2$
Modulo elastico	$E_c = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3}$	$= 31447$	$N/mm^2$
Resistenza a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{2/3}$	$= 2.56$	$N/mm^2$
Resistenza a trazione caratteristica (frattile 5%)	$f_{ctk} = 0.70 \times f_{ctm}$	$= 1.79$	$N/mm^2$

**Stato Limite Ultimo**

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_C =$	1.5	--
Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata	$\alpha_{cc} =$	0.85	--
Resistenza a compressione di calcolo	$f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_C$	$= 14.11$	$N/mm^2$
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C$	$= 1.79$	$N/mm^2$

**Stato Limite di Esercizio**

Tensione max di compressione - Comb. rara	$\sigma_c < 0.60 \times f_{ck}$	$= 14.94$	$N/mm^2$
Tensione max di compressione - Comb. quasi permanente	$\sigma_c < 0.45 \times f_{ck}$	$= 11.21$	$N/mm^2$

**3.3 Malta per la cementazione di infilaggi e ancoraggi**

Resistenza caratteristica a compressione cubica (28gg)	$R_{ck} =$	25.00	$N/mm^2$
Resistenza media a compressione cubica (24h)	$R_{cm} =$	10.00	$N/mm^2$

**3.4 Acciaio per cemento armato tipo B450C**

Tensione caratteristica di rottura (frattile 5%)	$f_{tk} =$	540.00	$N/mm^2$
Tensione caratteristica di snervamento (frattile 5%)	$f_{yk} =$	450.00	$N/mm^2$

**Stato Limite Ultimo**

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_S =$	1.15	-
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$	$= 391.30$	$N/mm^2$

**Stato Limite di Esercizio**

Tensione max di trazione	$\sigma_s < 0.80 \times f_{yk}$	$= 360.00$	$N/mm^2$
--------------------------	---------------------------------	------------	----------

**3.5 Acciaio per centine S275**

Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} =$	430.00	N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} =$	275.00	N/mm <sup>2</sup>

**Stato Limite Ultimo**

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_s =$	1.05	-
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s =$	261.9	N/mm <sup>2</sup>

**3.6 Elementi tubolari in vetroresina**

Modulo elastico medio	$E =$	30000.00	N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura per taglio	$f_{tk} =$	140.00	N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura per trazione	$f_{trk} =$	600.00	N/mm <sup>2</sup>
Contenuto in vetro	$\geq$	55.0	%

**Stato Limite Ultimo**

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_s =$	1.5	--
Resistenza a taglio di calcolo	$f_{td} = f_{tk}/\gamma_s =$	93.33	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{trd} = f_{trk}/\gamma_s =$	400.00	N/mm <sup>2</sup>

#### 4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

Dalla relazione geomeccanica del Progetto Definitivo [4], che essenzialmente riconferma la caratterizzazione geomeccanica posta alla base del Progetto Esecutivo originario, si evince che le unità litologiche direttamente interessate dalla galleria sono principalmente l'unità G3 (50% arenaria – 50% marna) e l'unità GA4 (15% arenaria – 85% marna).

Nelle analisi sono state considerate, cautelativamente, le caratteristiche dell'unità G4 sia perché valutata con una distribuzione maggiore lungo la galleria, sia poiché con proprietà meccaniche più scadenti rispetto all'unità G3. Di seguito sono riassunti i parametri utilizzati, in accordo a quelli del Progetto Definitivo, per la caratterizzazione dell'ammasso secondo il criterio di rottura di Hoek-Brown:

- Peso per unità di volume:  $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
- Resistenza a compressione monoassiale di matrice:  $\sigma_{ci} = 30 \text{ MPa}$
- Parametro dell'involuppo di rottura:  $m_i = 10$
- Modulo di deformazione della roccia intatta:  $E_i = 9 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson:  $\nu = 0.25$
- Fattore di disturbo:  $D = 0.2$
- Modulo di deformazione dinamico:  $E_0 = 17 \text{ GPa}$
- Modulo di taglio dinamico:  $G_0 = 6.8 \text{ GPa}$

I parametri di resistenza dell'ammasso (coesione "c" e angolo di resistenza al taglio " $\phi$ ") sono stati definiti secondo il criterio di linearizzazione dell'involuppo di rottura della roccia proposto da Hoek-Brown, in funzione delle diverse classi geomeccaniche. Il modulo di deformabilità dell'ammasso ( $E_r$ ) è stato stimato, come da Progetto Definitivo, utilizzando la relazione proposta da Serafim e Pereira (1983) [13].

Nella seguente tabella sono riportati i parametri geomeccanici adottati per il dimensionamento della sezione di scavo, ricavati considerando la massima profondità della galleria, pari a 350 m, come da Progetto Definitivo [5]:

Formazione	GSI	$\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$	$\phi'$	$\phi'_{res}$	$c' \text{ [kPa]}$	$c'_{res} \text{ [kPa]}$	$\nu \text{ [-]}$	$E_r \text{ [MPa]}$	$K_0$
G4	36	26	29.1	24.1	718	509	0.25	4500	1

**Tabella 4.1 : Parametri geomeccanici**

Analogamente al Progetto Definitivo, viene cautelativamente considerata una quota di falda pari a 10 m sopra la chiave calotta per modellare l'interferenza fra la falda acquifera e la galleria.

## 5 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

All'infrastruttura in progetto, ai sensi della tabella 2.4.I del D.M. 17.01.2018, è stata attribuita una vita nominale  $V_N \geq 50$  anni nonché una classe d'uso IV ( $C_U = 2$ ). Pertanto, il periodo di riferimento per l'azione sismica vale:

$$V_R = V_N C_U = 50 \times 2.0 = 100 \text{ anni}$$

Di seguito si riportano i valori dei parametri sismici  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_c^*$  considerati nel caso in esame.

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_c^*$ [s]
SLO	60	0,098	2,349	0,274
SLD	101	0,124	2,335	0,281
SLV	949	0,288	2,397	0,314
SLC	1950	0,359	2,409	0,327

Pertanto, per la verifica riferita allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), si ottiene:

- $P_{VR} = 10 \%$
- $T_R = 949$
- $a_g = 0.288 \text{ g}$

Si è inoltre considerata una categoria sismica di sottosuolo di tipo A e una categoria topografica T1, in accordo con le proprietà dinamiche del terreno evidenziate nel Progetto Definitivo [5].

- $S_s = 1$ ;
- $S_T = 1$ .

Pertanto, l'accelerazione  $a_{max}$  da utilizzare nelle verifiche risulta essere:

$$a_{max} = a_g S_s S_T = 0.288 \text{ g}.$$

## 6 FASI ESECUTIVE E DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO

### 6.1 Fasi esecutive dell'intervento tipo A

L'intervento di tipo A consiste nella completa demolizione (a meno di una porzione centrale di arco rovescio) dei tratti di galleria interessati da sottospessori inferiori a 30 cm in calotta e nei piedritti. L'ammasso viene successivamente sottoposto a fresatura al fine di garantire gli spessori minimi di progetto. Vengono infine realizzati il rivestimento di prima fase e il rivestimento definitivo nelle tratte riprofilate.

Sono di seguito riportate le fasi esecutive dell'intervento [8].

#### 6.1.1 Fase 1

- Intervento provvisorio di sostegno del rivestimento esistente con centinatura in profilati in acciaio HEA160/1.0m per una estensione pari alla lunghezza di intervento + 5 m per lato.
- Eventuale realizzazione di 3 dreni radiali i.long.=2.0 m L=10.0 m.
- Consolidamento ammasso a tergo della calotta con 17 VTR Ø60mm/2m L=6.0 m cementati in foro i=2m disposti a quinconce, diametro di perforazione  $\varnothing > 100$  mm

#### 6.1.2 Fase 2

- Demolizione controllata e successiva asportazione di una fascia di rivestimento di profondità pari a 2 m, esclusa la porzione centrale di arco rovescio larga circa 7.1 m a cavallo della mezzeria.
- Demolizione e successiva asportazione del rivestimento di prima fase (betoncino proiettato e centine) per una fascia di profondità di 2 m.
- Fresatura dell'ammasso per una fascia di profondità di 2 m.

#### 6.1.3 Fase 3

- Realizzazione del rivestimento di prima fase costituito da coppia di centine metalliche IPN160 disposte ad interasse 1.0 m e spritz beton fibrorinforzato di spessore 5+15 cm
- Reiterazione delle operazioni di demolizione ed esecuzione dei prerivestimenti fino alla lunghezza massima di 12 m
- Realizzazione del betoncino proiettato di regolarizzazione di spessore 5 cm
- Getto delle murette per campi di lunghezza massima pari a 12 m con possibilità di inghisaggio di collegamento in mezzeria con la porzione di arco rovescio intatta

#### 6.1.4 Fase 4

- Una volta posata l'impermeabilizzazione si procede alla posa delle armature e al getto del rivestimento definitivo di completamento della struttura. Si suggerisce spessore minimo di 50 cm con incidenza armatura pari a 100 kg/m<sup>3</sup>

### 6.1.5 Fase 5

- Completamento delle finiture interne e dotazioni impiantistiche

## 6.2 Sezione corrente – stato di fatto

Le caratteristiche dei rivestimenti di prima fase e definiti della sezione corrente sono ricavate dalla back-analysis eseguita nel Progetto Definitivo [5], integrate con la documentazione di Progetto Esecutivo (1997) e le tavole as-built a disposizione [10].

Lo scavo è stato realizzato in allargamento del foro pilota con sfondi di profondità massima 1 m. La sezione prevede i seguenti interventi:

- Rivestimento di prima fase composto da 20 cm di betoncino proiettato C20/25 fibrorinforzato mediante fibre metalliche (30 kg/m<sup>3</sup>) armato con doppie centine IPN180 in acciaio S275 a passo 1 m più 5 cm di betoncino proiettato di regolarizzazione C20/25;
- Getto dell'arco rovescio, spessore 60 cm (C25/30), ad una distanza dal fronte non vincolata;
- Impermeabilizzazione della calotta costituita da manto in PVC protetto con uno strato di tessuto non tessuto;
- Rivestimento definitivo in calotta, spessore 50 cm (C25/30), gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata

## 6.3 Sezione corrente – configurazione finale

Le caratteristiche del rivestimento di prima fase e del rivestimento definitivo della calotta e dei piedritti a seguito della riprofilatura sono definite a partire dalla relazione di calcolo di Progetto Definitivo [5].

- Rivestimento di prima fase composto da 5+15 cm di betoncino proiettato C25/30 fibrorinforzato mediante fibre metalliche (30 kg/m<sup>3</sup>) armato con doppie centine IPN160 in acciaio S275 a passo 1 m più 5 cm di betoncino proiettato di regolarizzazione C25/30;
- Impermeabilizzazione della calotta costituita da manto in PVC protetto con uno strato di tessuto non tessuto;
- Rivestimento definitivo in calotta, spessore 50 cm (C32/40), armato con barre B450C.

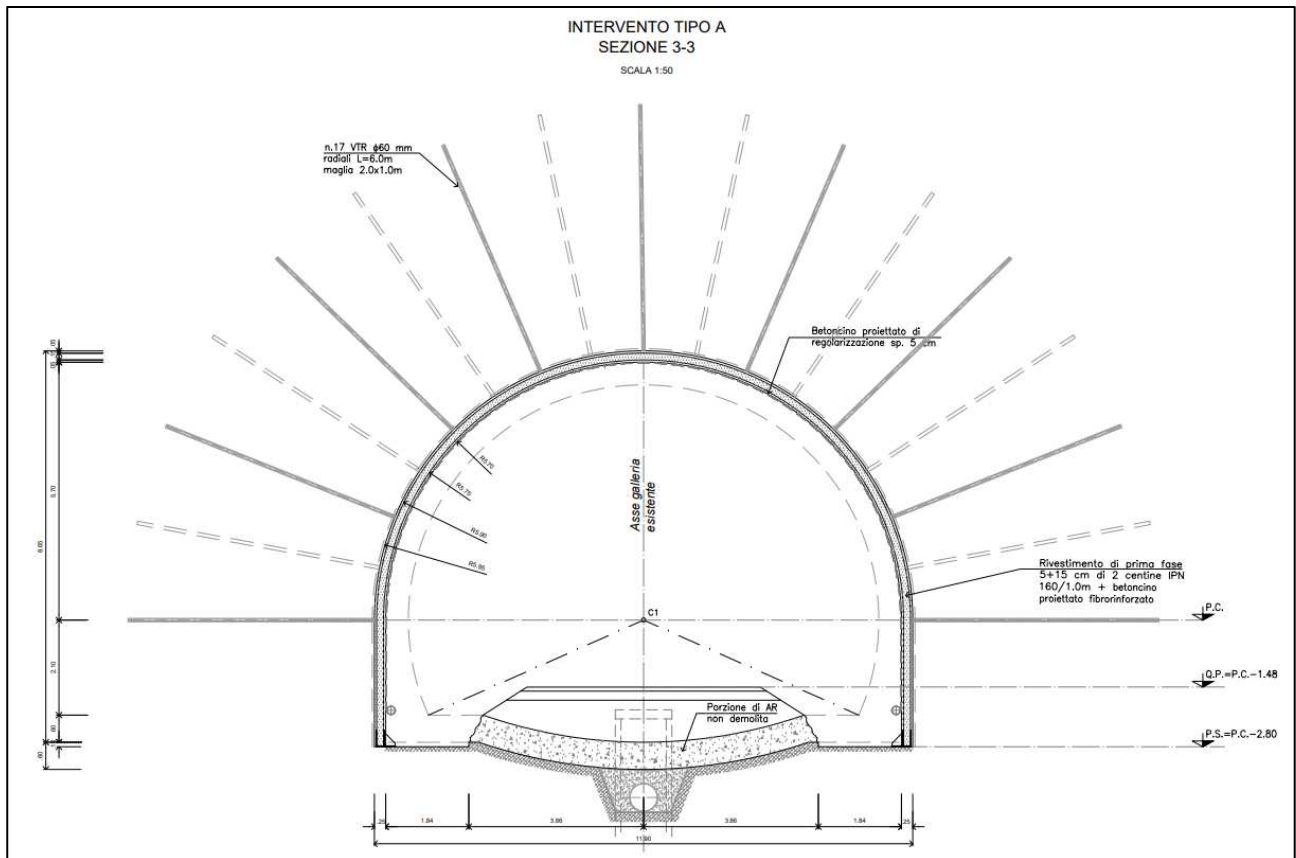


Figura 2 - Sezione di scavo della Galleria Naturale - Sezione corrente – Intervento A [11]



## 7 DESCRIZIONE DELL'ANALISI

Nel seguito del presente capitolo sono riportati:

- la descrizione dei modelli di calcolo adottati per lo svolgimento delle analisi FDM 2D (geometria dei modelli e proprietà meccaniche dei vari elementi strutturali modellati);
- la descrizione degli step di calcolo dell'analisi;
- la definizione dei carichi applicati al rivestimento definitivo.

Le analisi sono state svolte nell'ipotesi di deformazioni piane, simulando l'effetto del fronte mediante l'utilizzo delle forze fittizie di scavo (FFS).

### 7.1.1 Modello di calcolo

### 7.1.2 Geometria

Come già osservato nell'introduzione, la massima distanza tra la calotta e il piano campagna è pari a 310 m. Per le analisi FDM 2D è stato utilizzato un modello quadrato di larghezza 200 m e altezza 200 m con il piano dei centri posto al centro del modello e con mesh costituita da elementi quadrati di dimensione 5x5m. Sono stati previsti due livelli di infittimento della mesh nell'intorno della sezione di scavo, rispettivamente di dimensioni 1x1 m e 0.5x0.5 m. Le condizioni di vincolo al contorno del modello prevedono spostamenti impediti in entrambe le direzioni lungo il bordo inferiore e spostamenti impediti in direzione orizzontale lungo i bordi verticali.

Lo stato di sforzo in sito è valutato secondo le seguenti relazioni:

$$\sigma_y = \gamma_N \cdot z$$

$$\sigma_x = k_0 \cdot \sigma_z$$

dove:

z = distanza del generico elemento dal piano campagna;

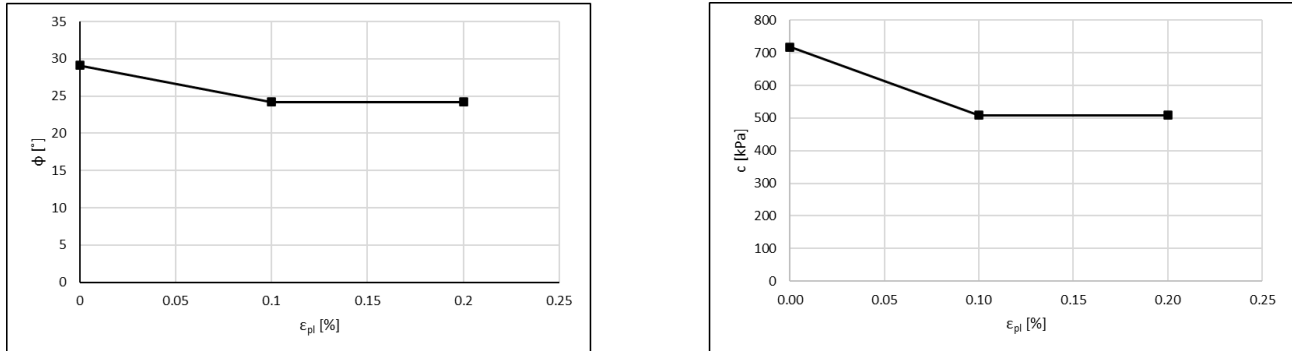
k<sub>0</sub> = coefficiente di spinta orizzontale.

Per simulare le tensioni litostatiche misurate alla effettiva profondità della galleria è stato applicato all'estremo superiore del modello una pressione pari al peso di volume del materiale roccioso moltiplicato per la differenza tra la copertura massima (310 m) e l'altezza del modello riferita al piano dei centri (100 m)

Nelle analisi si sono considerate larghezza e altezza massima di scavo di ogni sezione.

### 7.1.3 Legame costitutivo dell'ammasso

Per la modellazione dell'ammasso roccioso è stato utilizzato un legame costitutivo Strain-Softening con legge di flusso non associata (dilatanza  $\psi <$  angolo di resistenza al taglio  $\phi$ ), basato sul criterio di plasticità Mohr-Coulomb che prevede, una volta raggiunta la superficie di plasticizzazione, definita inizialmente mediante i parametri di resistenza a taglio e coesione di picco  $\phi_p$ ,  $c_p$ , che tali parametri decrescano in funzione dell'aumentare della deformazione plastica fino al raggiungimento dei corrispettivi valori residui.



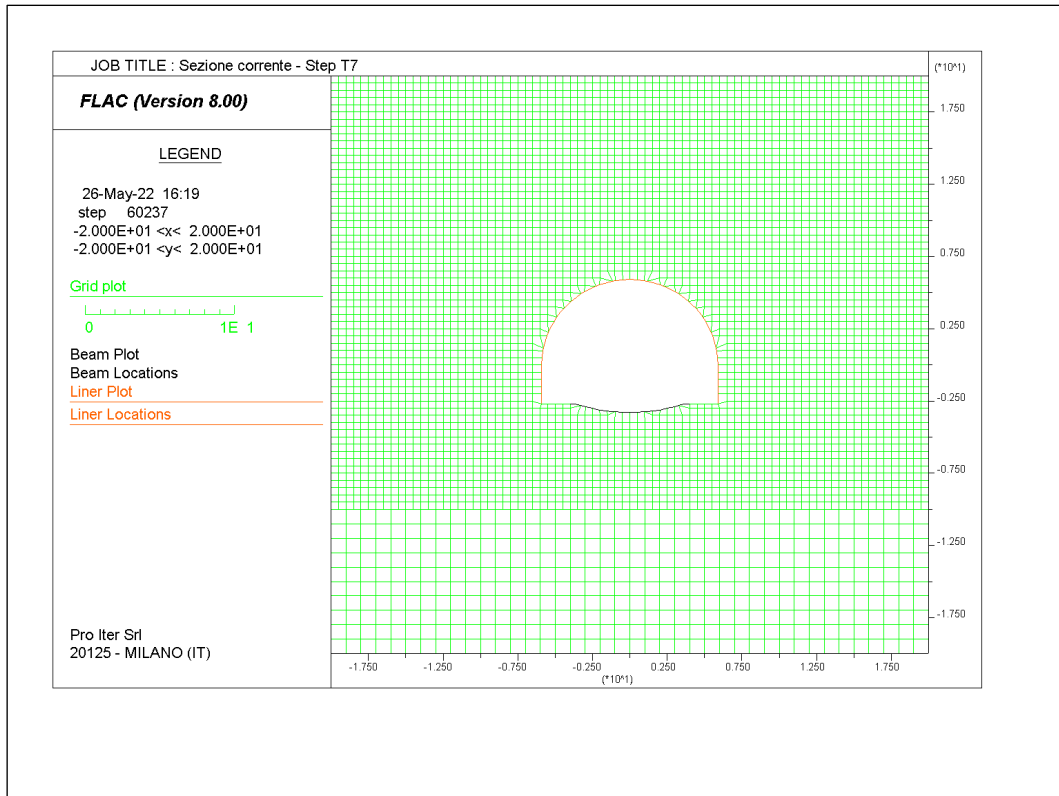
**Figura 3 - Andamento qualitativo dei valori dei parametri di resistenza dell'ammasso in funzione della deformazione plastica**

### 7.1.4 Elementi strutturali

I rivestimenti di prima fase sono modellati mediante elementi strutturali di tipo liner connessi direttamente alla griglia per simulare la perfetta aderenza tra il materiale roccioso, il betoncino proiettato e le centine.

I rivestimenti definitivi sono costituiti da elementi strutturali di tipo beam connessi alla griglia mediante interfaccia attritiva. In calotta e piedritti sono assegnati all'interfaccia parametri di resistenza dimezzati rispetto a quelli dell'ammasso roccioso ( $c_{int}=c/2$ ,  $\phi_{int}=\phi/2$ ). Nell'arco rovescio all'interfaccia è assegnata coesione nulla al fine di ottenere un comportamento più attendibile in fase di riprofilatura ( $c_{int}=0$ ,  $\phi_{int}=\phi/2$ ).

La fase di riprofilatura è cautelativamente modellata ipotizzando che il carico sostenuto dal rivestimento definitivo allo stato di fatto sia interamente trasferito al nuovo rivestimento di prima fase (5+15 di betoncino C25/30 con doppie centine IPN160), per quanto possibile dalle proprietà meccaniche dell'elemento strutturale. La cavità rimane dunque vincolata e la possibilità di deformarsi e detensionarsi è concessa unicamente per mezzo della porzione di scavo non rivestito in prossimità delle murette (Figura 4).



**Figura 4 - Disposizione degli elementi liner e beam dopo la fase di riprofilatura**

Al fine di simulare la parziale continuità tra la porzione centrale di arco rovescio non demolita e le murette, gettate dopo la riprofilatura, è stata inserita una cerniera tra i due elementi strutturali. La soluzione garantisce il passaggio dell'azione assiale e di taglio, annullando il momento in corrispondenza di quel nodo. La numerazione degli elementi strutturali e la posizione delle cerniere sono mostrate nell'immagine di seguito (Figura 5).



**Figura 5 – Numerazione degli elementi beam e posizione delle cerniere (in asterisco) al passaggio tra murette gettate e arco rovescio non demolito**

Nelle analisi è stato utilizzato il valore di rigidezza del betoncino a completa maturazione (dopo 28 giorni dal getto) in modo da massimizzare le sollecitazioni all'interno del rivestimento di prima fase.

Per tenere conto dello stato di deformazione piana dell'analisi bidimensionale il valore di riferimento del modulo di deformazione ( $E$ ) degli elementi strutturali deve essere corretto con la seguente formula [14].

$$E_{FLAC} = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

Nelle seguenti tabelle sono riportati i parametri utilizzati nell'analisi numerica per modellare il rivestimento di prima fase (betoncino proiettato + centine) e i rivestimenti definitivi.

- Sezione corrente – Stato di Fatto

Rivestimento di prima fase – Stato di Fatto	
Densità betoncino [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico betoncino [GPa]	31.5
A rivestimento 1° fase equivalente [ $\text{m}^2$ ]	0.236
J rivestimento 1° fase equivalente [ $\text{m}^4$ ]	0.00076
h rivestimento 1° fase equivalente [m]	0.236
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in calotta – Stato di Fatto	
Densità cls [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	32.8
A rivestimento definitivo [ $\text{m}^2$ ]	0.5
J rivestimento definitivo [ $\text{m}^4$ ]	0.0104
h rivestimento definitivo [m]	0.5
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in arco rovescio – Stato di Fatto	
Densità cls [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	32.8
A rivestimento definitivo [ $\text{m}^2$ ]	0.6
J rivestimento definitivo [ $\text{m}^4$ ]	0.018
h rivestimento definitivo [m]	0.6
v betoncino	0.2

- Sezione corrente – Configurazione di progetto

Rivestimento di prima fase – Configurazione di progetto	
Densità betoncino [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico betoncino [GPa]	32.8
A rivestimento 1° fase equivalente [ $\text{m}^2$ ]	0.229
J rivestimento 1° fase equivalente [ $\text{m}^4$ ]	0.00072
h rivestimento 1° fase equivalente [m]	0.229
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in calotta – Configurazione di progetto	
Densità cls [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	35.0
A rivestimento definitivo [ $\text{m}^2$ ]	0.5
J rivestimento definitivo [ $\text{m}^4$ ]	0.0104
h rivestimento definitivo [m]	0.5
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in arco rovescio – Configurazione di progetto	
Densità cls [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	32.8
A rivestimento definitivo [ $\text{m}^2$ ]	0.6
J rivestimento definitivo [ $\text{m}^4$ ]	0.018
h rivestimento definitivo [m]	0.6
v betoncino	0.2

## 7.2 Step di calcolo

Di seguito vengono indicate le fasi di calcolo adottate nell'analisi della sezione corrente:

0. Condizioni iniziali geostatiche, con successivo annullamento degli spostamenti e delle deformazioni avvenute nel terreno.
1. Realizzazione dello scavo del cunicolo esplorativo e riduzione attraverso step delle Forze Fittizie di Scavo (FFS) fino a 0%.
2. Realizzazione dello scavo della sezione corrente (senza arco rovescio) e riduzione delle FFS sul contorno dello scavo a 14% per simulare le condizioni al fronte.
3. Riduzione delle FFS a 8% per simulare le condizioni antecedenti all'installazione del rivestimento di prima fase (a una distanza dal fronte pari a 1.5 m circa).
4. Installazione del rivestimento di prima fase (betoncino armato con doppie centine IPN180 a passo 1 m) e riduzione delle FFS a 0%.
5. Scavo dell'arco rovescio
6. Rimozione del rivestimento di prima fase e installazione completa del rivestimento definitivo (calotta, piedritti e arco rovescio)
7. Rimozione del rivestimento definitivo a meno della porzione centrale di arco rovescio. Installazione del rivestimento di prima fase di progetto (betoncino armato con doppie centine IPN160 a passo 1 m).
8. Rimozione del rivestimento di prima fase di progetto e installazione in calotta e murette del rivestimento definitivo di progetto.
9. Applicazione del carico idraulico dovuto alla falda
10. Applicazione dei carichi di cui al punto 8 con l'aggiunta dell'azione sismica
11. Applicazione dei carichi di cui al punto 9 con l'aggiunta dell'azione sismica

Il percorso di deconfinamento del cavo e il conseguente andamento delle FFS è stato calibrato sulla base dei risultati della back-analysis, con lo scopo di massimizzare i carichi agenti sul rivestimento definitivo di progetto compatibilmente con i domini di resistenza delle opere esistenti allo stato attuale. Le curve di andamento delle FFS, le linee caratteristiche e le convergenze attese con ipotesi di cavità non rivestita sono riportate nell'ALLEGATO 1 (Paragrafo 11).

Per la definizione e il calcolo dei carichi di cui ai punti 9, 10 e 11. ed e. sopra riportati, si veda il successivo Paragrafo 7.3.

### 7.3 Condizioni di carico sul rivestimento definitivo

Oltre al peso proprio dei rivestimenti definitivi, valutato in ragione di 25 kN/m<sup>3</sup>, sono stati considerati i seguenti carichi:

#### 7.3.1 Carico idraulico

In via cautelativa è stata considerata la possibilità che si formi un accumulo di acqua a tergo del rivestimento definitivo, con una quota di falda pari a 10 m. Poiché gli architettonici della sezione corrente allo stato di fatto indicano la presenza di dreni laterali in prossimità delle murette [8], il carico idraulico è stato modellato come una pressione con andamento parabolico che ha come estremi il carico idrostatico in calotta ( $u = \gamma_w \cdot h_w$ ) e carico nullo sul piedritto (Figura 6).

La pressione idraulica ad un generico nodo del rivestimento definitivo è data dall'equazione:

$$u = \gamma_w \cdot h_w \cdot d_{dr} \cdot \frac{-d_{dr} + 2h_{sez}}{h_{sez}^2}$$

Dove  $d_{dr}$  è la distanza tra il nodo e il dreni e  $h_{sez}$  è l'altezza della sezione di scavo

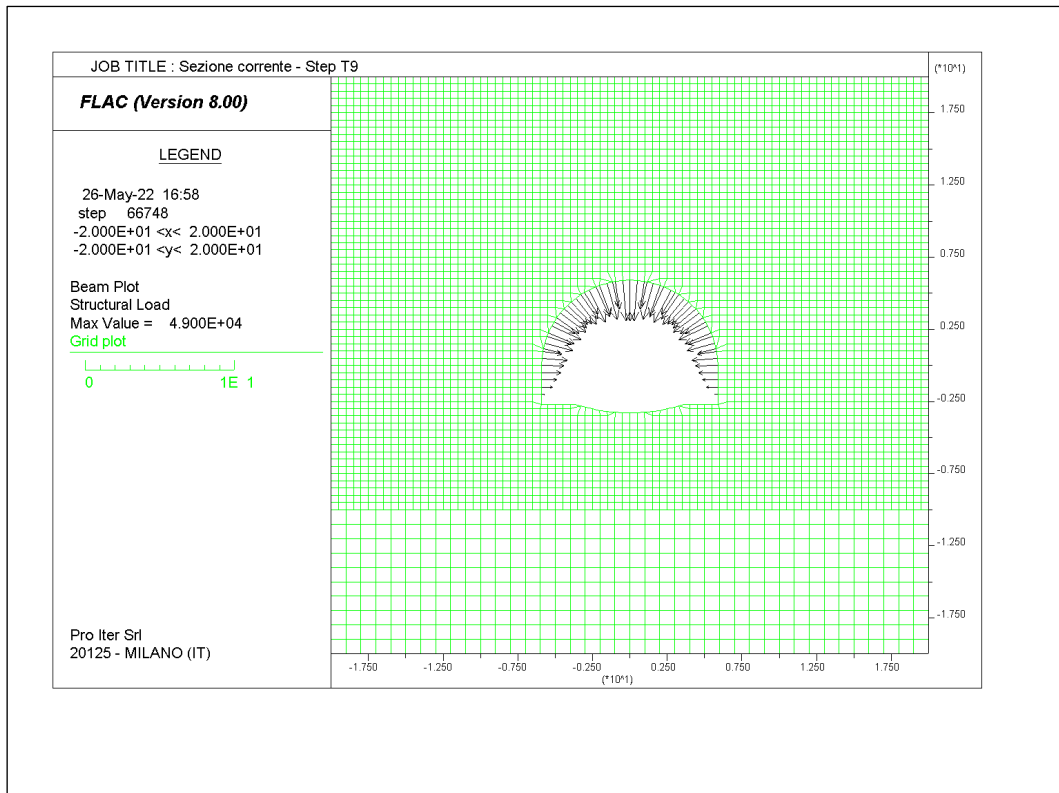


Figura 6 - Applicazione del carico idraulico in presenza di dreni



### 7.3.2 Applicazione del carico sismico

L'azione sismica è stata valutata mediante analisi pseudo-statica alle differenze finite, sotto l'ipotesi che gli incrementi di carico nel rivestimento definitivo causati dal sisma siano provocati dalle deformazioni tangenziali ottenute in assenza di interazione cinematica (condizioni free-field) [15].

A partire dalla peak ground acceleration (PGA) in corrispondenza del bedrock, pari a 0.288g, l'accelerazione alla profondità del tunnel è stata valutata mediante la seguente relazione [15].

$$a_{z,max} = a_{max} \cdot C$$

Con il coefficiente correttivo  $C=0.7$  come riportato in Tabella 7.1.

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
>30	0.7

**Tabella 7.1 - Rapporto tra l'accelerazione massima in profondità e in superficie (Power et al. 1996).**

Noto il valore di  $a_{z,max}$  è possibile stimare la deformazione massima come

$$\gamma_{max} = \frac{k \cdot a_{z,max}}{V_s}$$

Dove  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde S, posta pari a 1600 m/s in accordo con il Progetto Definitivo [5], mentre  $k$  è il rapporto PGV/PGA ottenuto in funzione della magnitudo e della distanza epicentrale. Sulla base del modello di pericolosità sismica INGV per il sito della galleria Guinza si è cautelativamente scelto il valore di  $k$  pari a 66, corrispondente ad un materiale in roccia con momento magnitudo di 6.5 e distanza epicentrale di 0-20 km.

Moment magnitude ( $M_w$ )	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
<i>Rock<sup>a</sup></i>			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
<i>Stiff soil<sup>a</sup></i>			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
<i>Soft soil<sup>a</sup></i>			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

<sup>a</sup>In this table, the sediment types represent the following shear wave velocity ranges: rock  $\geq 750$  m/s; stiff soil is 200–750 m/s; and soft soil  $< 200$  m/s. The relationship between peak ground velocity and peak ground acceleration is less certain in soft soils.

**Tabella 7.2 - Rapporto fra velocità ed accelerazione sismica di picco per diversi materiali a diverse distanze dalla sorgente (Power et al. 1996).**

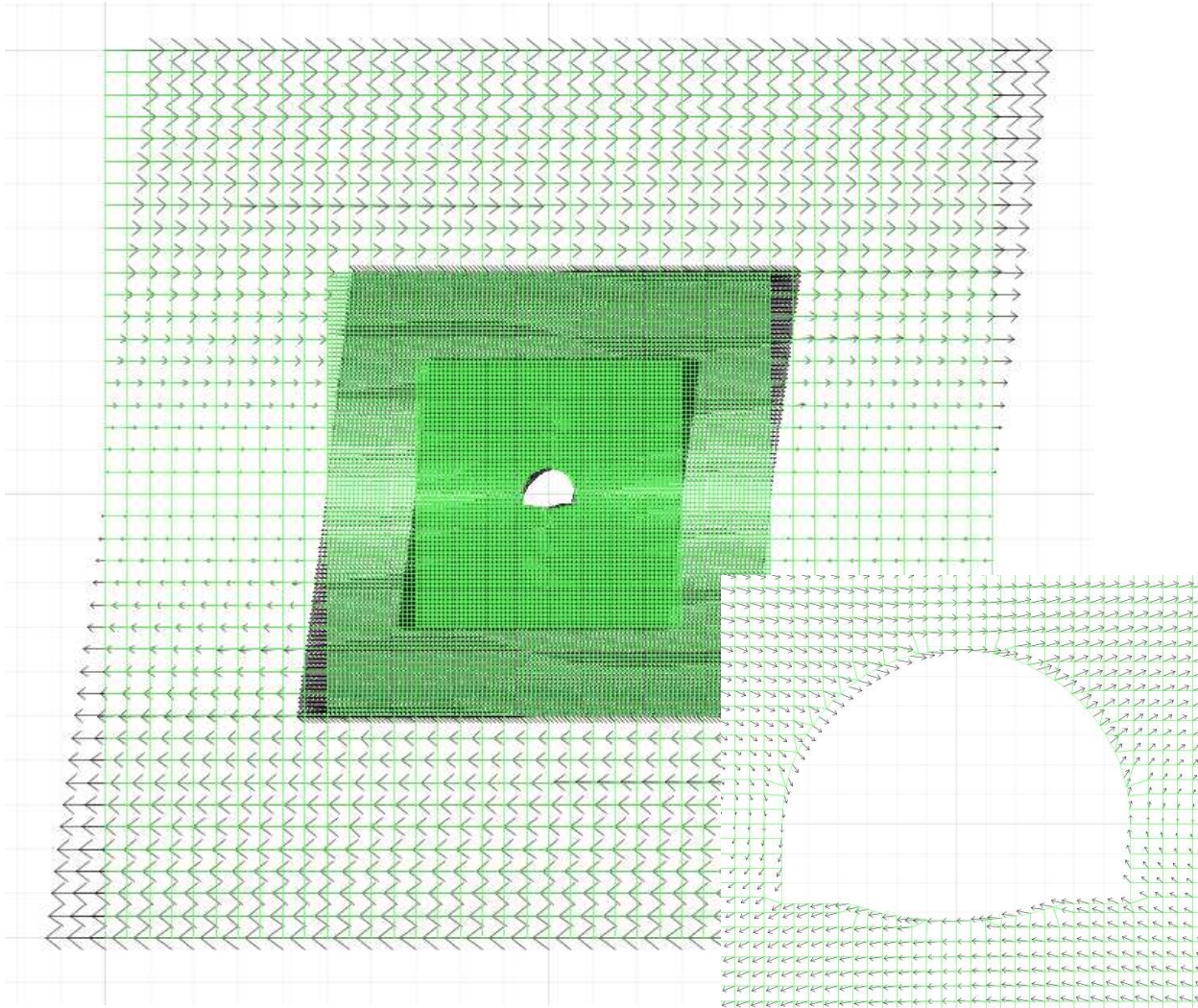
In definitiva risulta:

$$\gamma_{max} = \frac{k \cdot a_{z,max}}{V_s} = \frac{66 \cdot 0.7 \cdot 0.288g}{1600} = 0.0083$$

La deformazione tangenziale massima viene applicata mediante uno spostamento a farfalla ai lati del modello, calcolato come

$$\Delta x_{max} = \gamma_{max} \frac{H}{2}$$

Il terreno viene approssimato come mezzo linearmente elastico (ipotesi coerente con la natura rocciosa della formazione) e privo di peso, al fine di poter trascurare gli effetti inerziali legati al sisma. Per poter simulare una distorsione rigida del modello sono stati applicati vincoli alla traslazione verticale lungo i bordi e due cerniere alla profondità di H/2.



La sollecitazione nel rivestimento definitivo calcolate in questa fase vengono sommate alle sollecitazioni calcolate in fase statica ai fini del dimensionamento.

#### 7.4 Risultati

I risultati delle analisi, riportati in dettagliatamente nell'ALLEGATO 2 (Paragrafo 12), confermano sostanzialmente i risultati delle Linee Caratteristiche. La convergenza al fronte è pari a 4 cm, di poco superiore ai 3.2 cm previsti con i metodi analitici. Il valore di convergenza assoluta, pari a 6.7 cm conferma la validità delle opere di confinamento previste, a fronte di 10cm di spostamento calcolati nel caso di cavità non supportata.

## 8 VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO

Nel seguito del presente paragrafo si riportano le verifiche relative al rivestimento di prima fase e al rivestimento definitivo della sezione corrente nelle condizioni di stato di fatto (condizione attuale) e in esercizio (configurazione finale dopo intervento di consolidamento)

### 8.1.1 Verifiche dei rivestimenti allo stato limite ultimo

Nelle fasi di back-analysis (step 4–5–6) le verifiche allo Stato Limite Ultimo (SLU) vengono effettuate utilizzando i valori caratteristici delle resistenze e delle sollecitazioni ottenute dall'analisi numerica, al fine di ottenere una simulazione più realistica dello stato di fatto. A partire dallo stato di fatto le verifiche SLU vengono effettuate utilizzando i parametri resistenti e sollecitanti di progetto, come descritto di seguito (step 6-7-8-9).

In conformità alle NTC 2018 [1] [2] le azioni caratteristiche ricavate dal modello FDM sul rivestimento di prima fase sono aumentate di  $\gamma_G=1.30$  e le resistenze caratteristiche della sezione strutturale sono ridotte di  $\gamma_c=1.50$  e  $\gamma_s=1.15$ .

Le verifiche risultano soddisfatte se è verificata la seguente disuguaglianza:

$$Ed \leq Rd$$

dove:

- $Rd$  = Valore di progetto della resistenza.
- $Ed$  = Valore di progetto dell'effetto delle azioni.

#### 8.1.1.1 Verifica a pressoflessione

Per il calcestruzzo armato il calcolo segue le indicazioni delle NTC2018, par. 4.1.2.3.4.

#### 8.1.1.2 Verifica a taglio

Per il calcestruzzo armato il calcolo segue le indicazioni delle NTC2018, par. 4.1.2.3.5.

### 8.1.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Le verifiche allo Stato Limite di Esercizio (SLE) vengono eseguite esclusivamente per il rivestimento definitivi allo stato di esercizio (step 8-9), considerando la funzione provvisoria assegnata al rivestimento di prima fase e il carattere transitorio delle fasi precedenti.

### 8.1.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

Le verifiche alla limitazione delle tensioni sono effettuate secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC 2018. Per le sezioni non armate sottoposte a pressoflessione nel caso in cui una porzione dell'elemento sia sottoposto a trazione si fa riferimento alla sezione parzializzata. Il calcolo della sollecitazione massima avviene come segue

$$\sigma_{c,max} = \frac{2N}{3 \cdot u \cdot b}$$

Dove  $u = h/2 - e$  corrisponde alla lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia della sezione parzializzata mentre  $b$  allo spessore della sezione (1 m).

Con riferimento al rivestimento definitivo esistente in arco rovescio, costituito da cls non armato, affinché la verifica di limitazione delle tensioni risulti soddisfatta, deve essere valida la seguente disequazione:

- $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 0.45 \cdot 0.83 \cdot 30 \text{ MPa} = 11.21 \text{ MPa}$

Con riferimento al rivestimento definitivo di progetto in calotta e piedritti, realizzato in c.a., affinché la verifica di limitazione delle tensioni risulti soddisfatta, devono essere valida la seguente disequazione:

- $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 0.45 \cdot 0.83 \cdot 40 \text{ MPa} = 14.9 \text{ MPa}$
- $\sigma_{s,max} \leq 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 \text{ MPa} = 360 \text{ MPa}$

### 8.1.2.2 Verifica dello stato limite di fessurazione

Le verifiche di limitazione delle fessure nel rivestimento definitivo sono svolte secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.4.5 delle NTC 2018. In particolare, tale verifica è stata effettuata considerando condizioni ambientali aggressive (secondo la Tabella 4.1.IV delle NTC 2018) e, pertanto, affinché risulti soddisfatta, l'ampiezza di calcolo delle fessure deve risultare inferiore a 0.2 mm.

## 8.2 Rivestimento di prima fase – stato di fatto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase. Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del bottoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [16]. Le verifiche a taglio sono effettuate considerando la resistenza della sola centina metallica.

Come sottolineato nel paragrafo precedente le verifiche sono state effettuate utilizzando i valori di resistenza e di sollecitazione caratteristici.

Rivestimento di prima fase – stato di fatto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C20/25
Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]	17.05
Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ]	13.00
Interasse [m]	-1
Classe di resistenza acciaio	S275

### 8.2.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento di prima fase esistente sono svolte nelle seguenti condizioni:

- Step 4 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase allo stato di fatto (senza scavo dell'arco rovescio);
- Step 5 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase allo stato di fatto (con scavo dell'arco rovescio)

### 8.2.2 Risultati

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 3, risultano soddisfatte per il rivestimento di prima fase.

### 8.3 Rivestimento definitivo - stato di fatto

Le verifiche a pressoflessione e a taglio sono effettuate sia con i parametri caratteristici, per verificare la validità della back-analysis, sia con parametri di progetto, per valutare la necessità di interventi di consolidamento. Al fine di categorizzare i risultati delle indagini laserscan effettuate lungo la galleria Guinza [12] le sollecitazioni sono verificate con tre domini di resistenza, corrispondenti ad uno spessore di calcestruzzo pari a 30 cm, 40 cm e 50 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo allo stato di fatto.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – stato di fatto	
Spessore cls [cm]	50/40/30
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

Rivestimento definitivo arco rovescio – stato di fatto	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

#### 8.3.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo esistente sono svolte nella seguente condizione:

- Step 6 – Carico del terreno allo stato di fatto.

#### 8.3.2 Risultati

La verifica a pressoflessione di calotta e piedritti evidenzia la necessità di rifacimento del rivestimento definitivo per le sezioni con sottospessori di cls inferiori a 30 cm. Le sollecitazioni di progetto restituite dall'analisi in condizioni statiche, infatti, non soddisfano il dominio di resistenza corrispondente a una sezione in calcestruzzo non armato con spessore pari a 30 cm (Figura 7). Le verifiche a taglio risultano invece soddisfatte con tutti e tre gli spessori di cls ipotizzati.

Dai risultati dell'analisi emerge invece che lo stato tensionale in arco rovescio, per il quale è stato ipotizzato spessore costante pari a 60 cm, soddisfa i criteri di resistenza di progetto.

Nel complesso risulta che le sollecitazioni nel rivestimento definitivo ottenute con il modello numerico sono superiori rispetto a quelle misurate attraverso indagini con martinetto piatto [7]. Questo si spiega con la scelta, cautelativa, di massimizzare durante la fase di back analysis le sollecitazioni agenti sui rivestimenti.

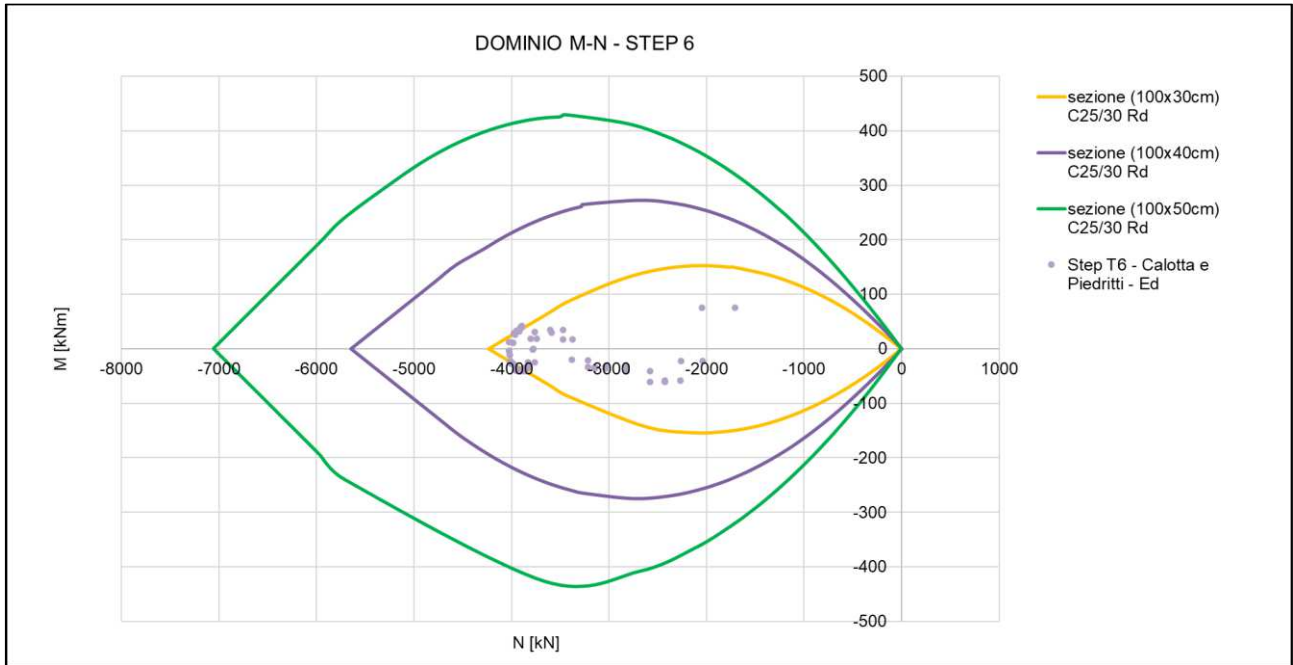


Figura 7 - Verifica a pressoflessione di una sezione con spessore variabile in calotta con parametri di progetto



## 8.4 Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase. Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del bottoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [16]. Le verifiche a taglio sono effettuate considerando la resistenza della sola centina metallica.

Le verifiche sono state effettuate utilizzando i valori di resistenza e di sollecitazione di progetto.

Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C25/30
Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]	14.06
Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ]	10.53
Interasse [m]	-1
Classe di resistenza acciaio	S275

In questa fase la porzione di arco rovescio rimasta intatta durante la riprofilatura non viene verificata in quanto scollegata dai rivestimenti in calotta e quindi ritenuta completamente scarica al netto del peso proprio.

### 8.4.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento di prima fase in esercizio sono svolte nelle seguenti condizioni:

- Step 7 – Rimozione del rivestimento definitivo a meno della porzione centrale di arco rovescio. Carico del terreno sul rivestimento di prima fase di progetto (betoncino armato con doppie centine IPN160 a passo 1 m).

### 8.4.2 Risultati

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 3, risultano soddisfatte per il rivestimento di prima fase.

## 8.5 Rivestimento definitivo – configurazione di progetto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo allo stato di fatto.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – configurazione di progetto	
Spessore cls [cm]	50
Classe di resistenza cls	C32/40
Armatura trasversale simmetrica	Φ20/20
Armatura a taglio	-
Ripartitori	Φ12/30

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – configurazione di progetto	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

### 8.5.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo esistente sono svolte nelle seguenti condizioni:

- Step 8 – Carico del terreno nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 9 – Carico del terreno + carico idraulico nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 10 – Condizioni presenti allo step 8 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica
- Step 11 – Condizioni presenti allo step 9 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica.

### 8.5.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Le verifiche allo Stato Limite di Esercizio del rivestimento definitivo sono eseguite nelle seguenti condizioni:

- Step 8 – Carico del terreno nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 9 – Carico del terreno + carico idraulico nella configurazione definitiva di progetto.

### **8.5.3 Risultati**

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 3, risultano soddisfatte per il rivestimento definitivo non armato in arco rovescio e armato simmetricamente con ferri longitudinali  $\phi 20/20$  in calotta e piedritti.

## 9 CONCLUSIONI

La back analysis della sezione corrente della galleria Guinza a partire dallo scavo del CE fino allo stato di fatto conferma la necessità di adottare misure di consolidamento per le sezioni della calotta e dei piedritti con sottospessori inferiori a 30 cm. Gli output dell'analisi delle sezioni caratterizzate da sottospessori compresi da 30 cm e 50 cm e del rivestimento in arco rovescio soddisfano le verifiche allo SLU così come prescritto dalla normativa; pertanto, non è necessario il rifacimento dei rivestimenti.

I risultati ottenuti sono da intendersi come cautelativi a fronte dello stato tensionale rilevato nel rivestimento definitivo attraverso le indagini con martinetto piatto, che riportano sollecitazioni inferiori rispetto a quelle ottenute dal modello numerico

I risultati dell'analisi effettuata sulla sezione di galleria nella configurazione finale confermano l'adeguatezza e l'efficacia degli interventi di consolidamento di tipo A proposti per la sezione corrente della galleria Guinza. In particolare, le analisi FDM 2D svolte hanno confermato il corretto dimensionamento dei rivestimenti di prima fase installati a seguito della riprofilatura e hanno permesso la verifica e il dimensionamento dei rivestimenti definitivi nelle seguenti configurazioni:

- carico idraulico con quota di falda posta a 10 m sopra la chiave calotta;
- effetto dell'azione sismica.

## 10 ELENCO ALLEGATI

- **ALLEGATO 1 – Linee Caratteristiche**
- **ALLEGATO 2 – Output dell’analisi**
- **ALLEGATO 3 – Verifica delle sezioni tipo**

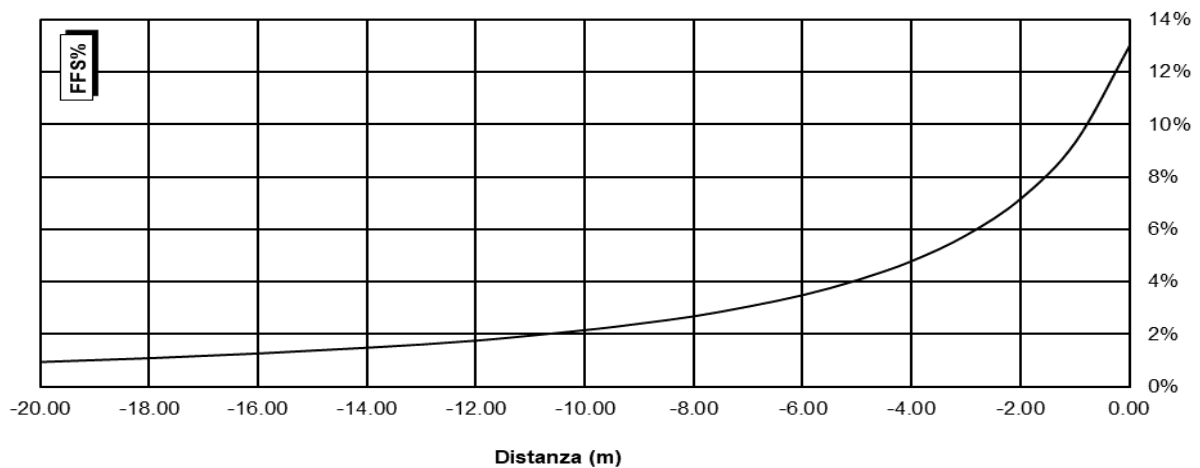
## 11 ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE

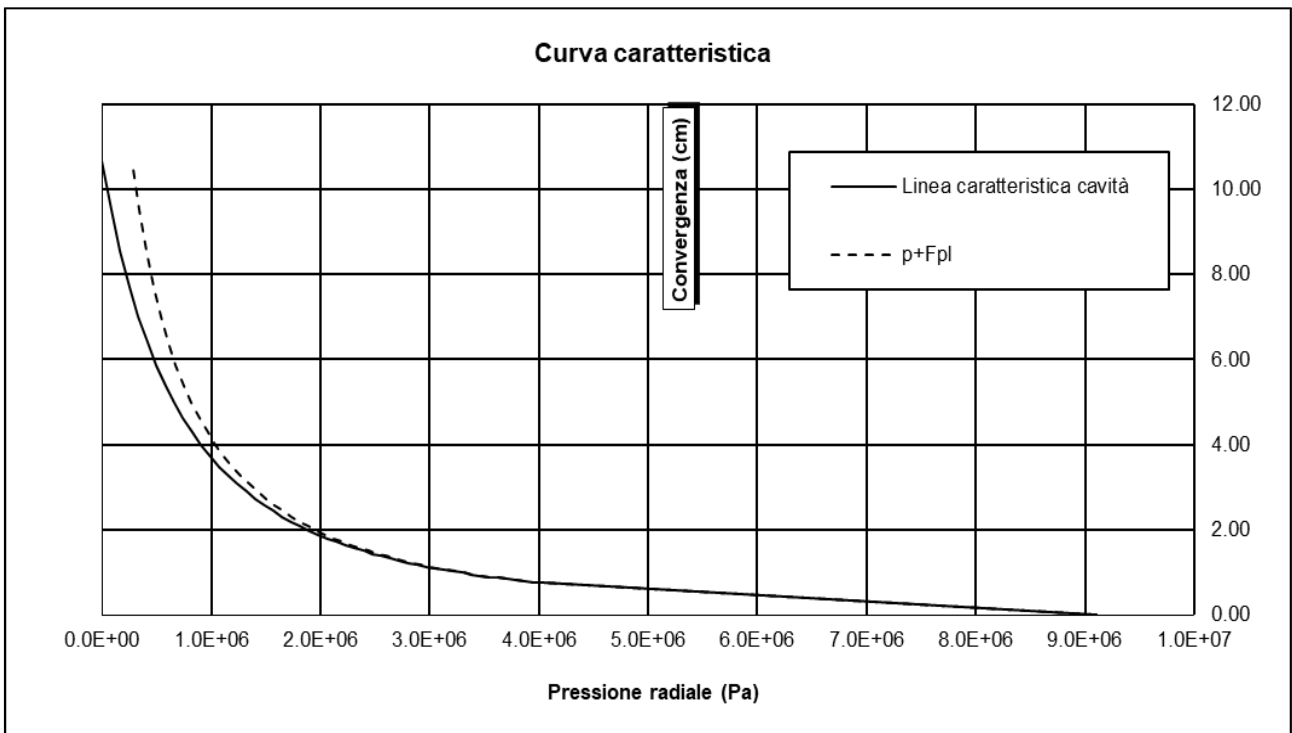
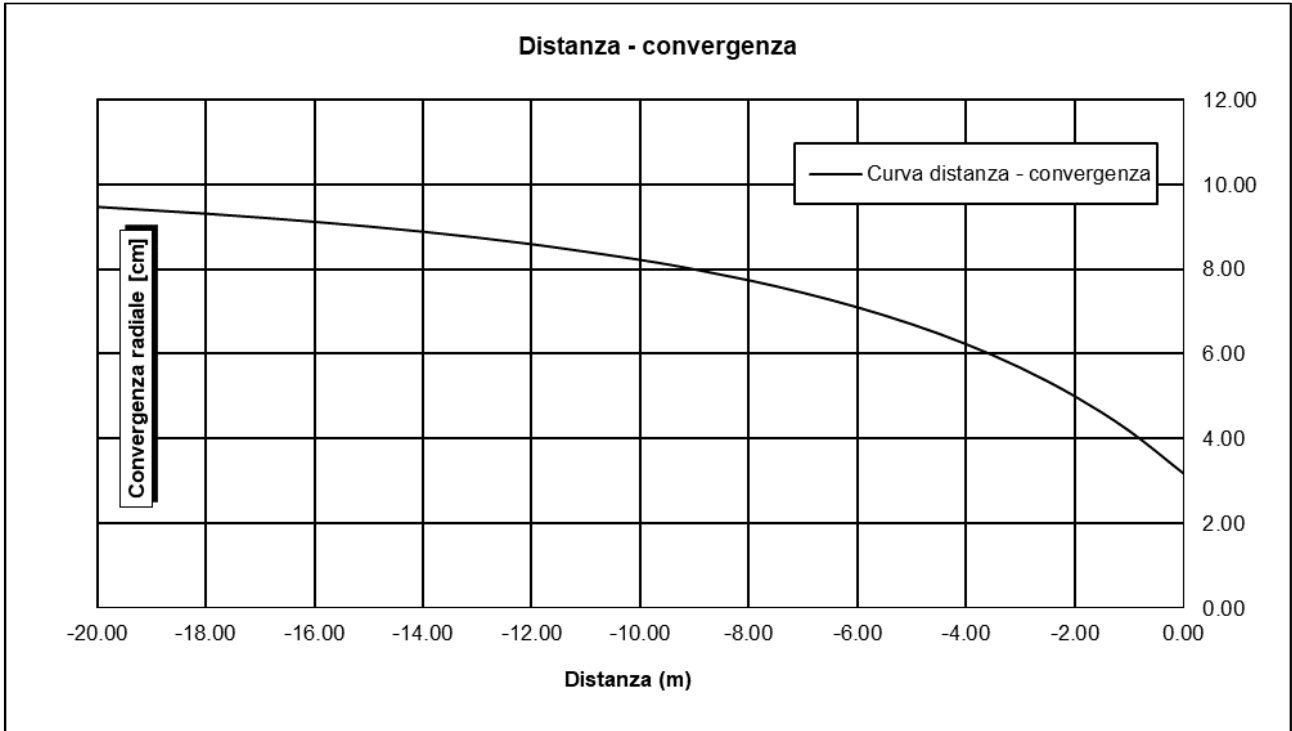
Di seguito vengono riportate le proprietà geotecniche e i grafici delle Linee Caratteristiche calcolate con approccio analitico (Ribacchi e Riccioni, 1977) dell'ammasso GA4 con la copertura massima (310 m).

### GA4\_H=310m\_classeIV - LC GSI = 36, H = 310m, C0 = 30Mpa, mi = 10, Ei = 9000GPa

DATI DI INGRESSO		RISULTATI											
peso di volume [N/mc]	26000	<b>All'equilibrio naturale (da L.C.)</b>											
copertura [m]	310	Convergenza assoluta [cm]	10.7										
raggio di scavo [m]	5.34	Convergenza relativa [cm]	7.5										
		Estensione fascia plastica [m]	10.6										
angolo d'attrito di picco [°]	29.13	<b>Equilibrio al fronte</b>											
angolo d'attrito residuo [°]	24.18	Convergenza assoluta [cm]	3.2										
coesione di picco [Pa]	718433	FFS	13.0%										
coesione residua [Pa]	509284												
modulo elastico [Pa]	4.50E+09	<table border="1"> <tr> <td>c(fronte) / Rscavo</td> <td>0.60 [%]</td> </tr> <tr> <td>c(assoluta) / Rscavo</td> <td>2.00 [%]</td> </tr> <tr> <td>c(relativa) / Rscavo</td> <td>1.40 [%]</td> </tr> <tr> <td>Fpl(fronte)/Rscavo</td> <td>78.5 [%]</td> </tr> <tr> <td>Fpl(assoluta)/Rscavo</td> <td>198.7 [%]</td> </tr> </table>		c(fronte) / Rscavo	0.60 [%]	c(assoluta) / Rscavo	2.00 [%]	c(relativa) / Rscavo	1.40 [%]	Fpl(fronte)/Rscavo	78.5 [%]	Fpl(assoluta)/Rscavo	198.7 [%]
c(fronte) / Rscavo	0.60 [%]												
c(assoluta) / Rscavo	2.00 [%]												
c(relativa) / Rscavo	1.40 [%]												
Fpl(fronte)/Rscavo	78.5 [%]												
Fpl(assoluta)/Rscavo	198.7 [%]												
coefficiente di Poisson	0.25												
angolo di dilatazione [°]	3.64												

Distanza - forze fittizie di scavo (%)



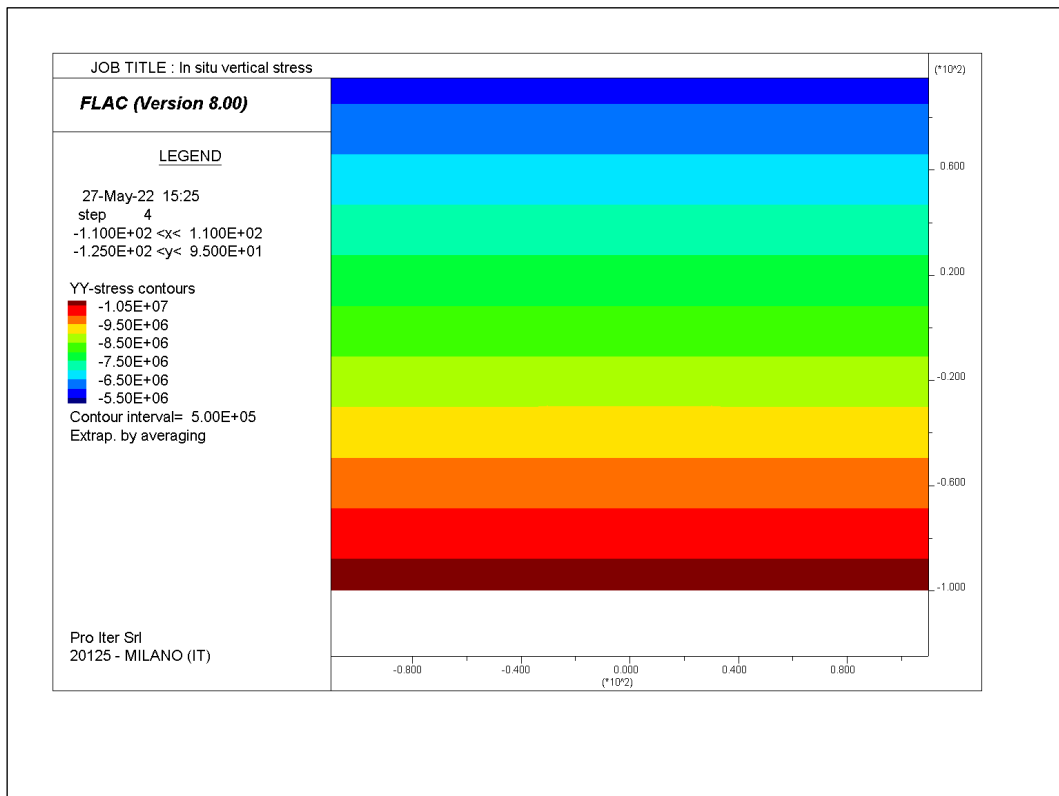


## 12 ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL'ANALISI

Nel seguito vengono riportati i risultati delle analisi FDM 2D relativa alla sezione corrente con particolare riferimento a:

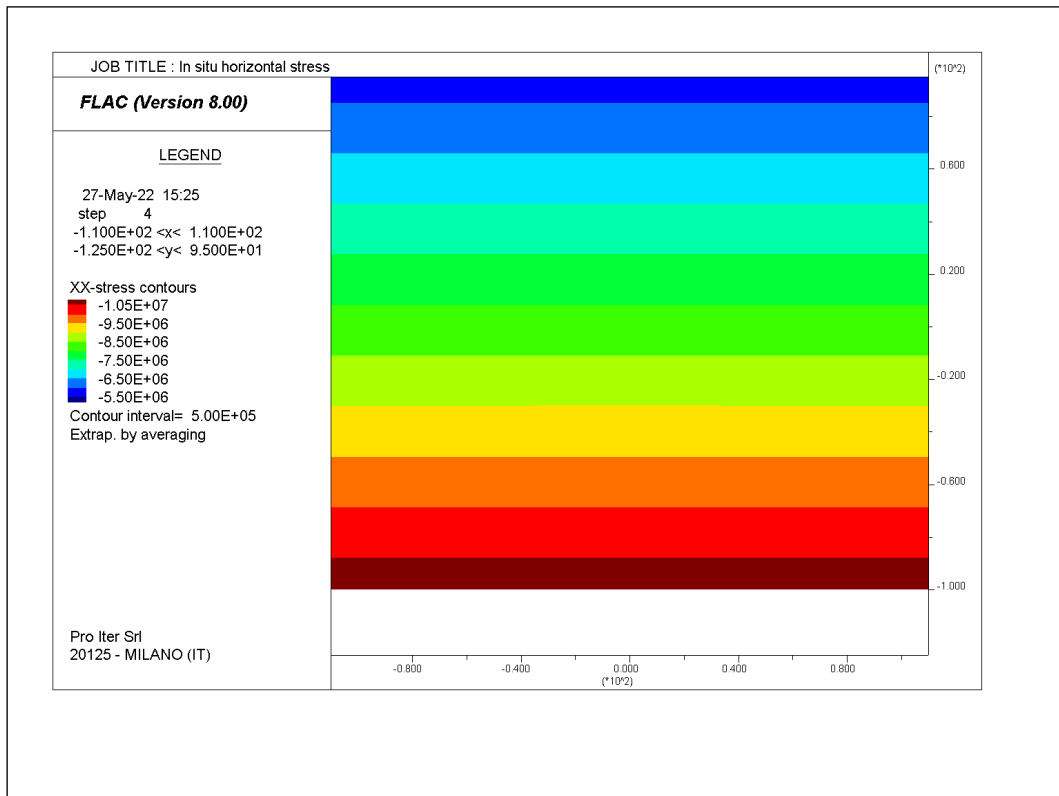
- gli sforzi geostatici [Pa] prima dello scavo della galleria;
- plasticizzazioni;
- spostamenti totali nelle varie configurazioni di carico.
- sforzi verticali nel terreno nelle varie configurazioni di carico
- sollecitazioni (momento flettente [Nm], azione assiale [N] e taglio [N]) nel rivestimento di prima fase nelle varie configurazioni di carico;
- sollecitazioni (momento flettente [Nm], azione assiale [N] e taglio [N]) nel rivestimento definitivo nelle varie configurazioni di carico;

- **Sforzi verticali in condizioni geostatiche [Pa]**

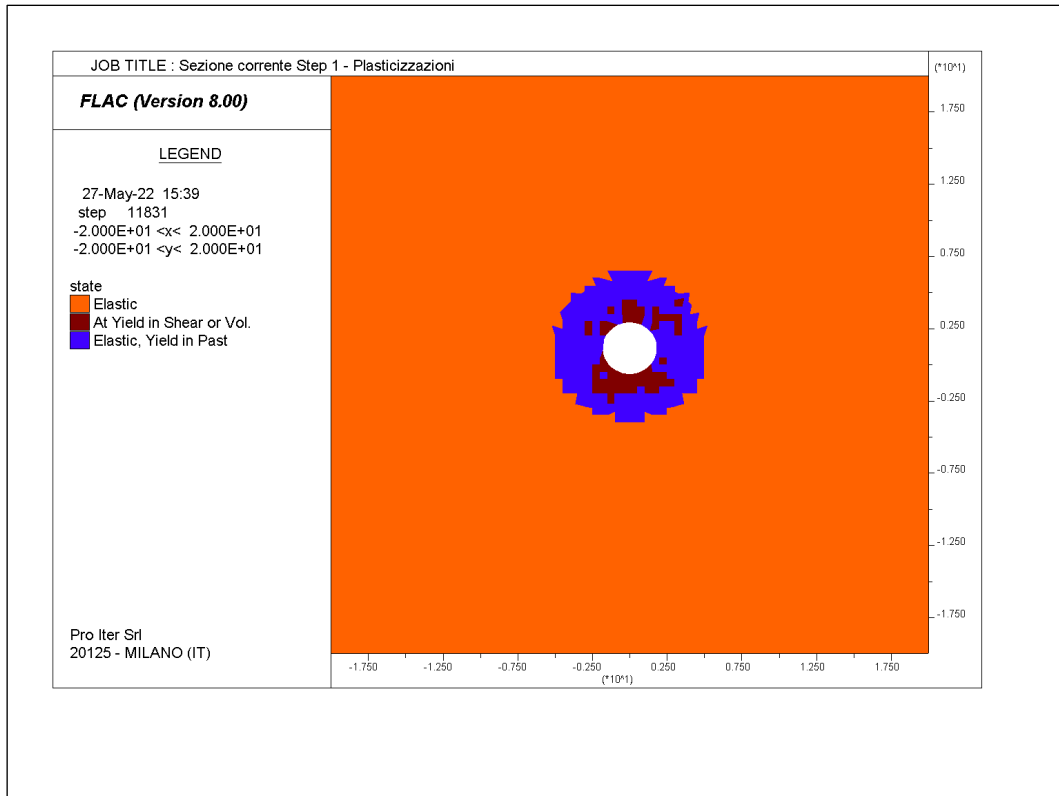




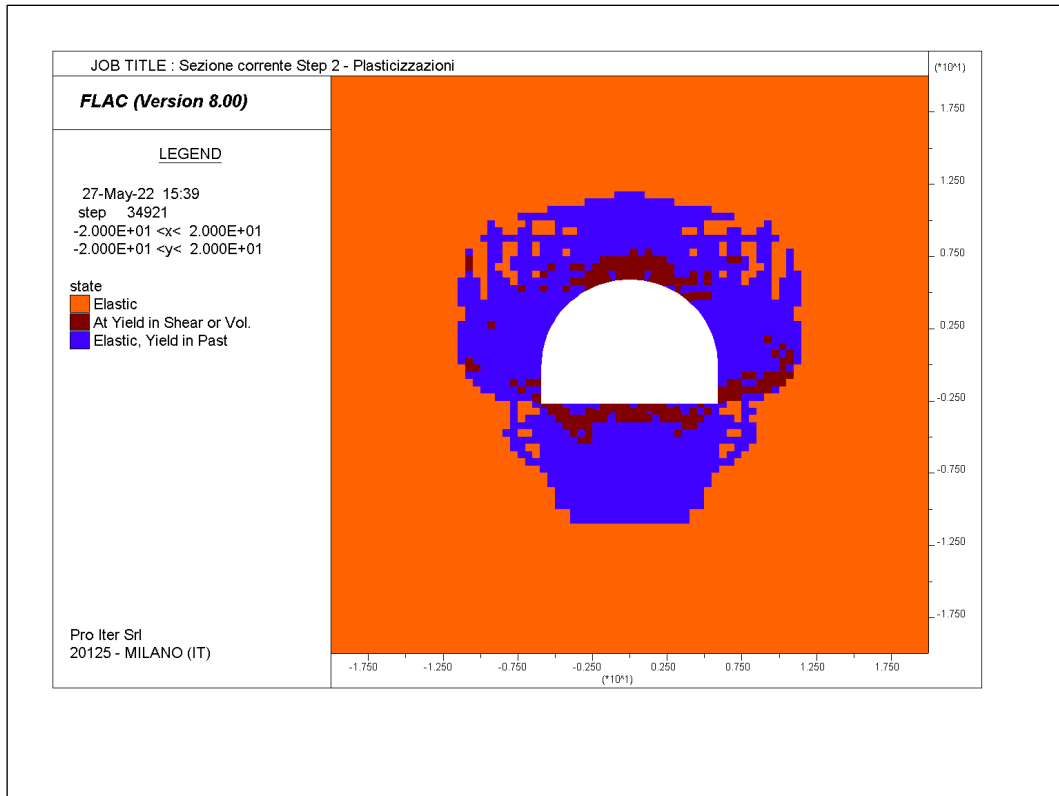
- Sforzi orizzontali in condizioni geostatiche [Pa]**



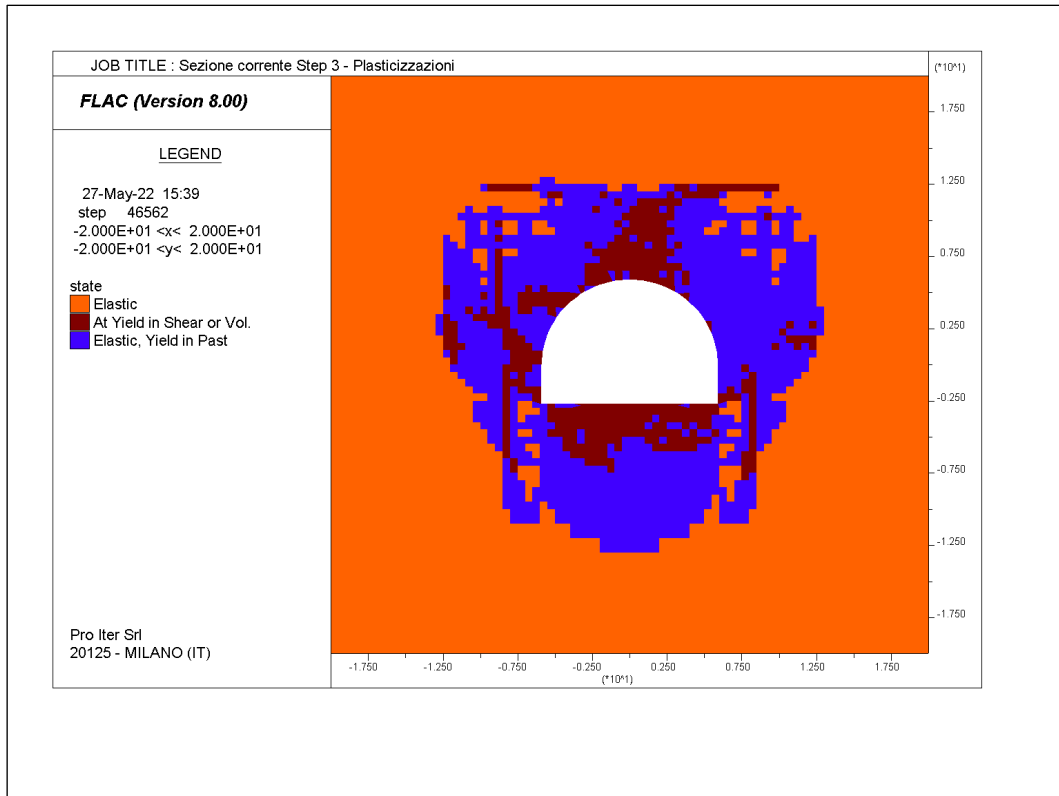
- Plasticizzazioni nel modello – Step 1 (Scavo CE – FFS nulle)**



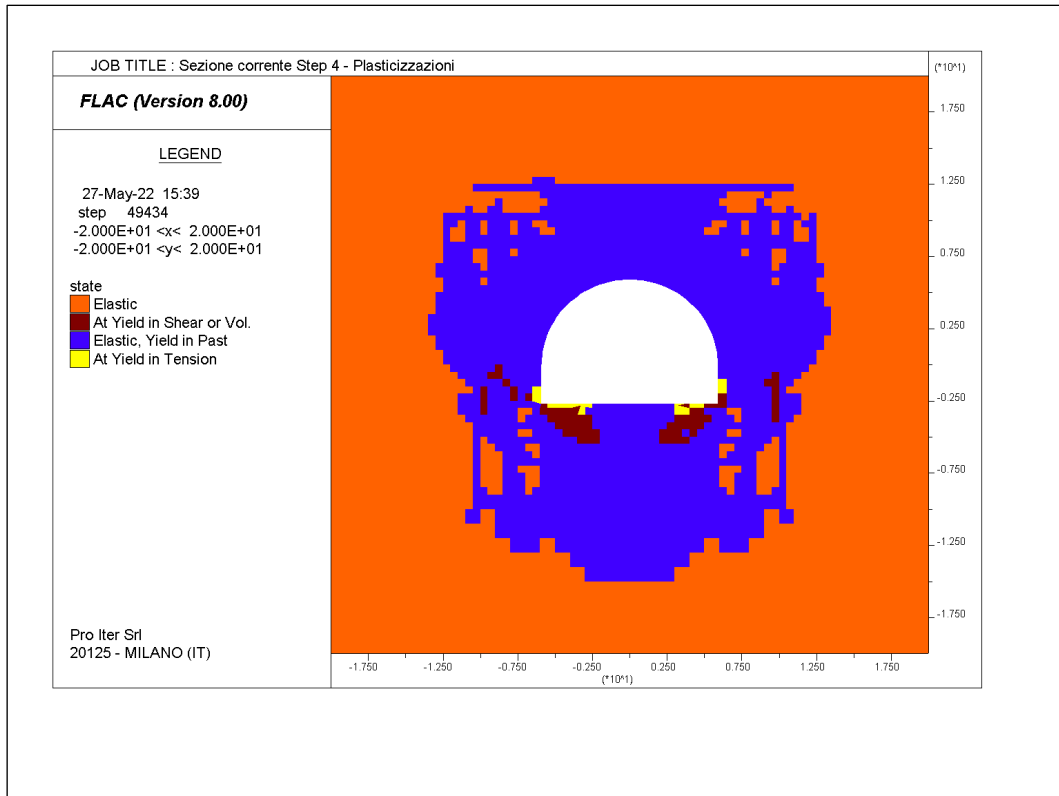
- Plasticizzazioni nel modello – Step 2 (Scavo sezione corrente – FFS 14%)



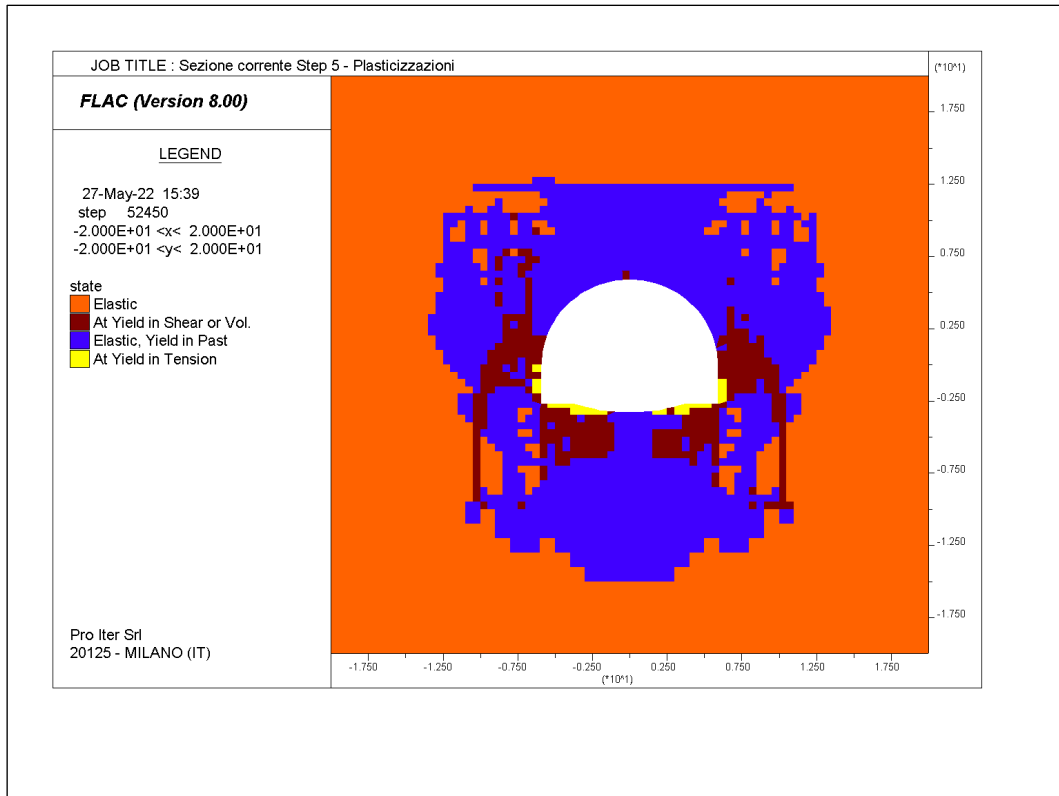
- Plasticizzazioni nel modello – Step 3 (Distanza 1.5 m dal fronte – FFS 8%)



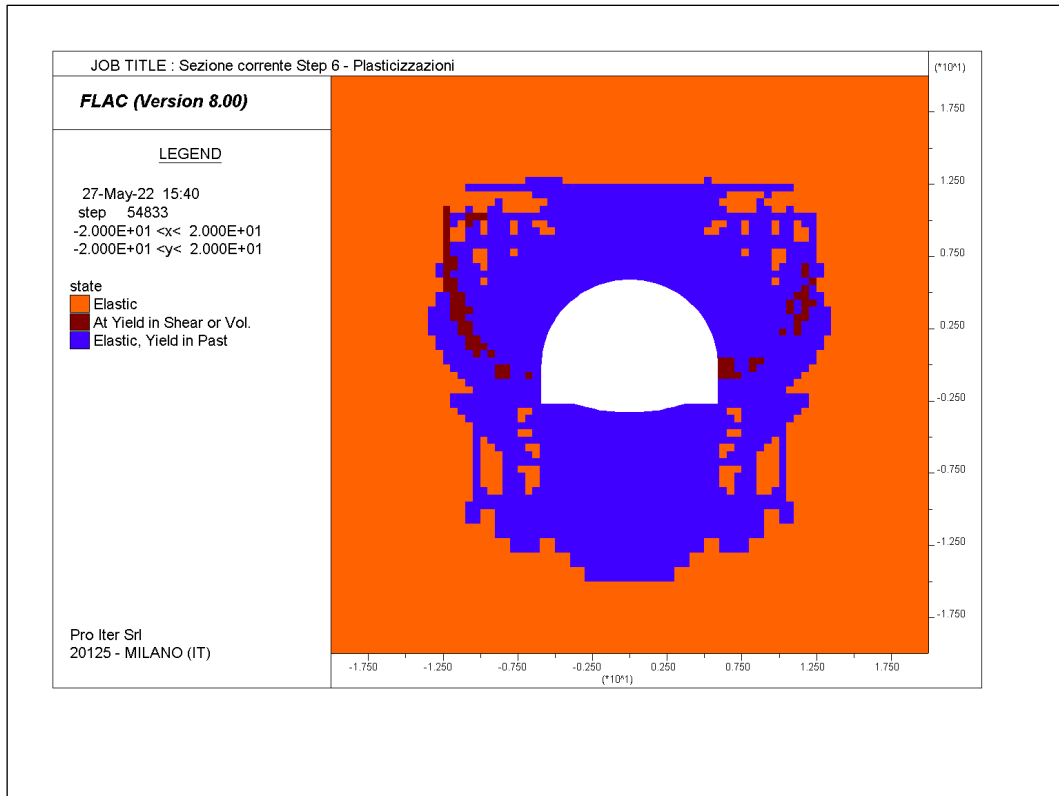
- Plasticizzazioni nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)



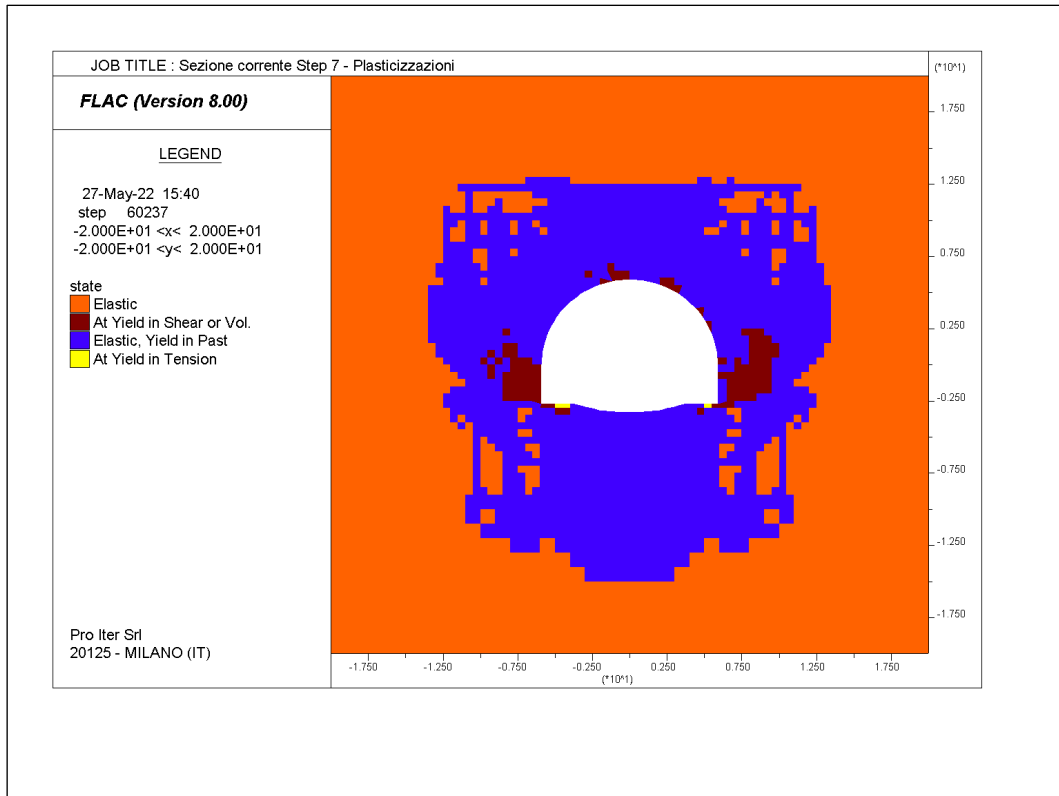
- Plasticizzazioni nel modello – Step 5 (Scavo arco rovescio)



- Plasticizzazioni nel modello – Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)

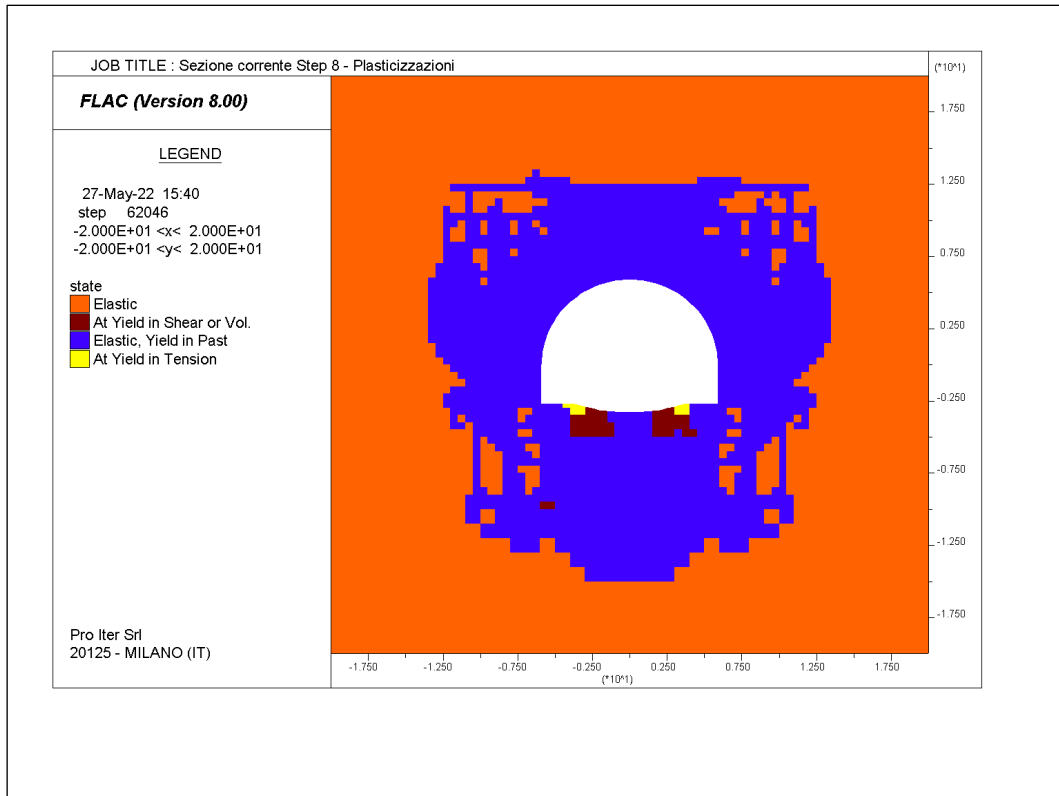


- **Plasticizzazioni nel modello – Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)**

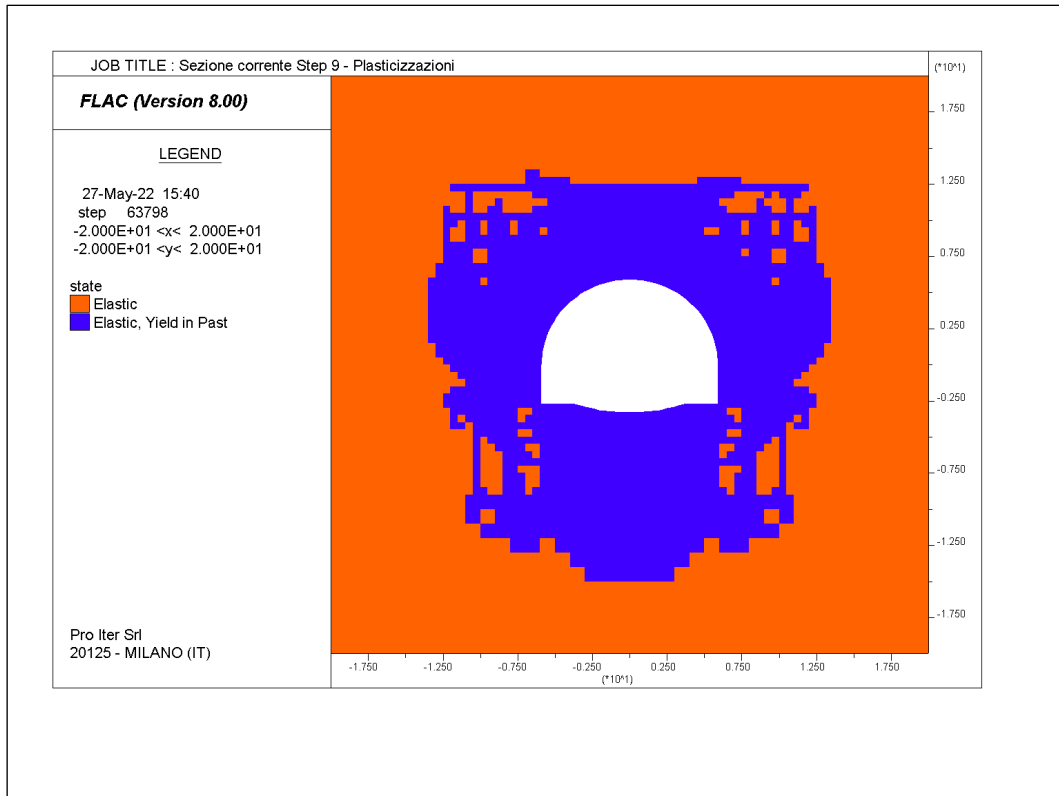


- Plasticizzazioni nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)

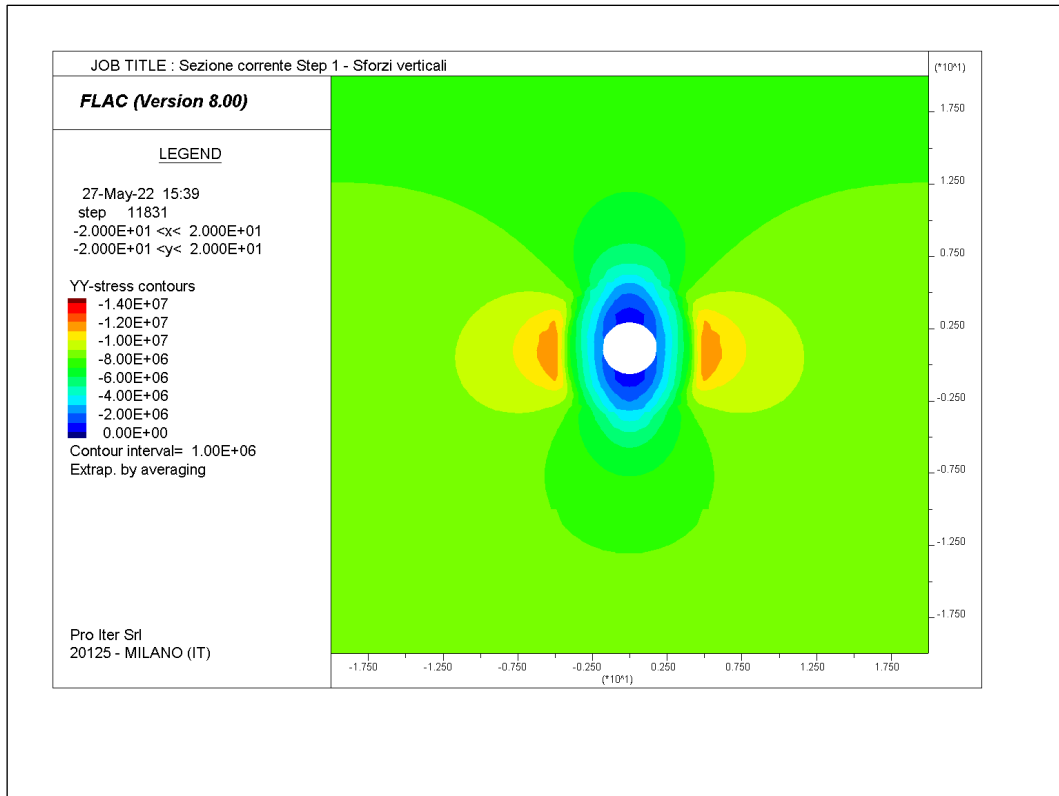




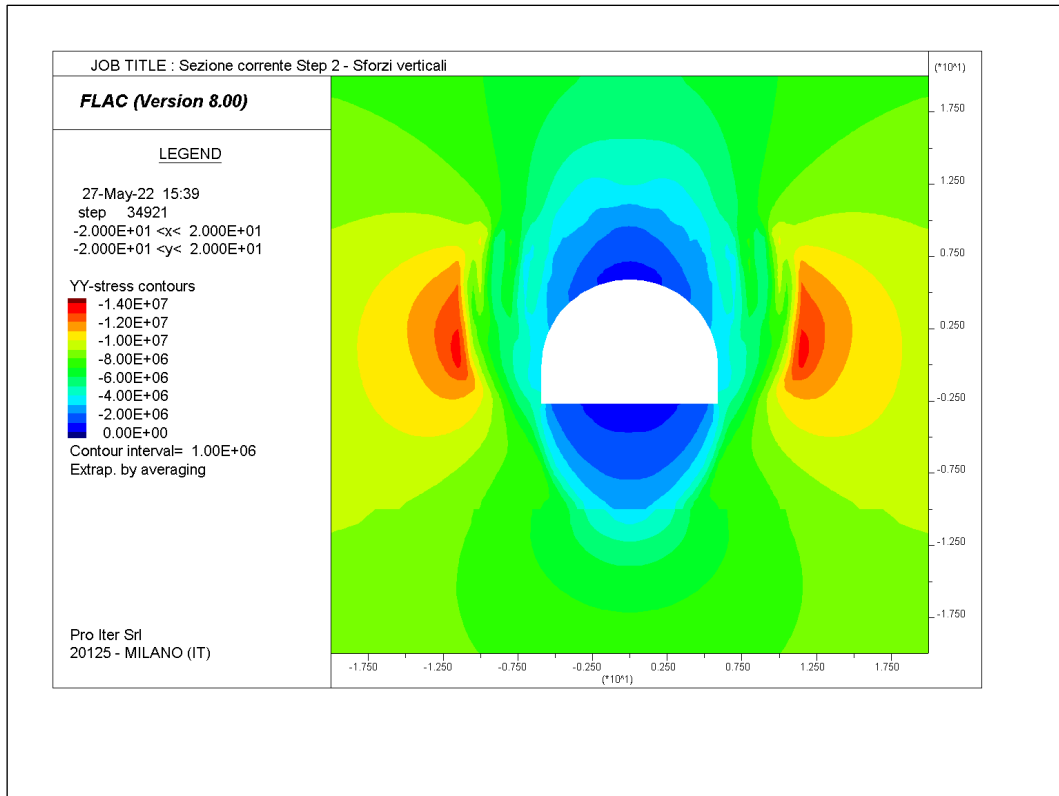
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 9 (Applicazione del carico di falda)**



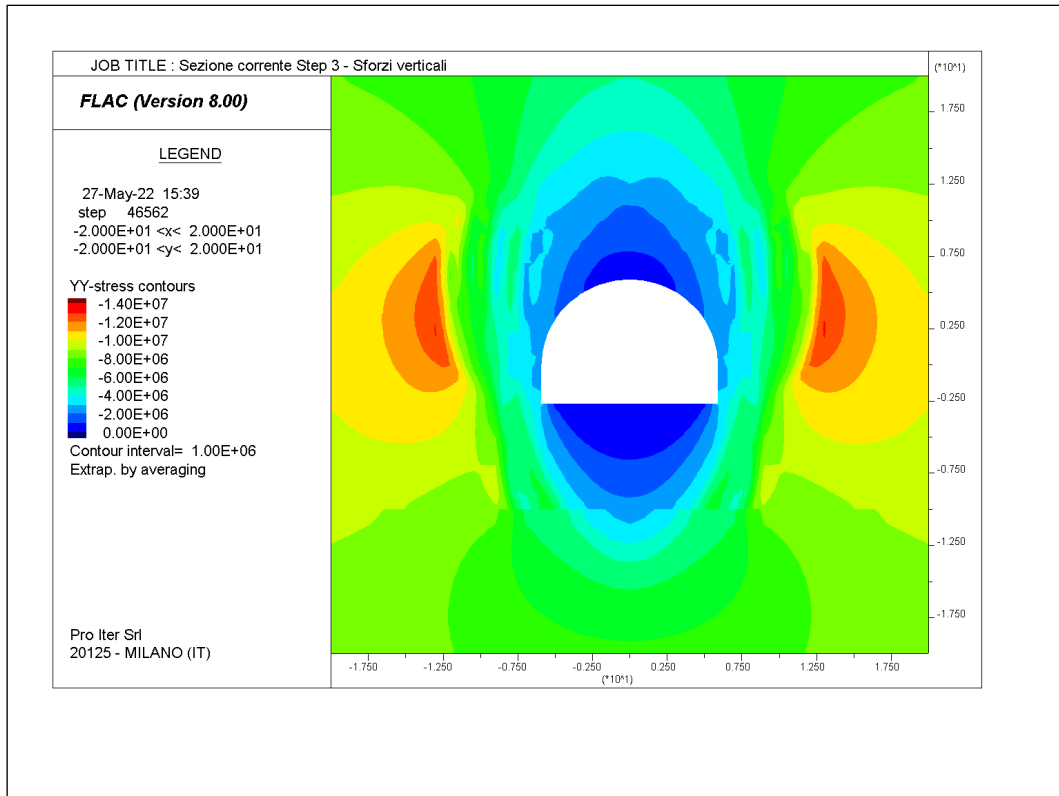
- Sforzi verticali nel modello – Step 1 (Scavo CE – FFS nulle)



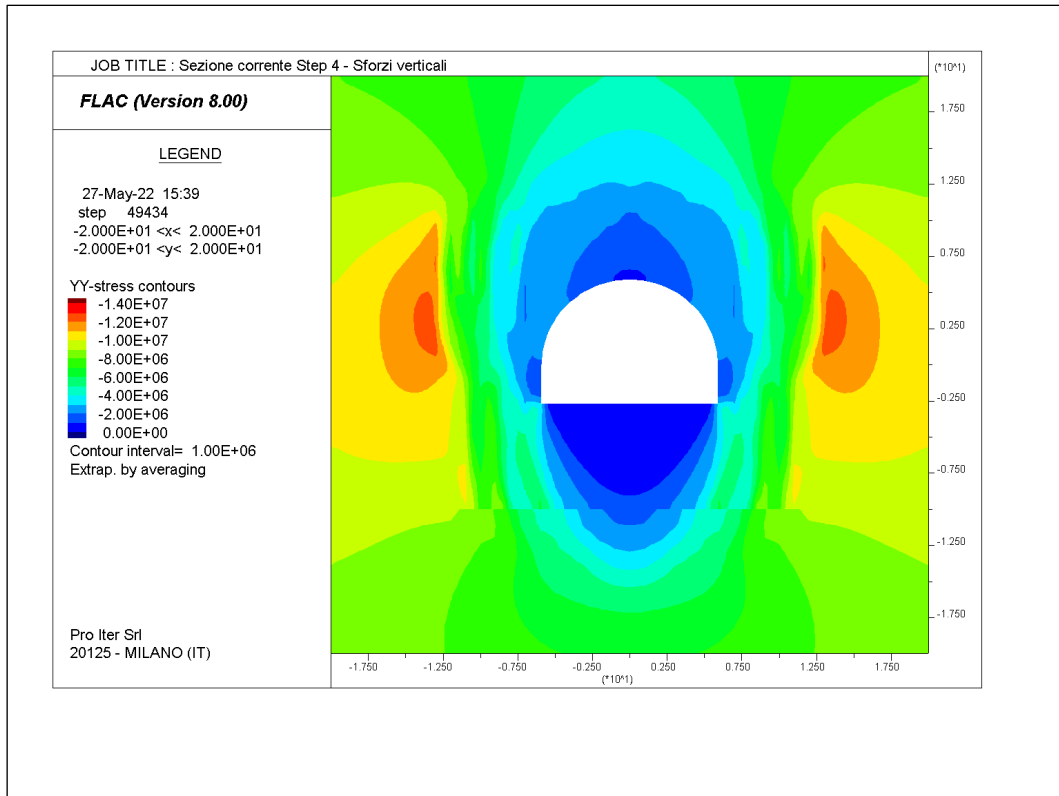
- Sforzi verticali nel modello – Step 2 (Scavo sezione corrente – FFS 14%)



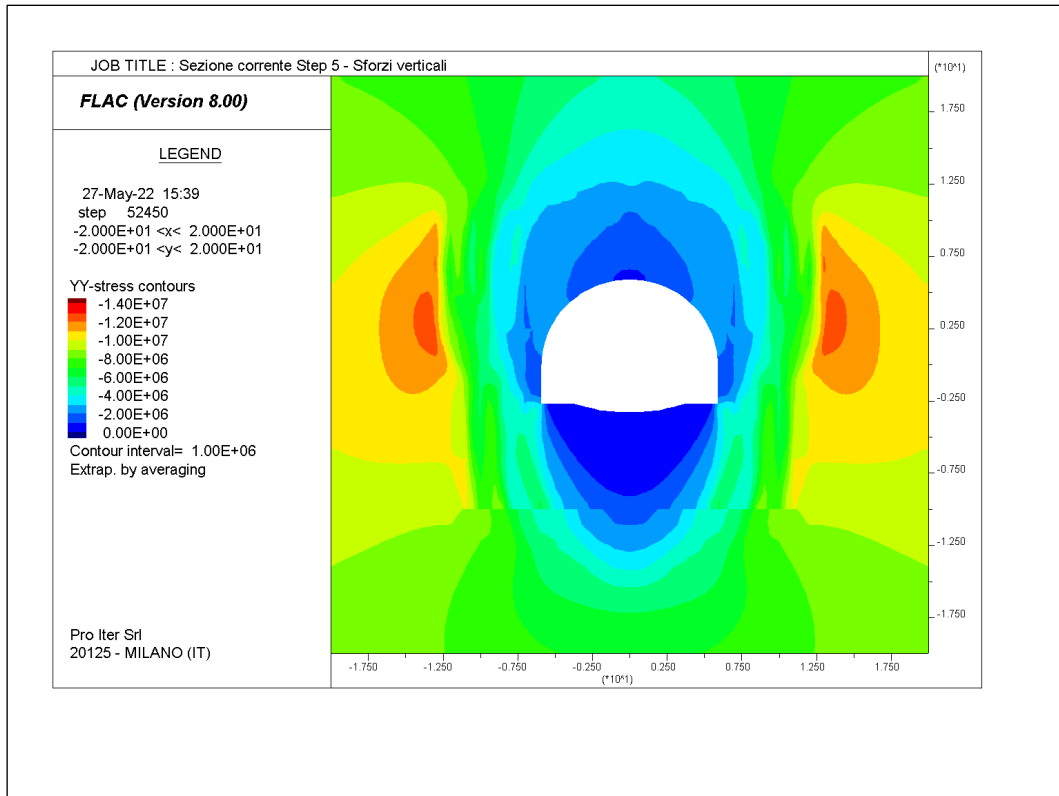
- Sforzi verticali nel modello – Step 3 (Distanza 1.5 m dal fronte – FFS 8%)



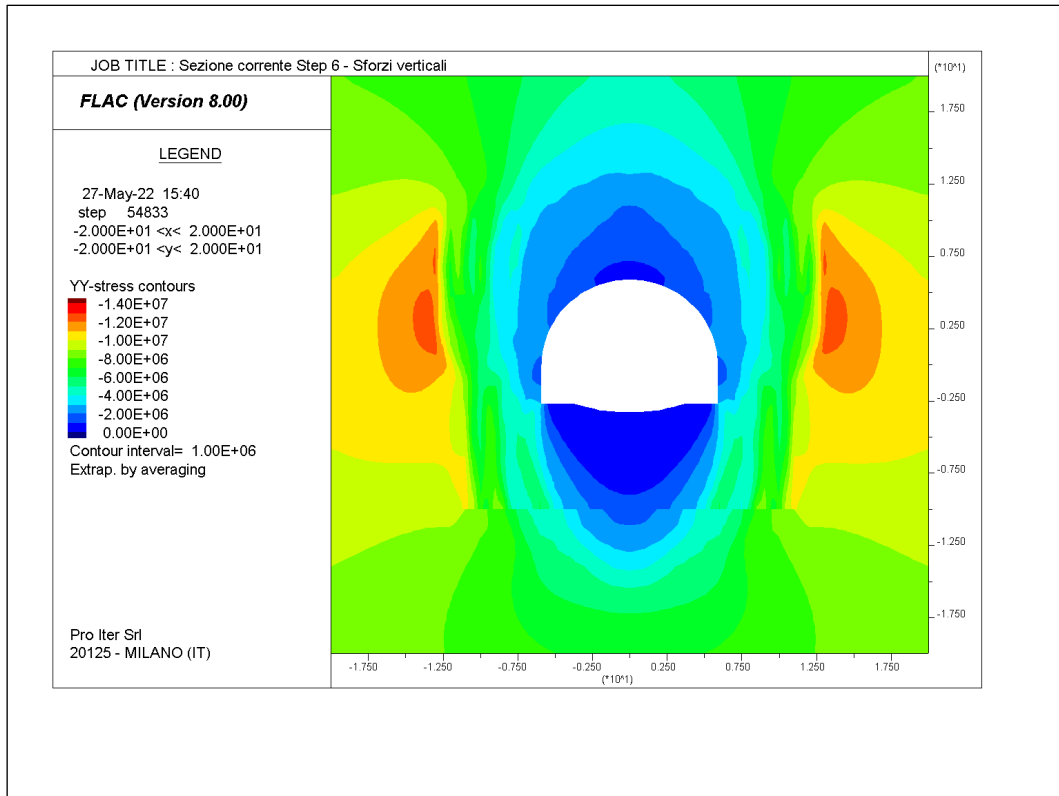
- Sforzi verticali nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)



- Sforzi verticali nel modello – Step 5 (Scavo arco rovescio)

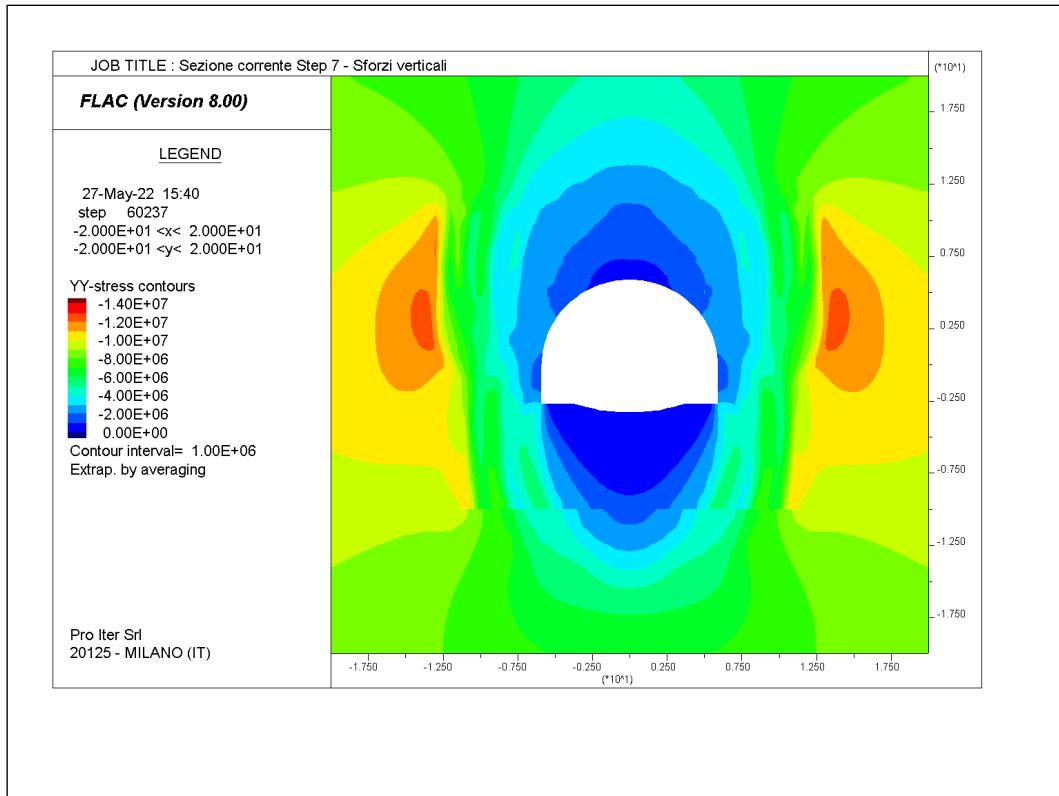


- **Sforzi verticali nel modello – Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)**

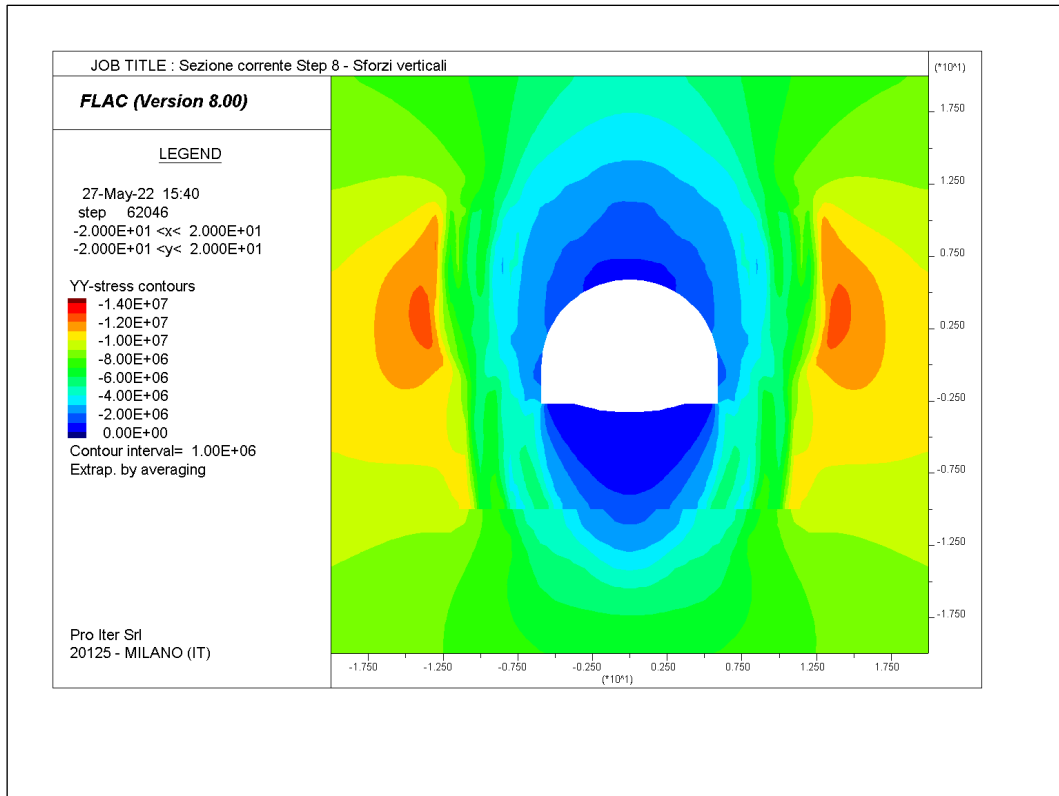


- Sforzi verticali nel modello – Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)

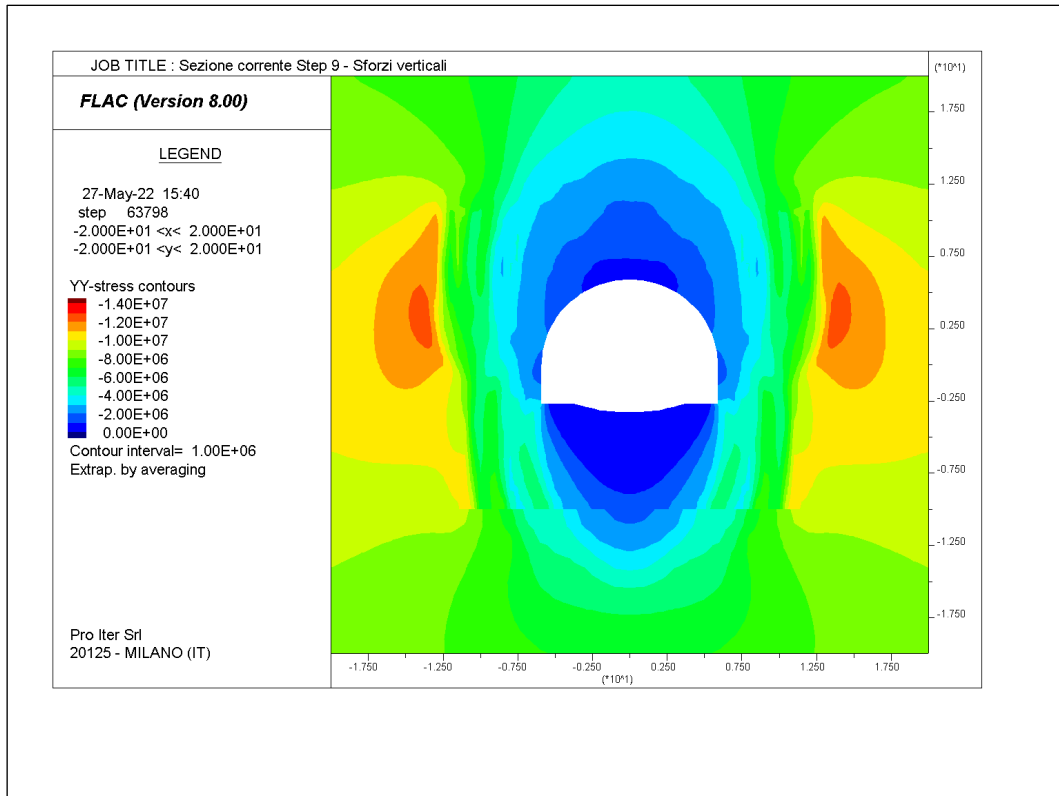




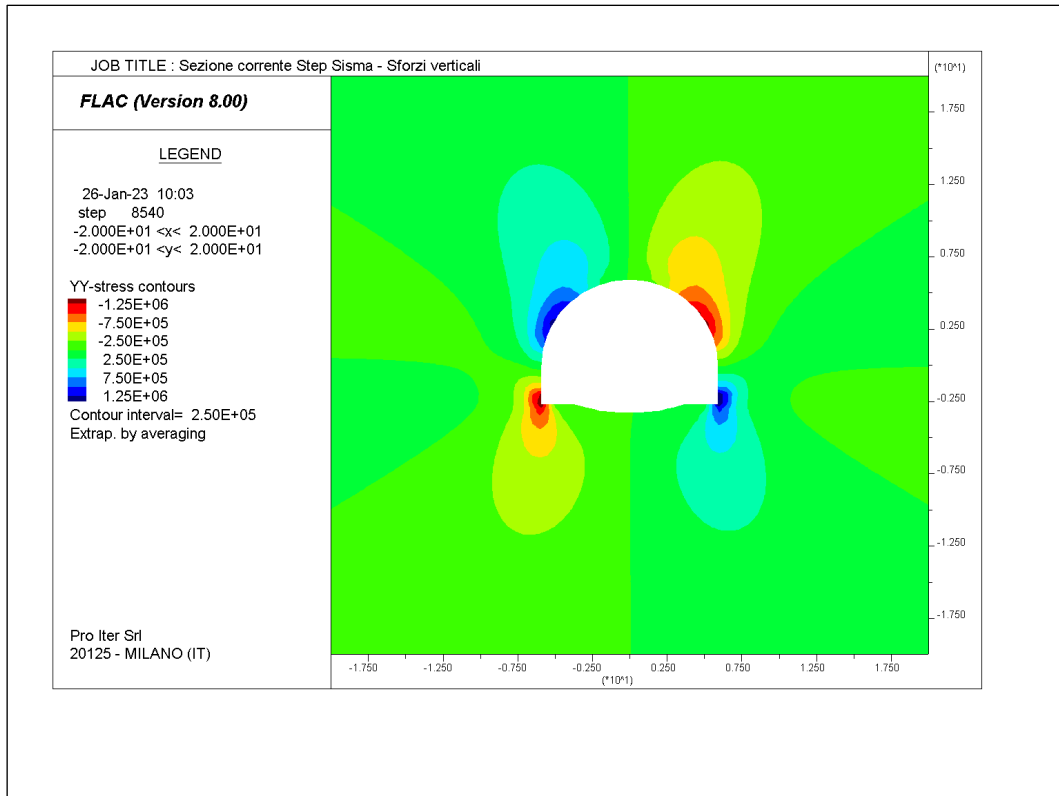
- Sforzi verticali nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)



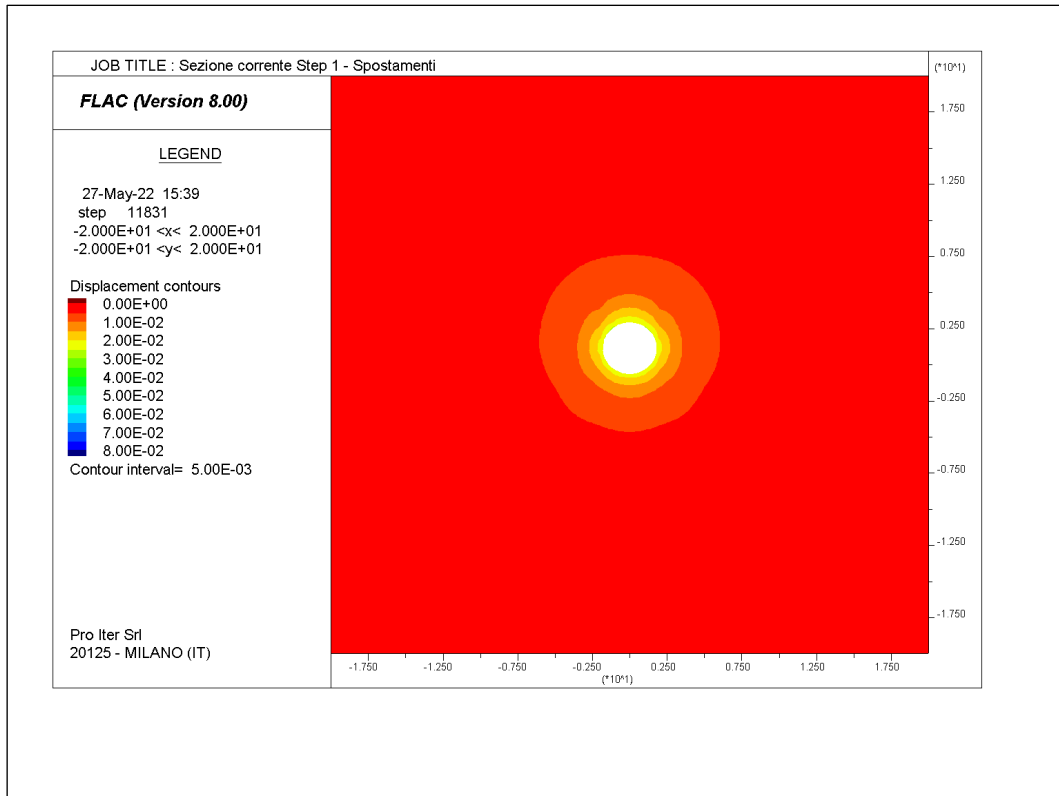
- Sforzi verticali nel modello – Step 9 (Applicazione del carico di falda)



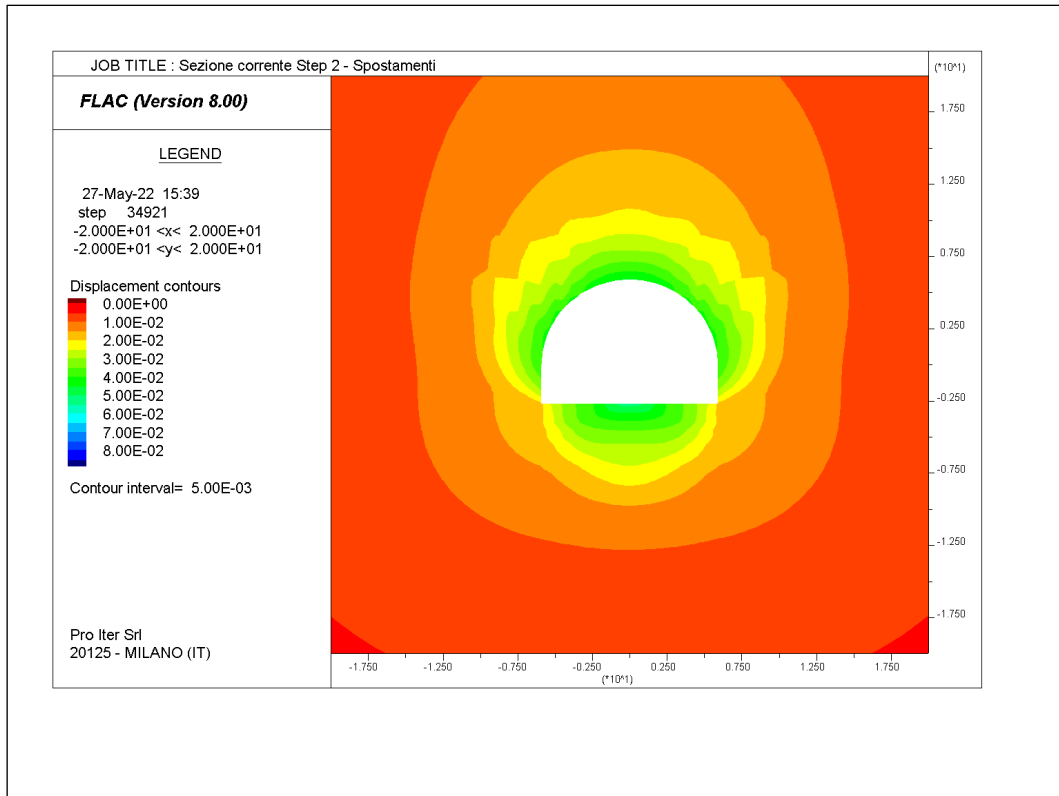
- Sforzi verticali nel modello – Step Sisma



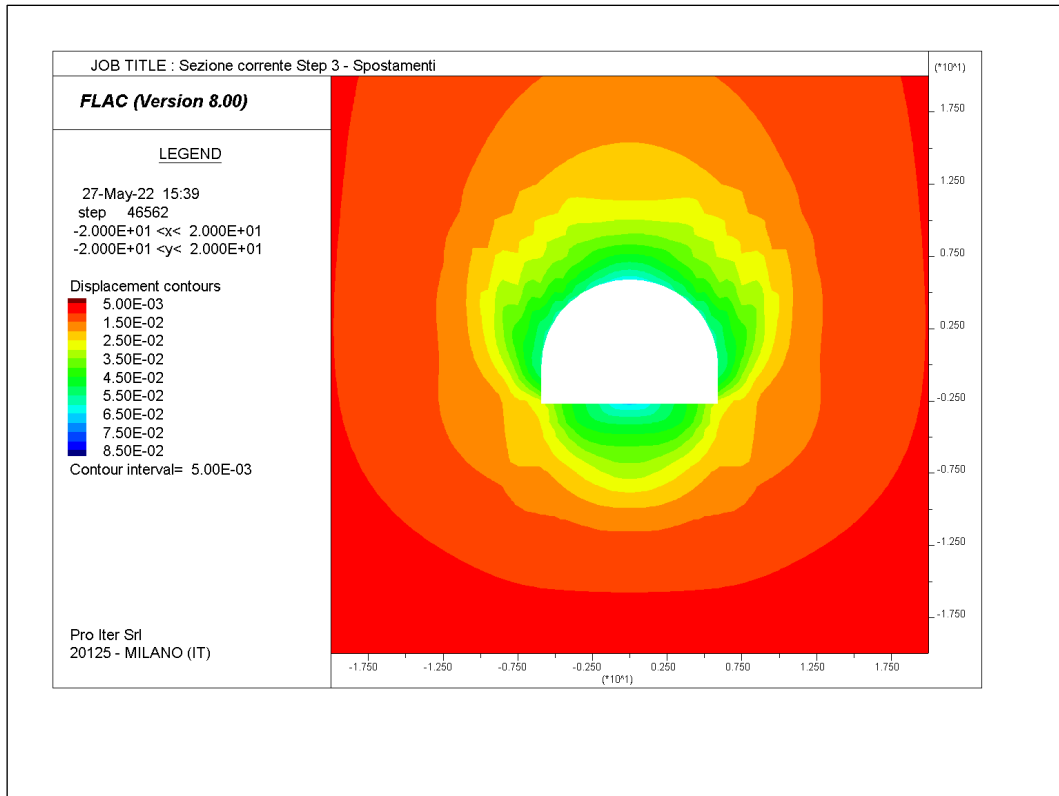
- Spostamenti totali nel modello – Step 1 (Scavo CE – FFS nulle)



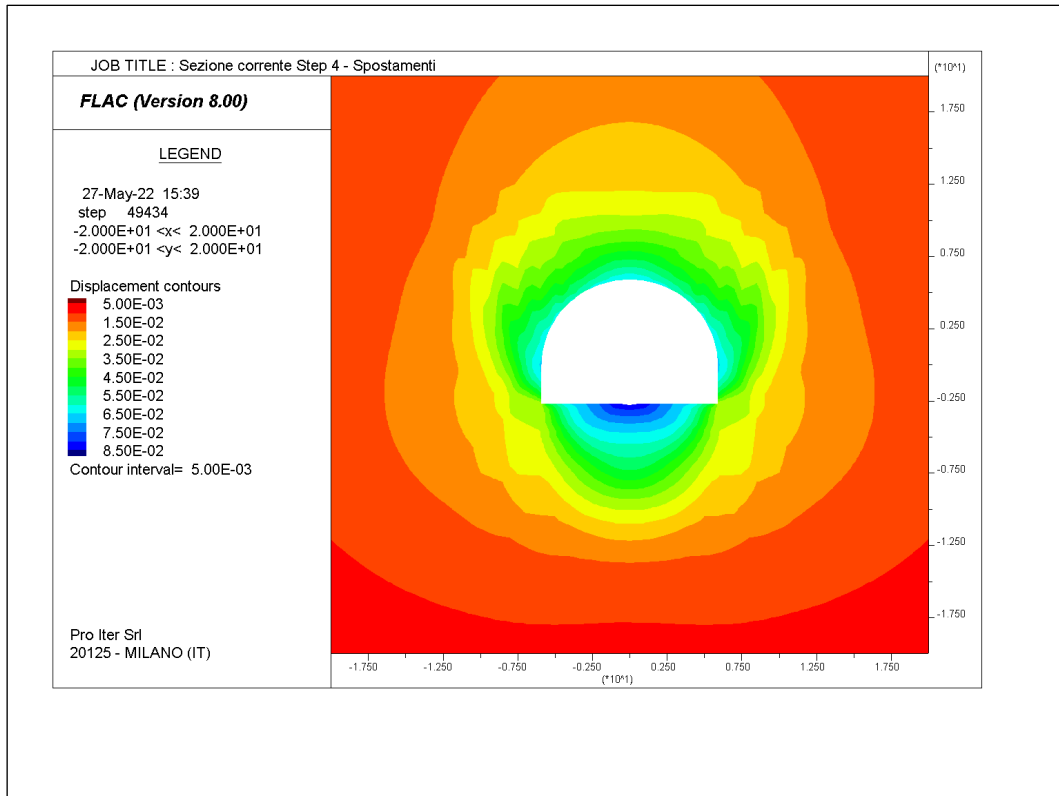
- **Spostamenti totali nel modello – Step 2 (Scavo sezione corrente – FFS 14%)**



- Spostamenti totali nel modello – Step 3 (Distanza 1.5 m dal fronte – FFS 8%)

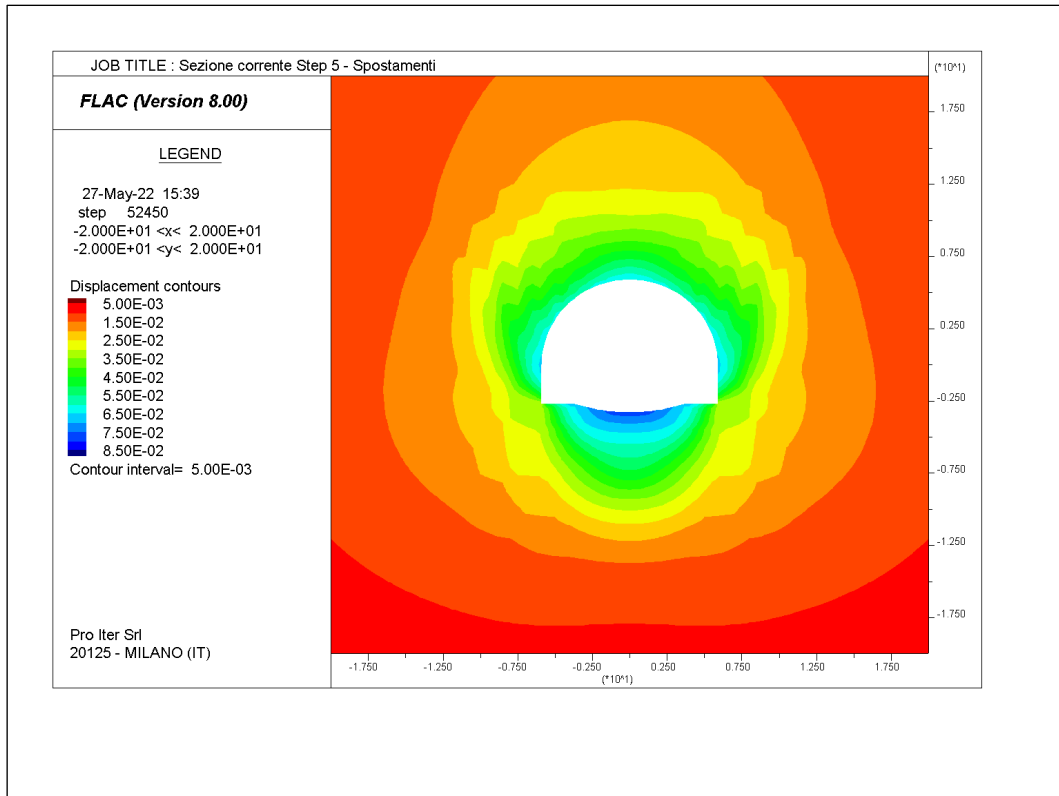


- **Spostamenti totali nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)**

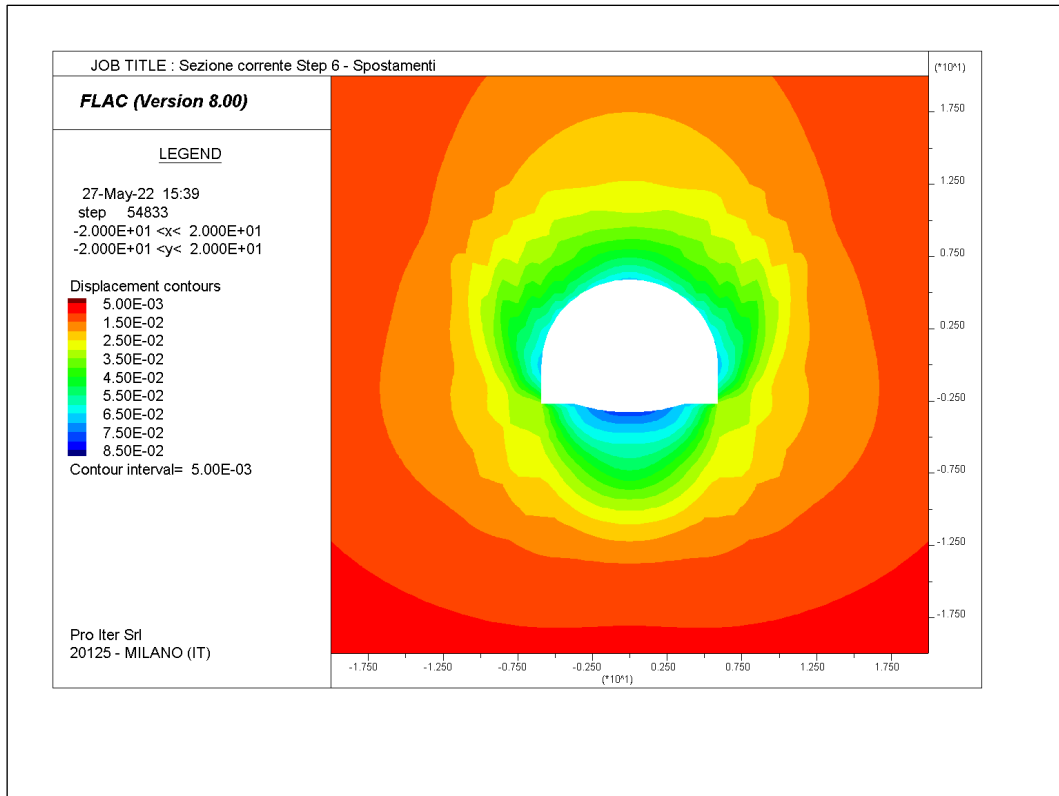


- **Spostamenti totali nel modello – Step 5 (Scavo arco rovescio)**

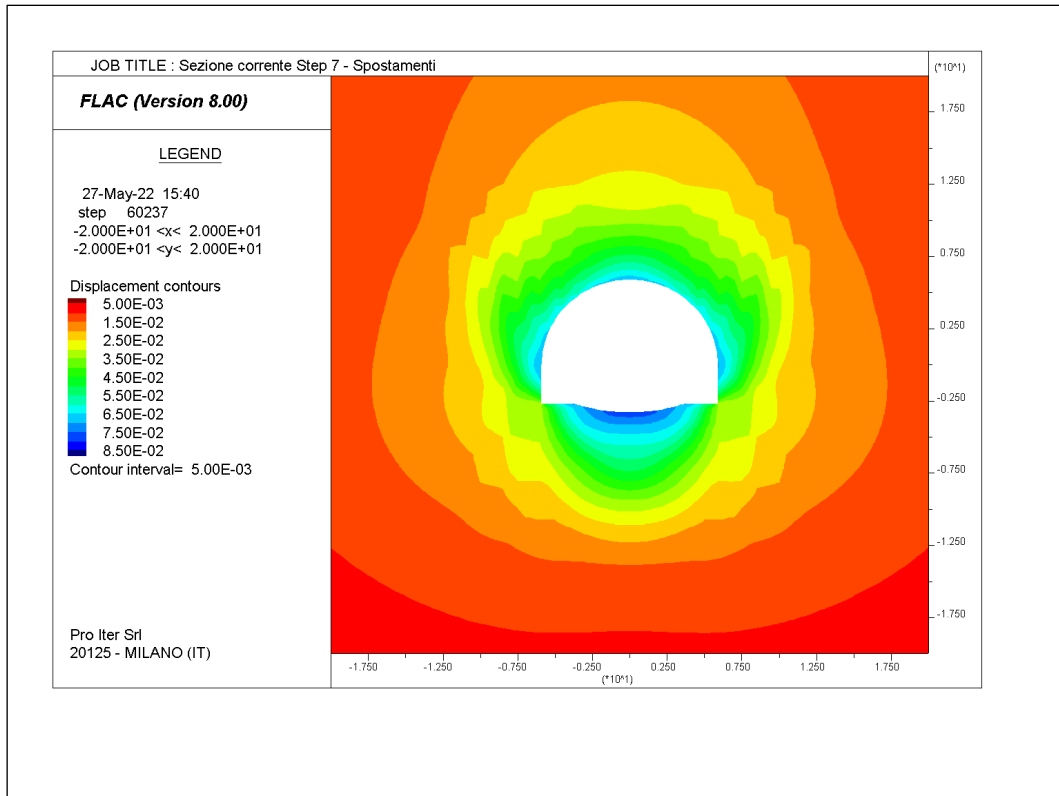




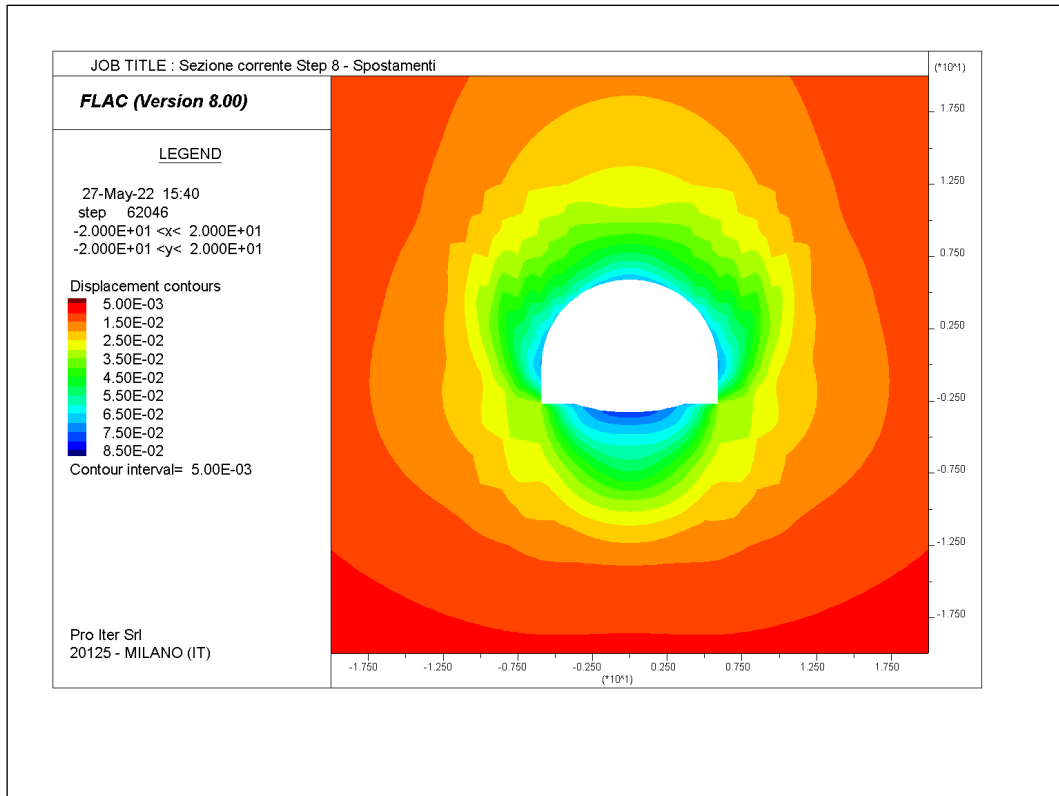
- **Spostamenti totali nel modello – Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)**



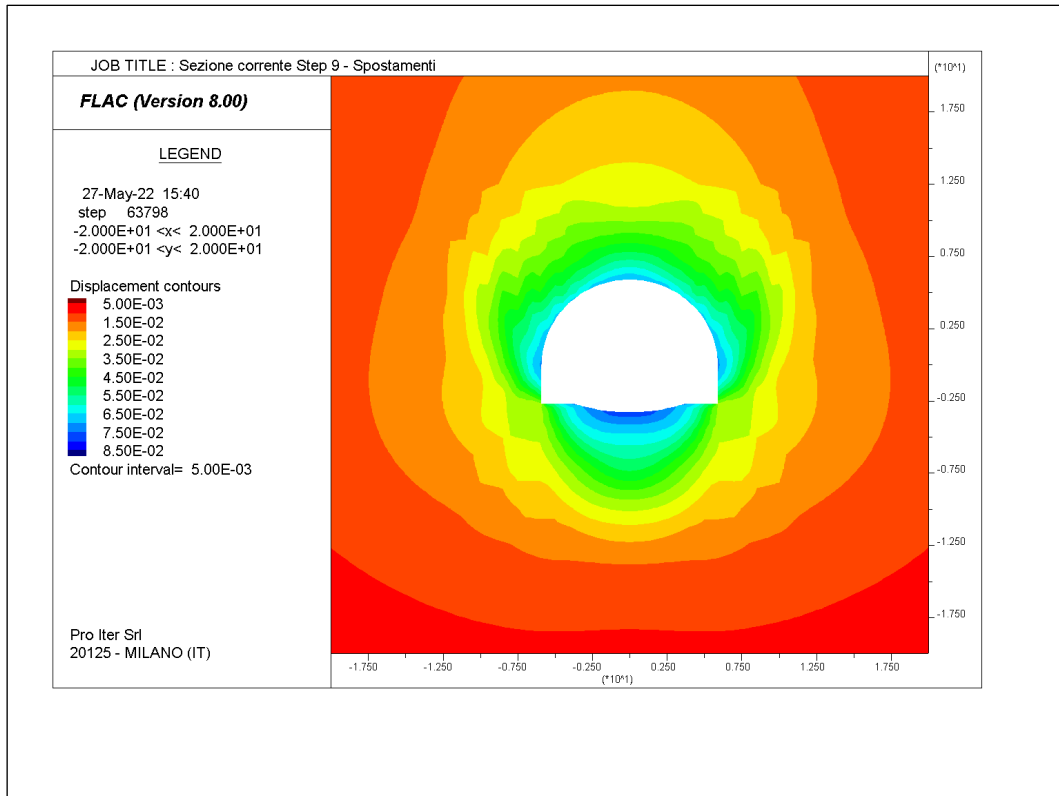
- **Spostamenti totali nel modello – Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)**



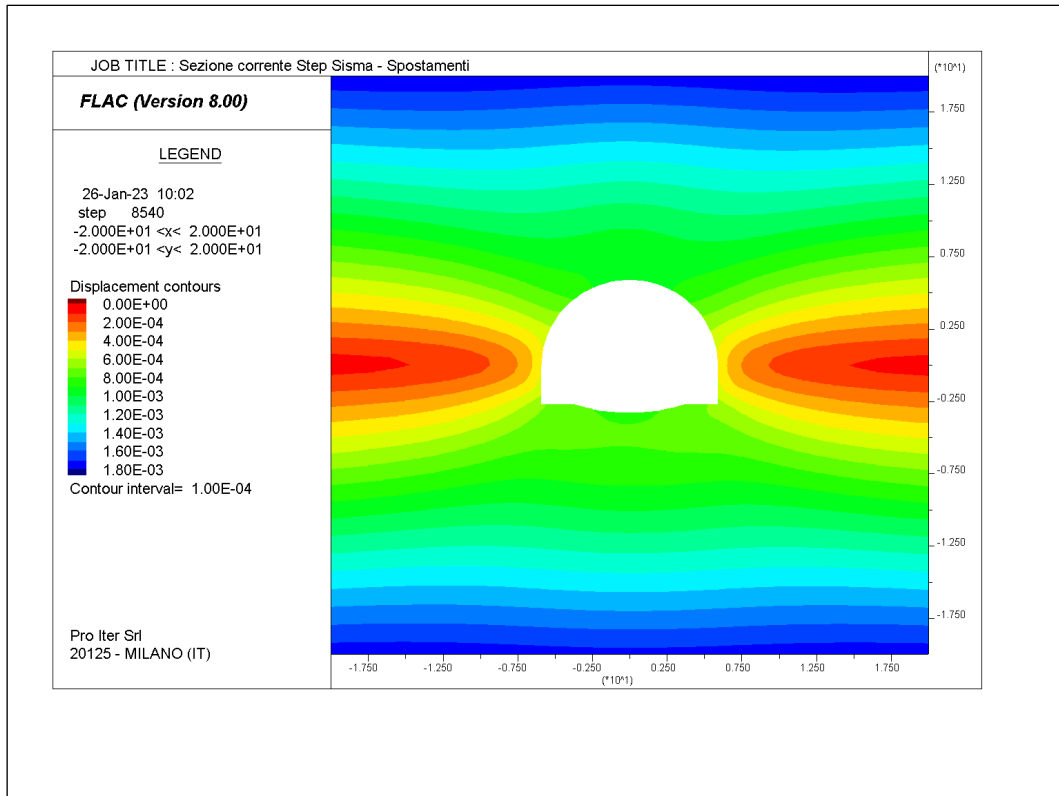
- Spostamenti totali nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)



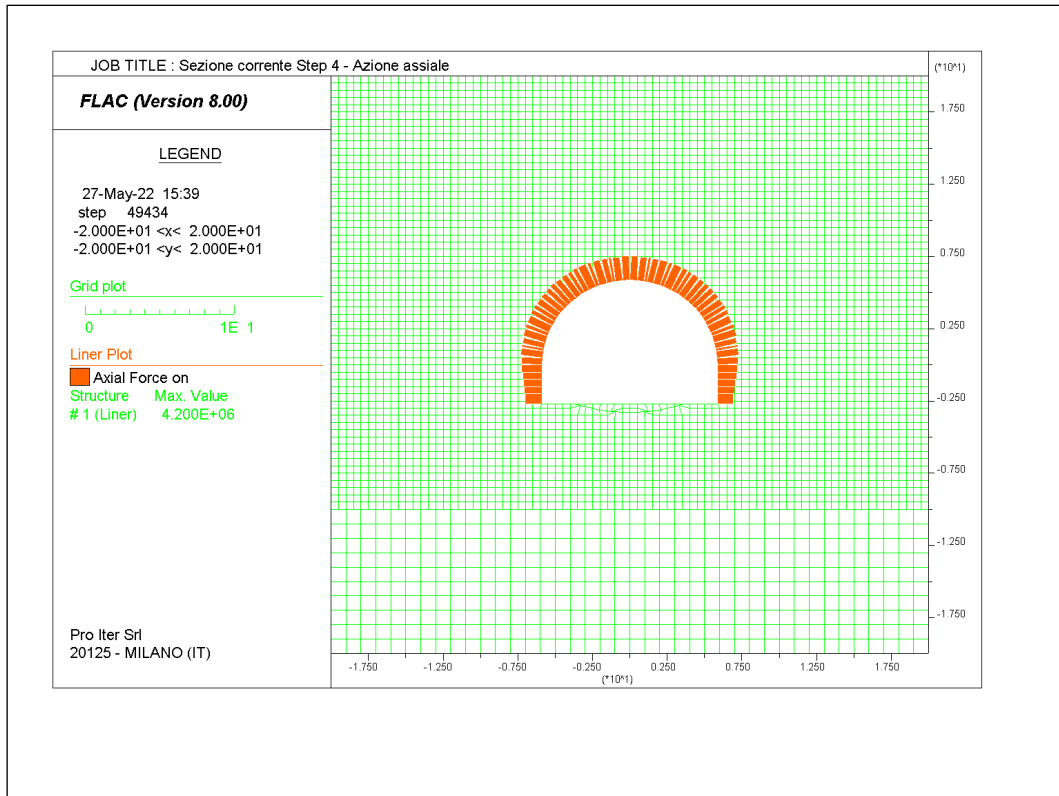
- Spostamenti totali nel modello – Step 9 (Applicazione del carico di falda)



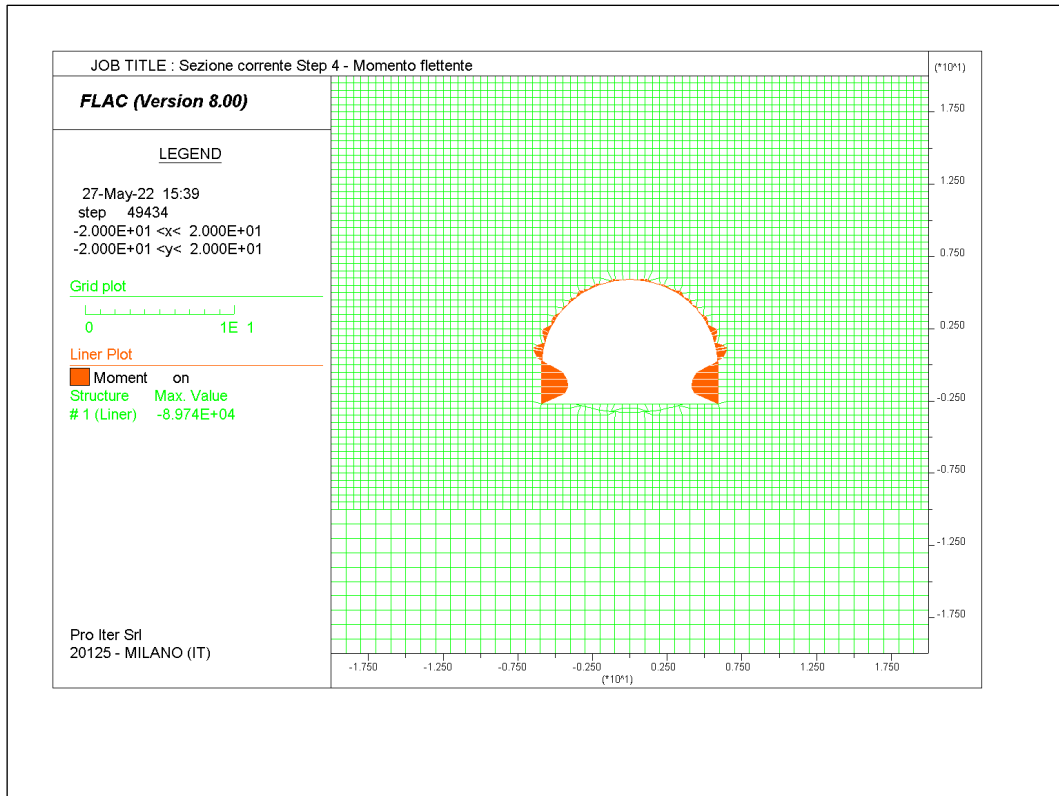
- Spostamenti totali nel modello – Step Sisma



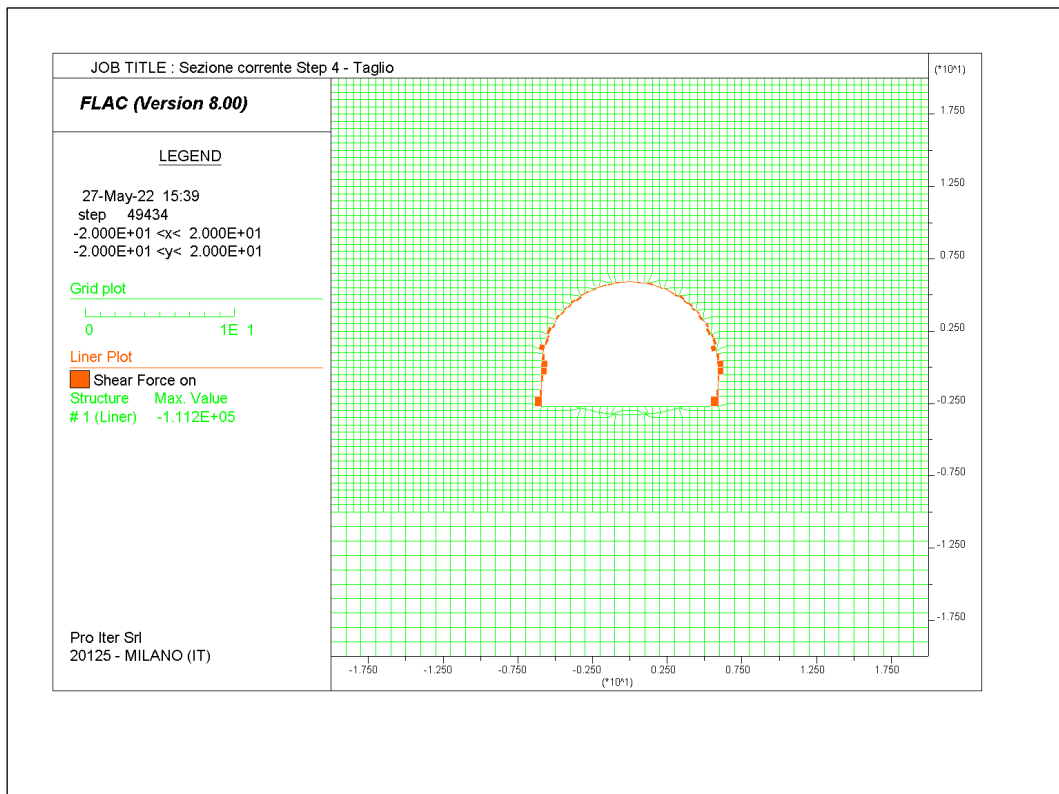
- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase [N] - Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)**



- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase [N] - Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)**

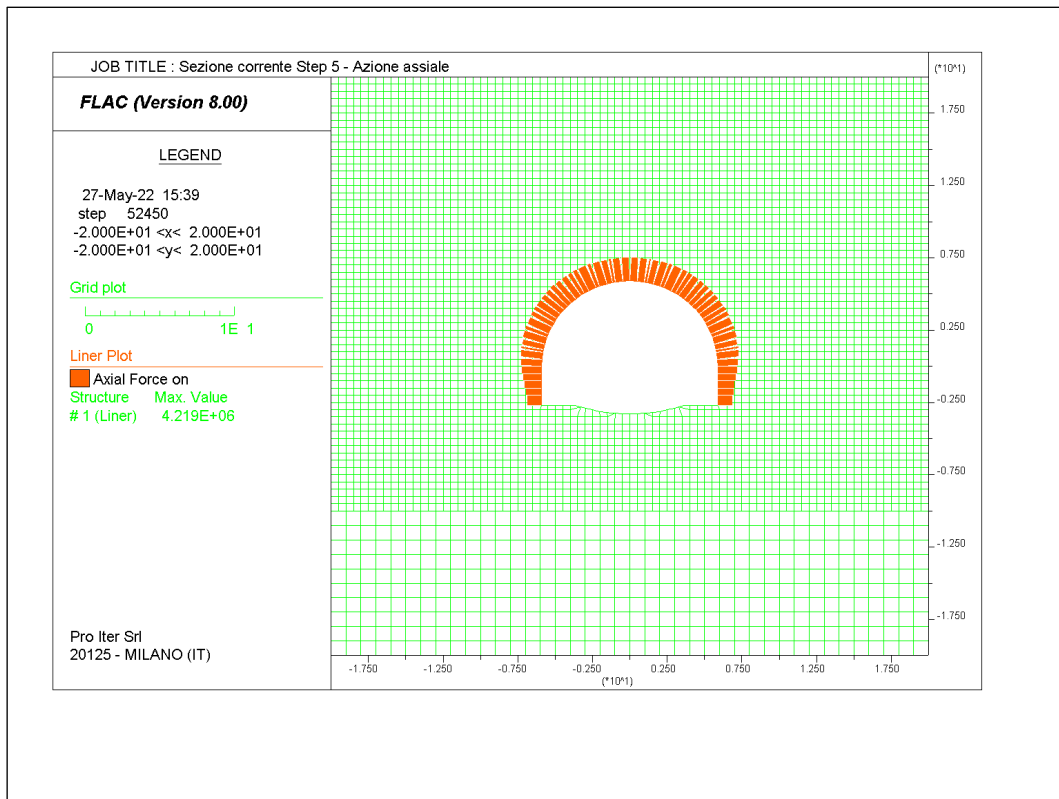


- Azione di taglio nel rivestimento di prima fase [Nm] - Step 4 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS nulle)

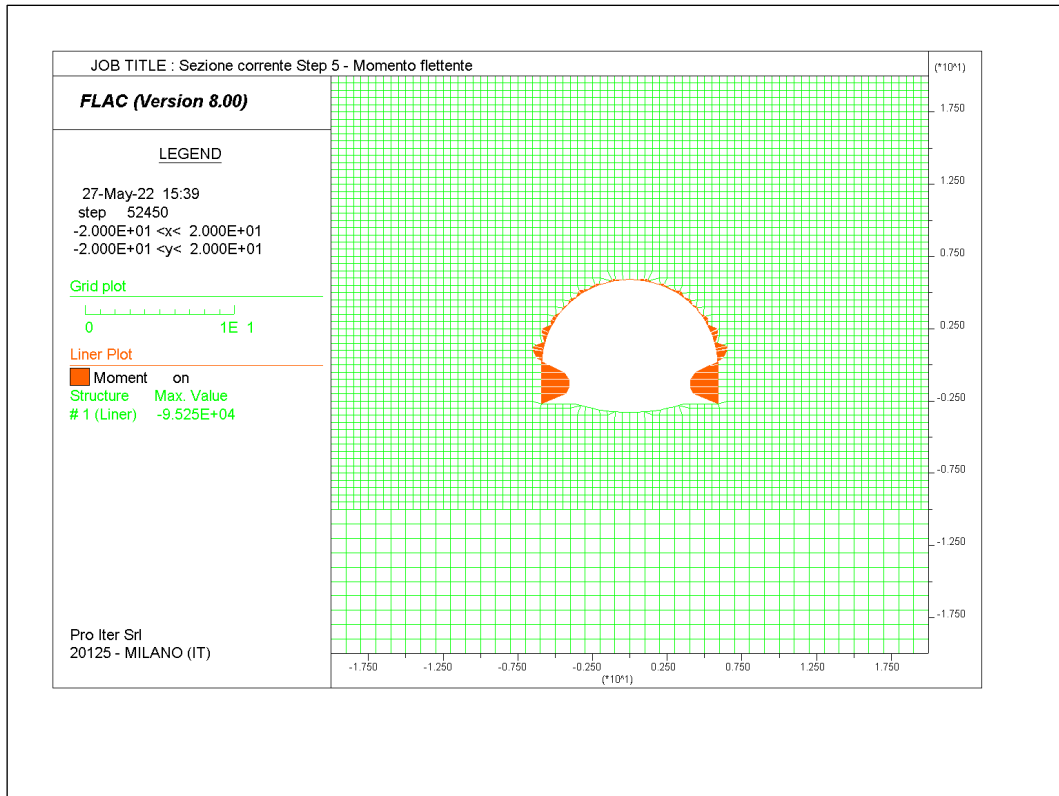




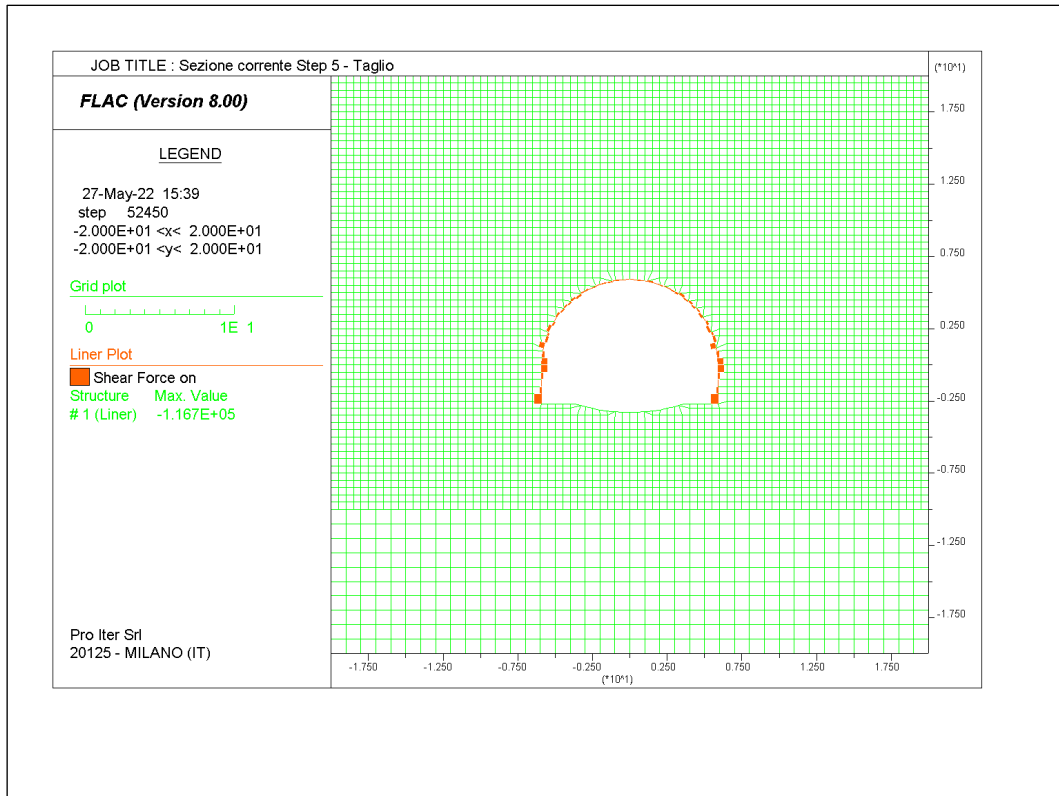
- Azione assiale nel rivestimento di prima fase [N] - Step 5 (Scavo arco rovescio)**



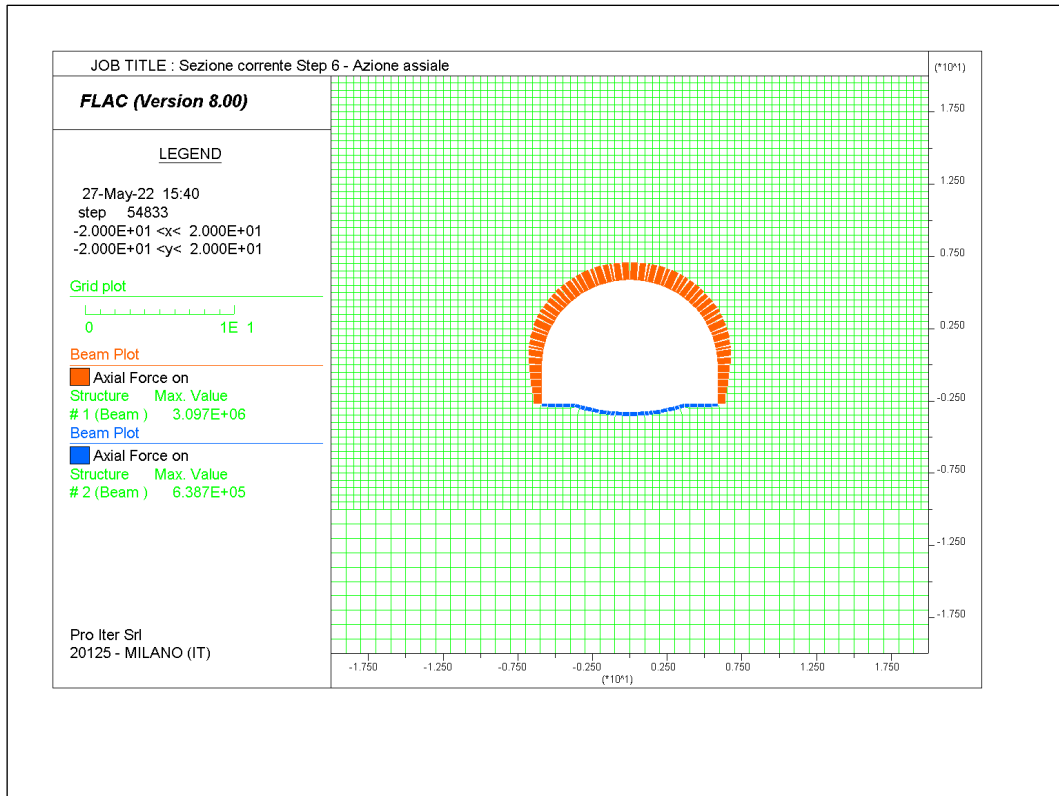
- Momento flettente nel rivestimento di prima fase [Nm] - Step 5 (Scavo arco rovescio)**



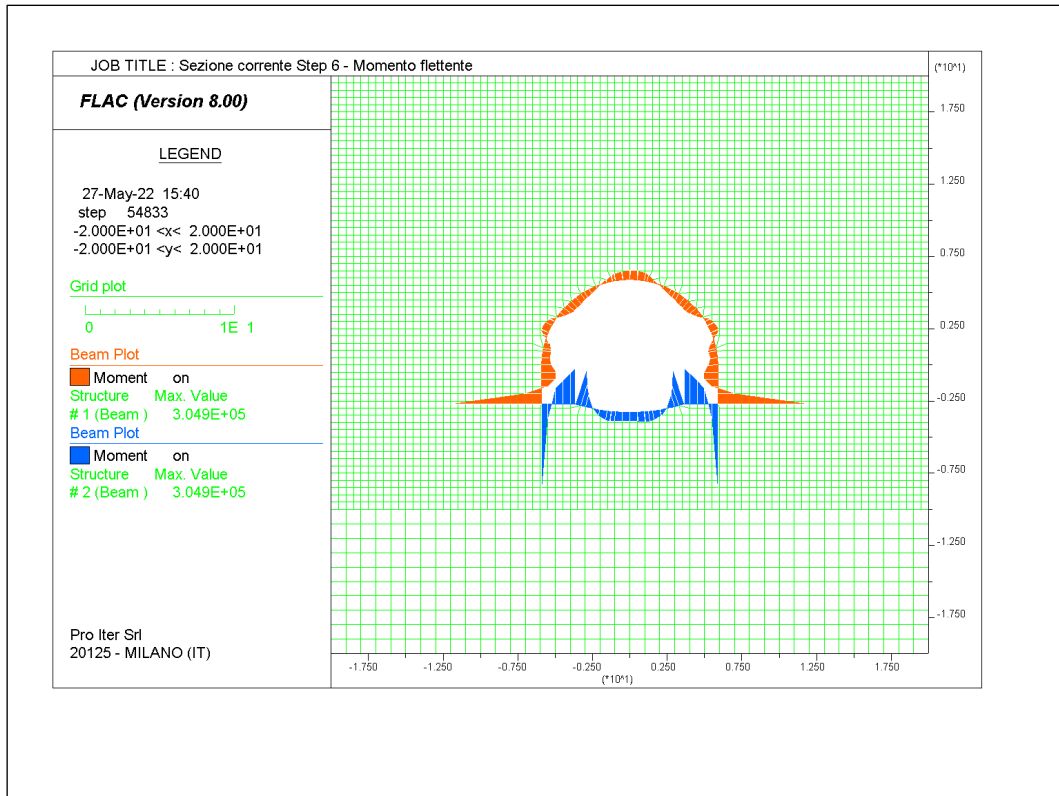
- Azione di taglio nel rivestimento di prima fase [N] - Step 5 (Scavo arco rovescio)



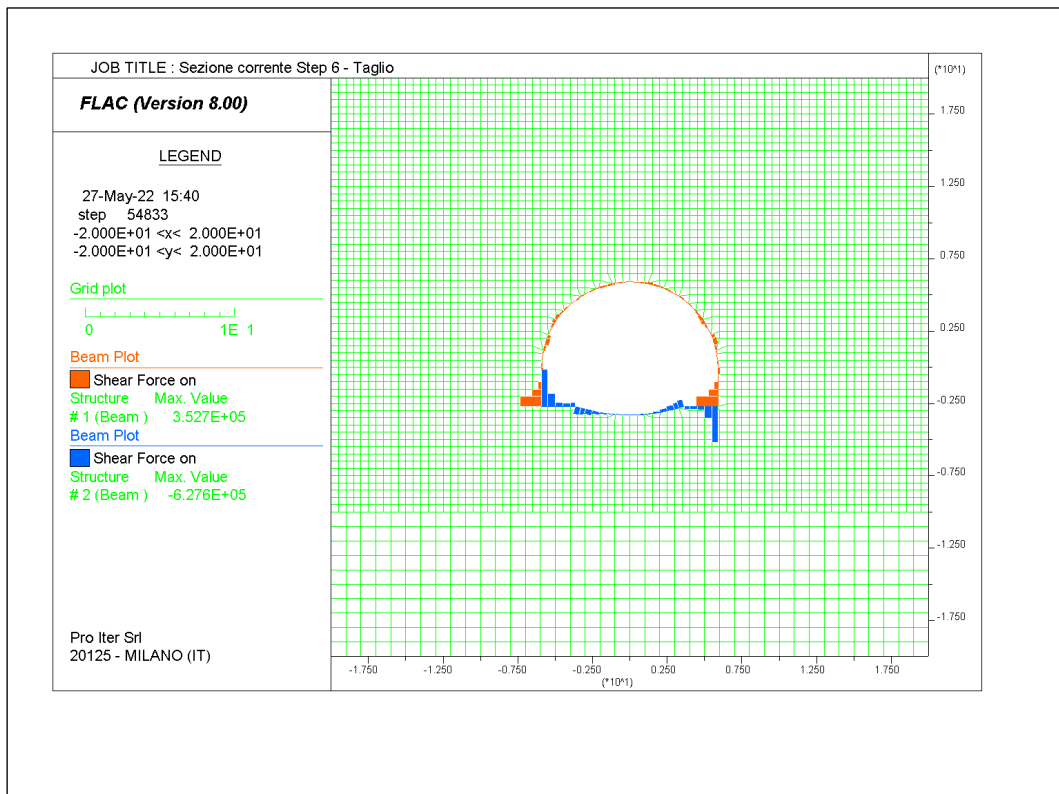
- Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)



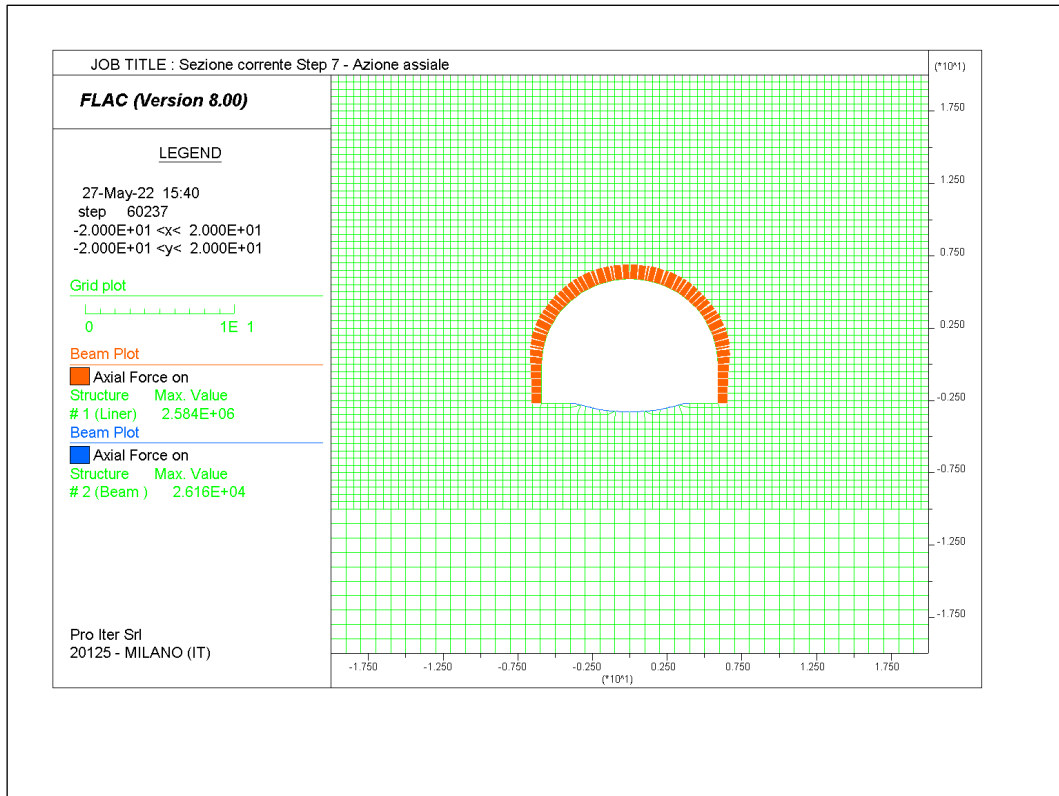
- **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)**



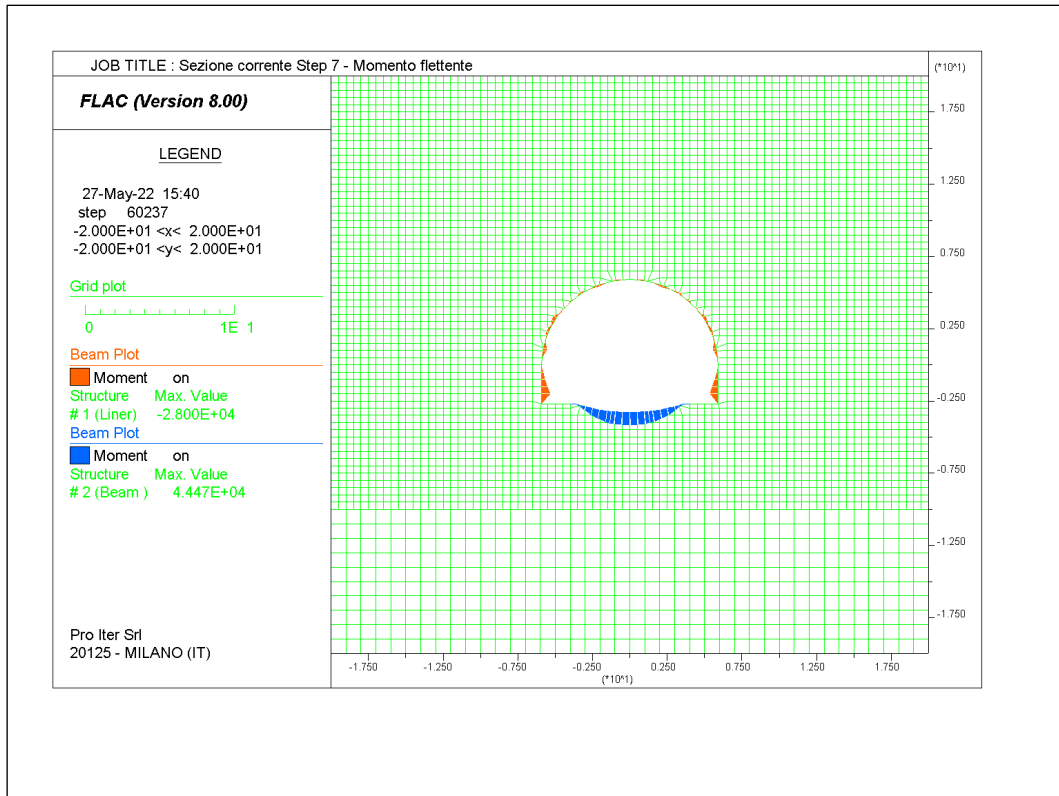
- Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 6 (Installazione rivestimento definitivo esistente)



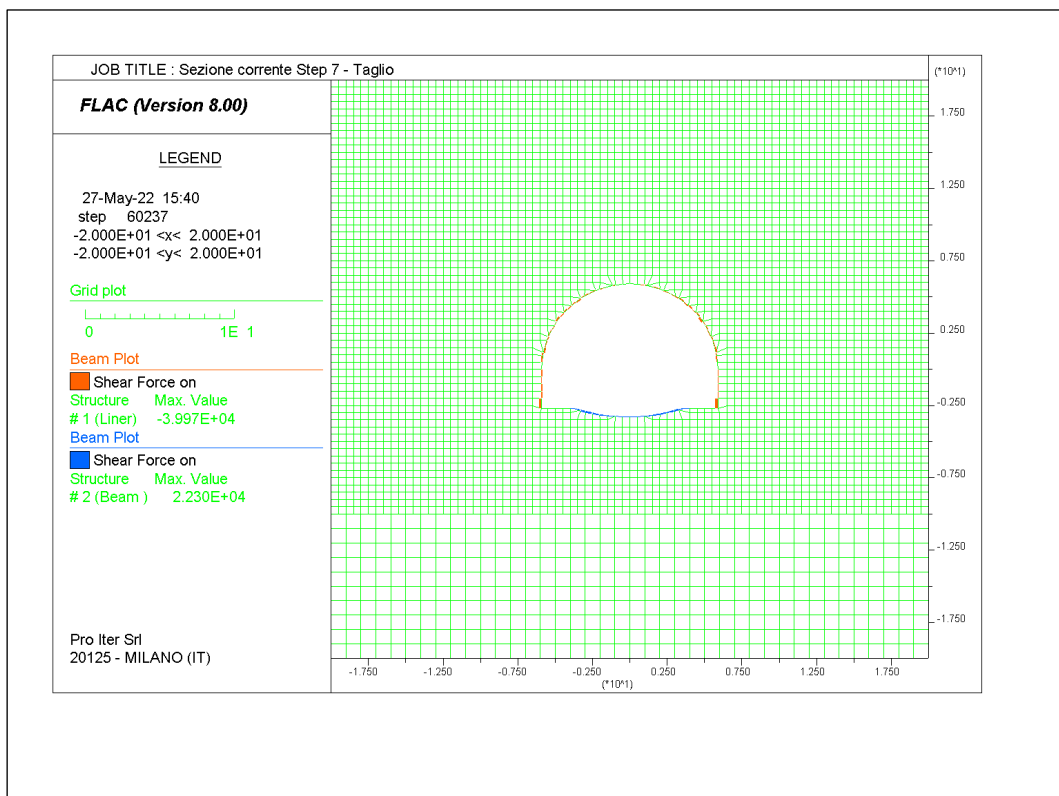
- **Azione assiale nei rivestimenti definitivi e di prima fase [N] - Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)**



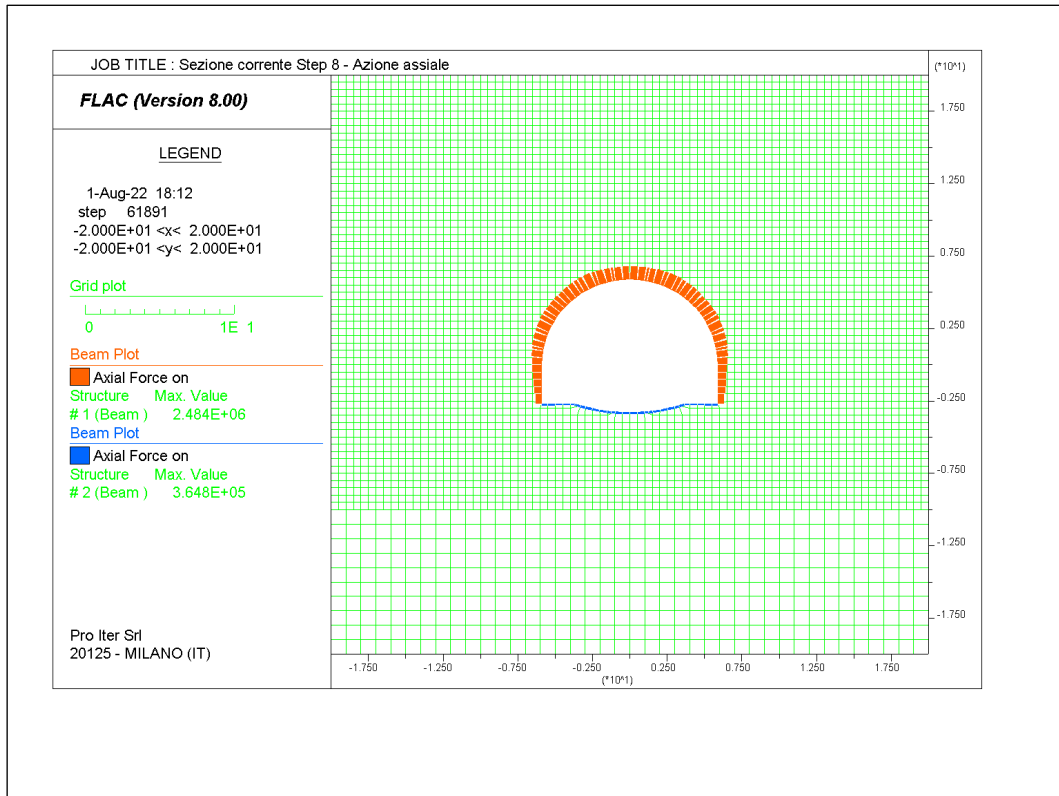
- **Momento flettente nei rivestimenti definitivi e di prima fase [Nm] - Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)**



- Azione di taglio nei rivestimenti definitivi e di prima fase [N] - Step 7 (Riprofilatura e installazione rivestimento di prima fase di progetto)

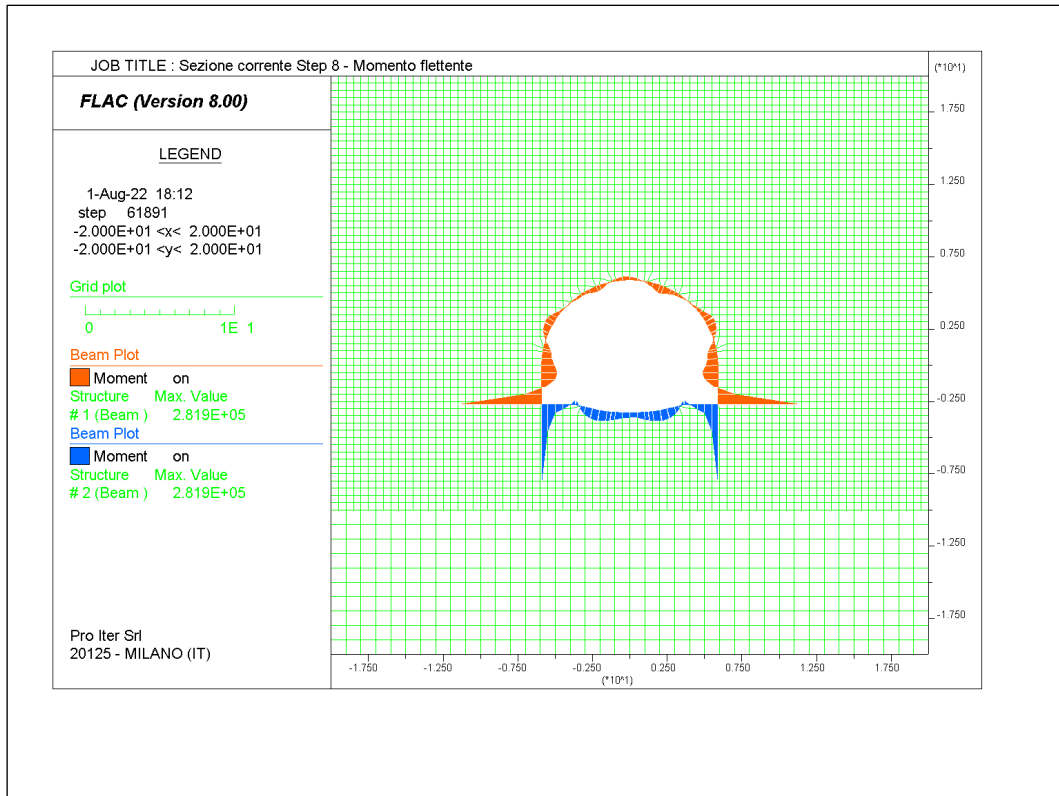


- **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)**

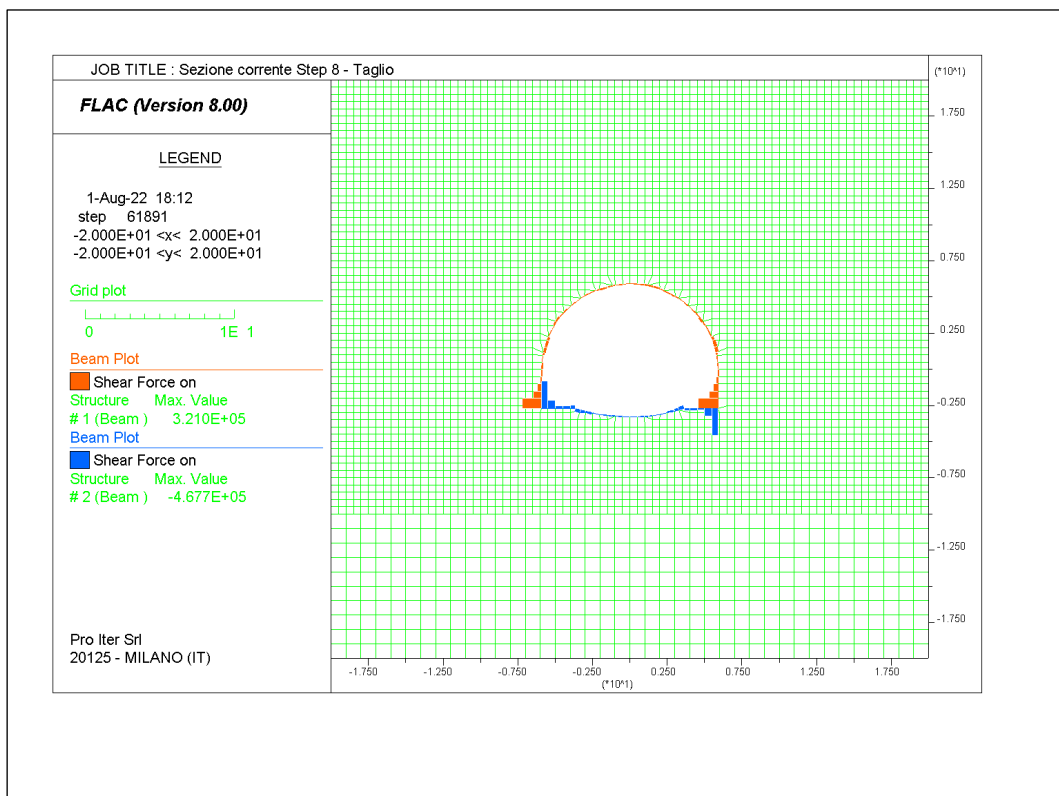


- **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)**

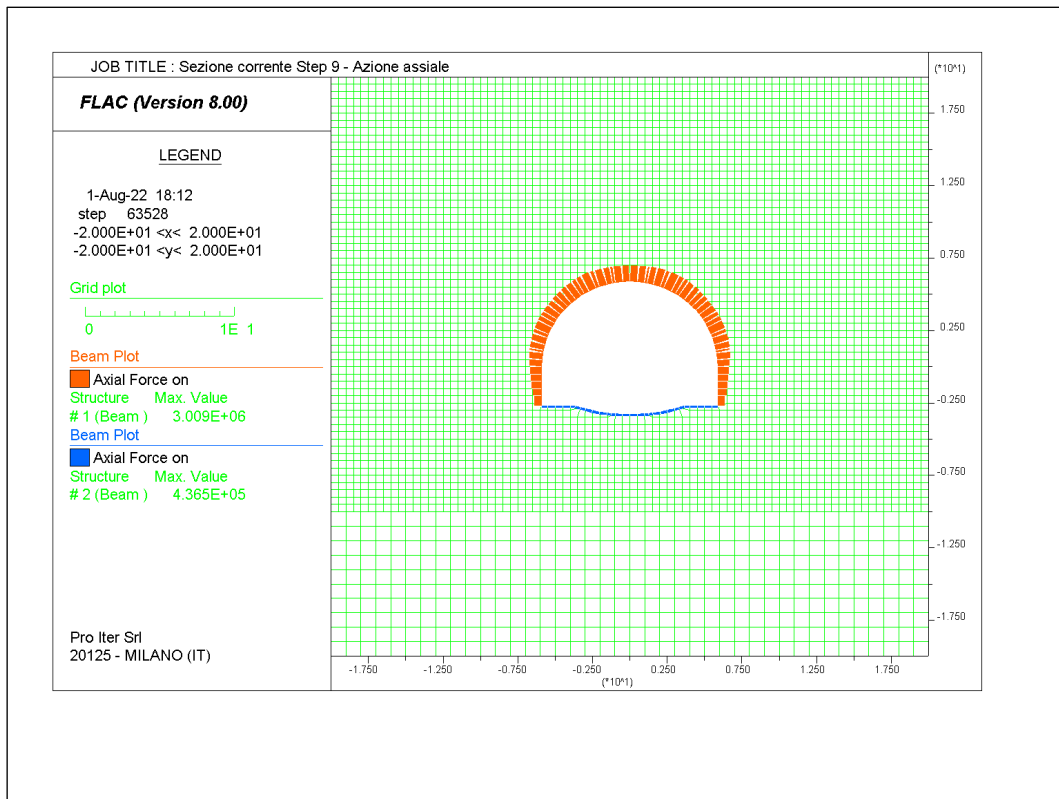




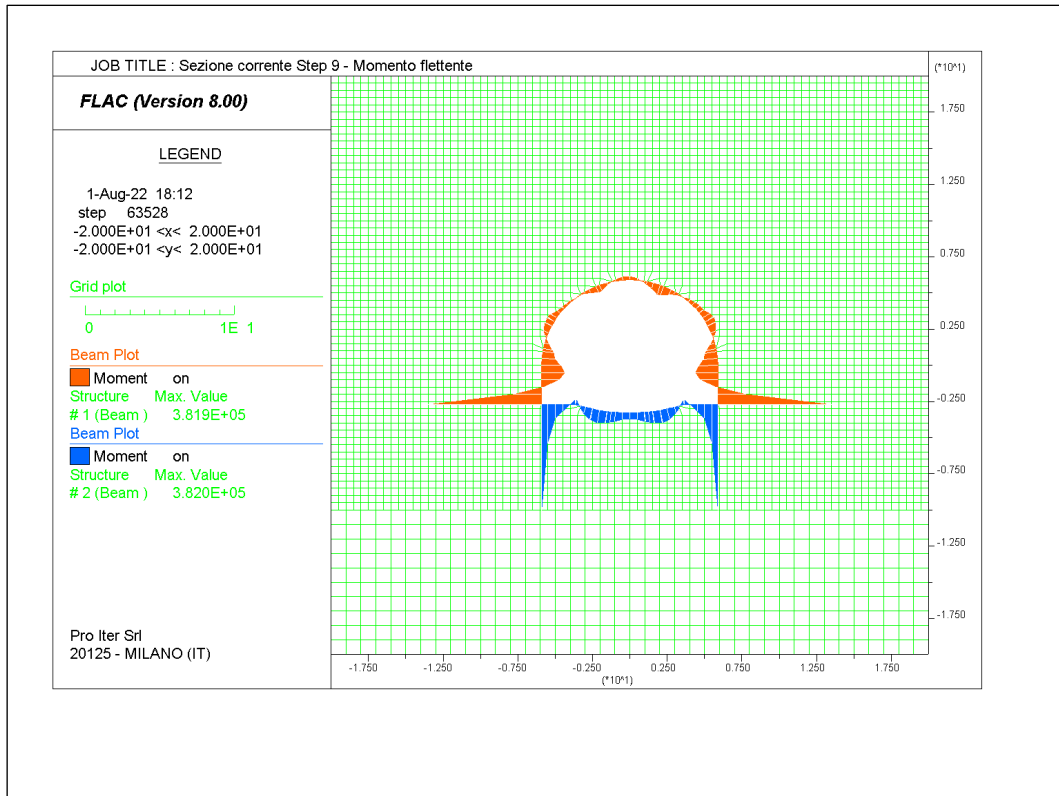
- **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 8 (Installazione rivestimento definitivo di progetto)**



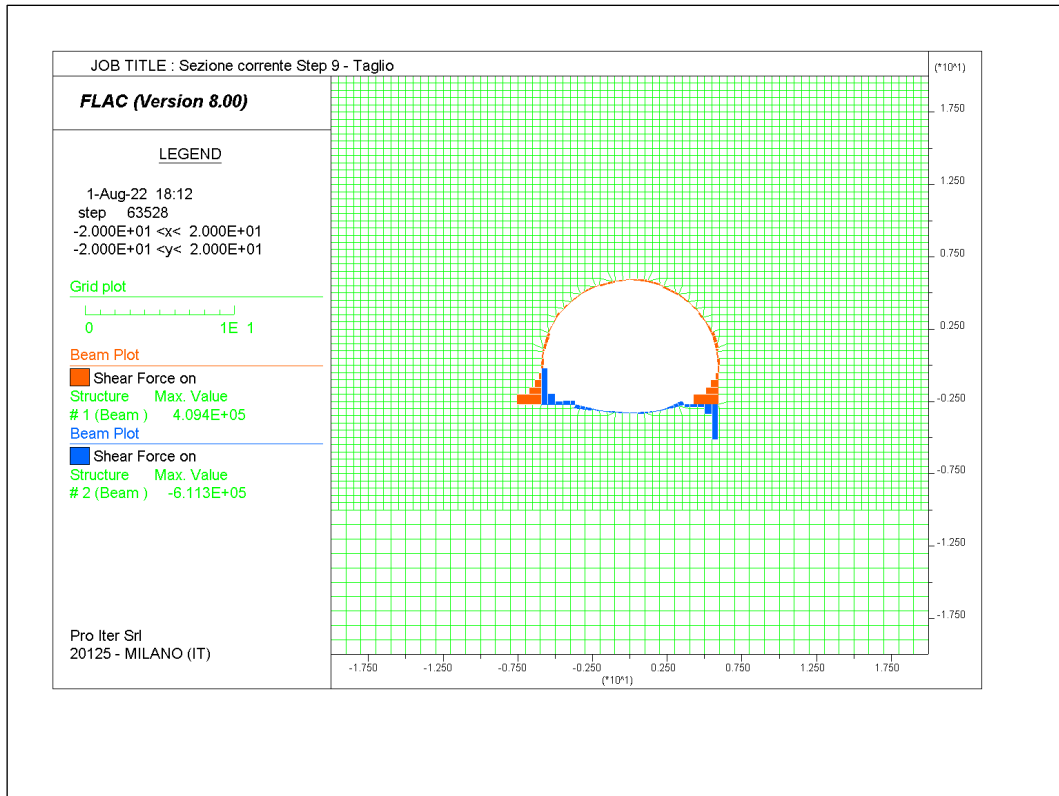
• **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 9 (Applicazione del carico di falda)**



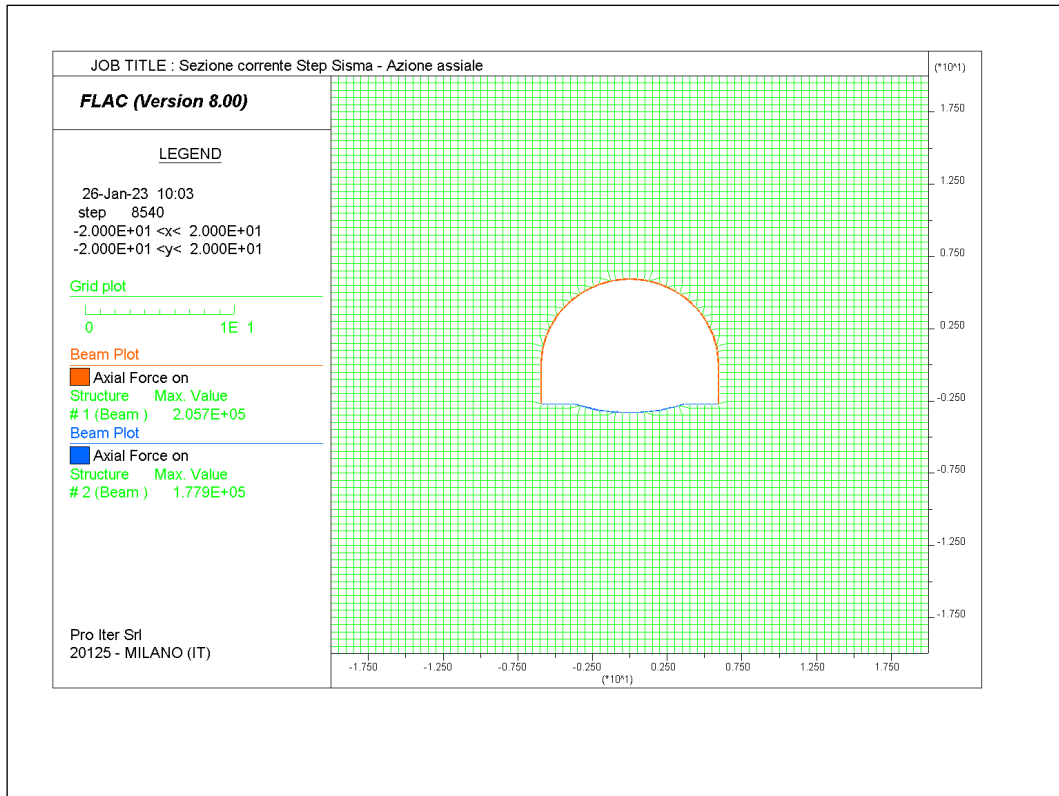
• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 9 (Applicazione del carico di falda)**



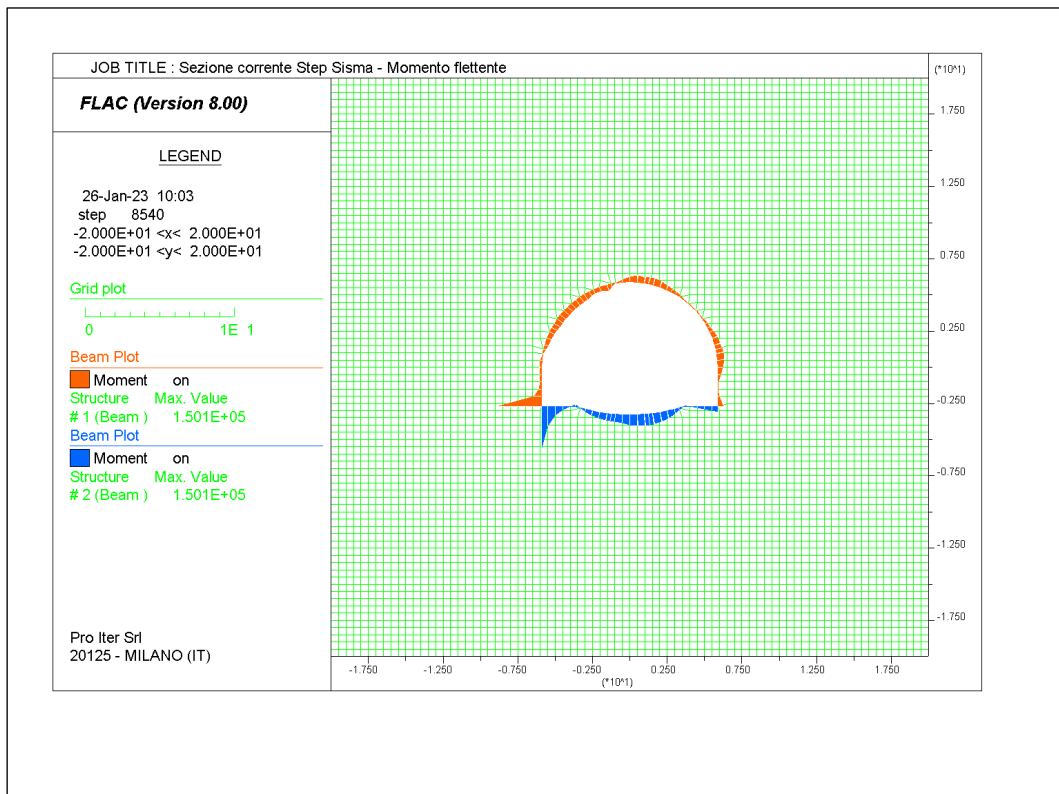
- Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 9 (Applicazione del carico di falda)



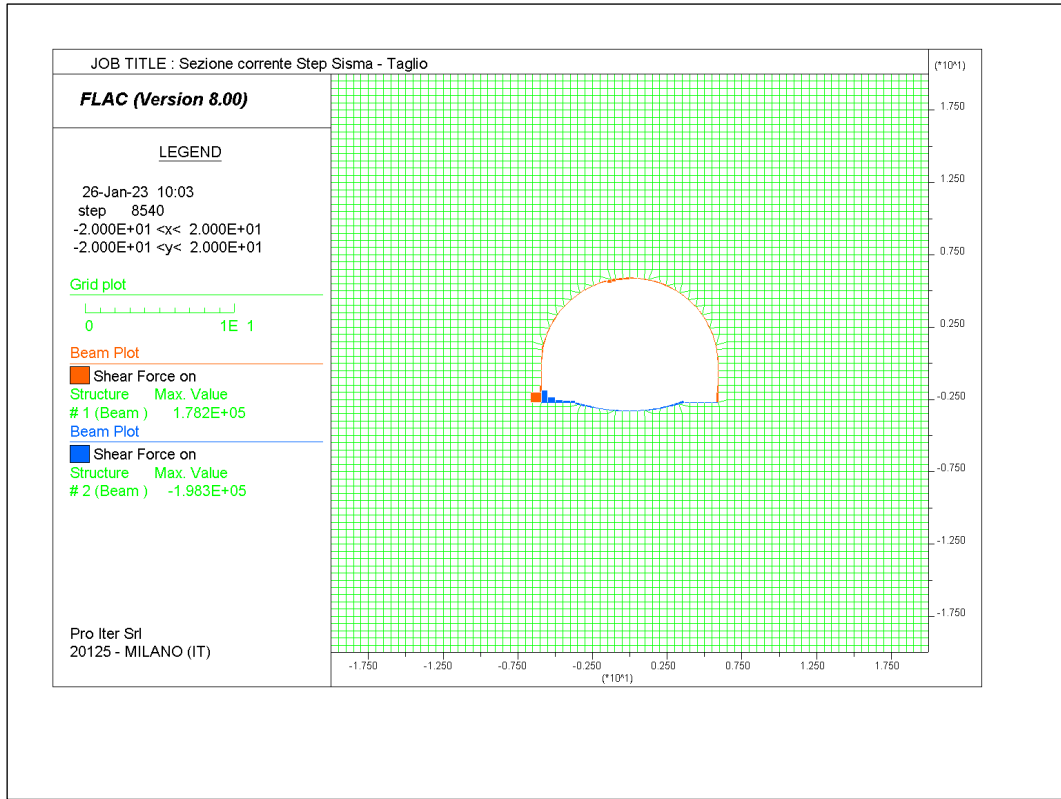
- Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step Sisma



• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step Sisma**



• Azione di taglio nel rivestimento definitivo [Nm] - Step Sisma



## 13 ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO

### 13.1 Rivestimento di prima fase – stato di fatto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase. Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del bottoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [16]. Le verifiche a taglio sono effettuate considerando la resistenza della sola centina metallica.

Come sottolineato nel paragrafo precedente le verifiche sono state effettuate utilizzando i valori di resistenza e di sollecitazione caratteristici.

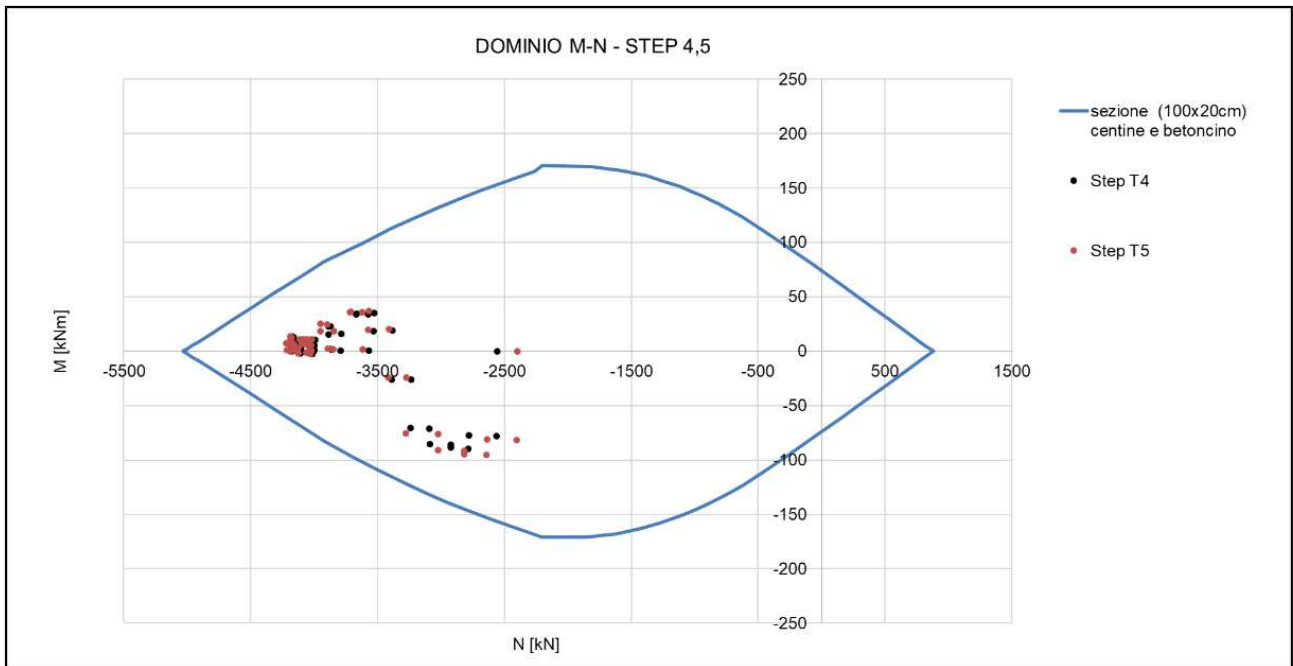
Rivestimento di prima fase – stato di fatto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C20/25
Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]	17.05
Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ]	13.00
Interasse [m]	-1
Classe di resistenza acciaio	S275

#### 13.1.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento di prima fase esistente sono svolte nelle seguenti condizioni:

- Step 4 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase allo stato di fatto (senza scavo dell'arco rovescio);
- Step 5 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase allo stato di fatto (con scavo dell'arco rovescio)

### 13.1.1.1 Verifiche a pressoflessione



### 13.1.1.2 Verifiche a taglio

La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni in acciaio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018.

Considerando la massima sollecitazione a taglio ottenuta dal modello, si ha:

$$V_{Ed} = 116.7 \text{ kN} < 196.5 \text{ kN} = V_{Rd}$$



### 13.2 Rivestimento definitivo - stato di fatto

Le verifiche a pressoflessione e a taglio sono effettuate sia con i parametri caratteristici, per verificare la validità della back-analysis, sia con parametri di progetto, per valutare la necessità di interventi di consolidamento. Al fine di categorizzare i risultati delle indagini laserscan effettuate lungo la galleria Guinza [12] le sollecitazioni sono verificate con tre domini di resistenza, corrispondenti ad uno spessore di calcestruzzo pari a 30 cm, 40 cm e 50 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo allo stato di fatto.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – stato di fatto	
Spessore cls [cm]	50/40/30
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

Rivestimento definitivo arco rovescio – stato di fatto	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

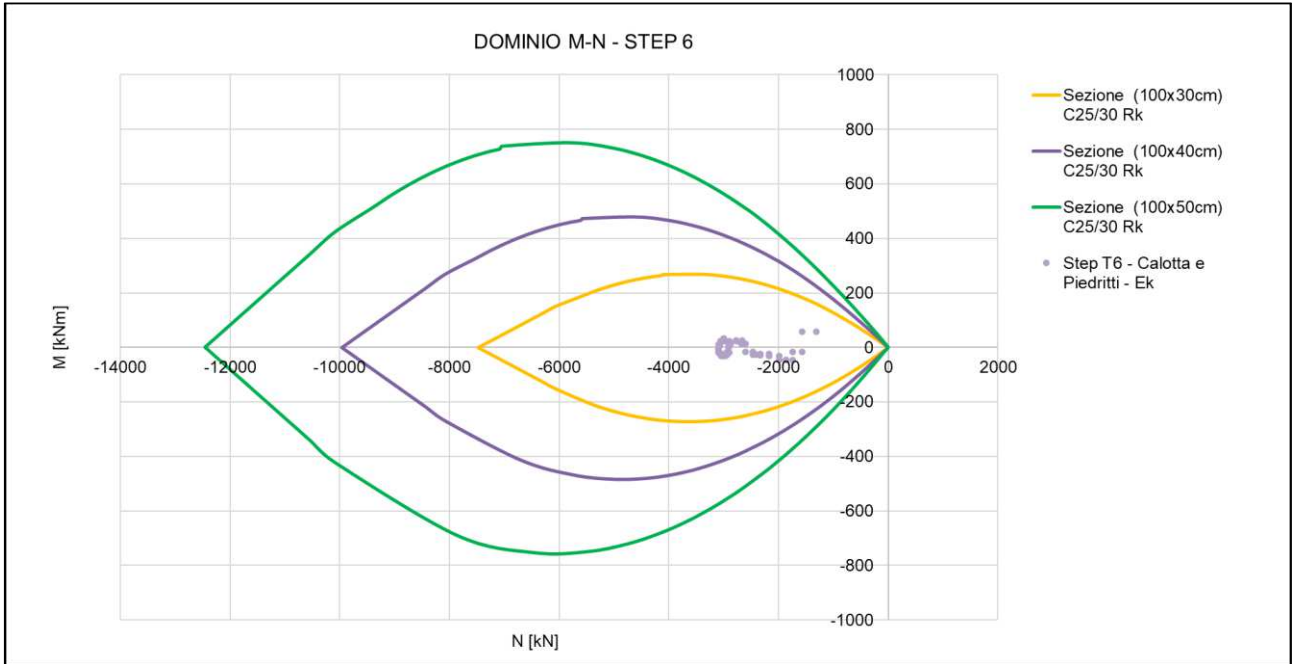
#### 13.2.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo esistente sono svolte nella seguente condizione:

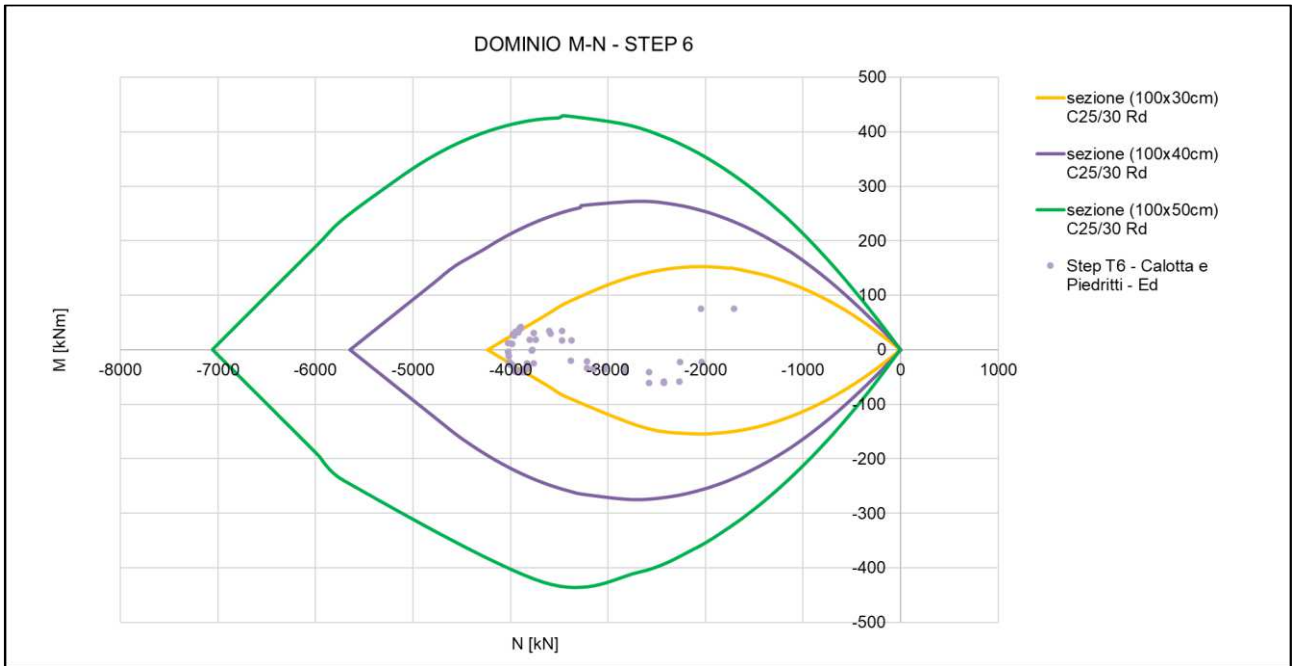
- Step 6 – Carico del terreno allo stato di fatto.

### 13.2.1.1 Verifiche a pressoflessione

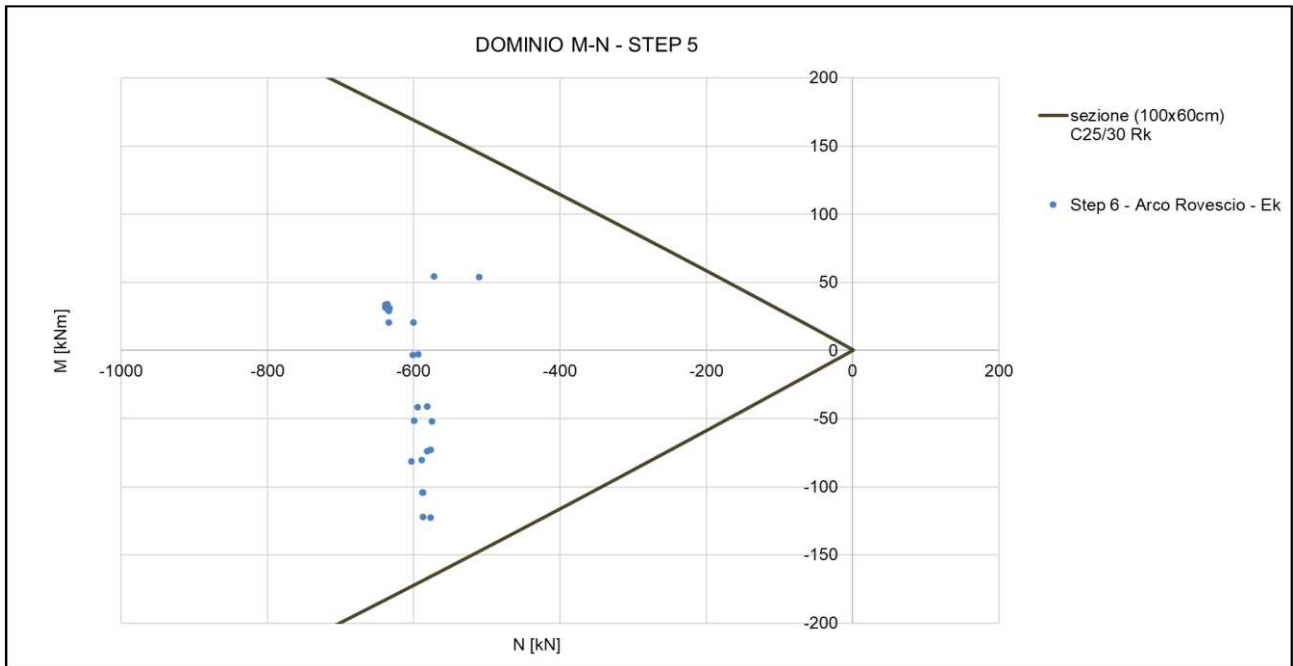
#### Calotta e piedritti, parametri caratteristici



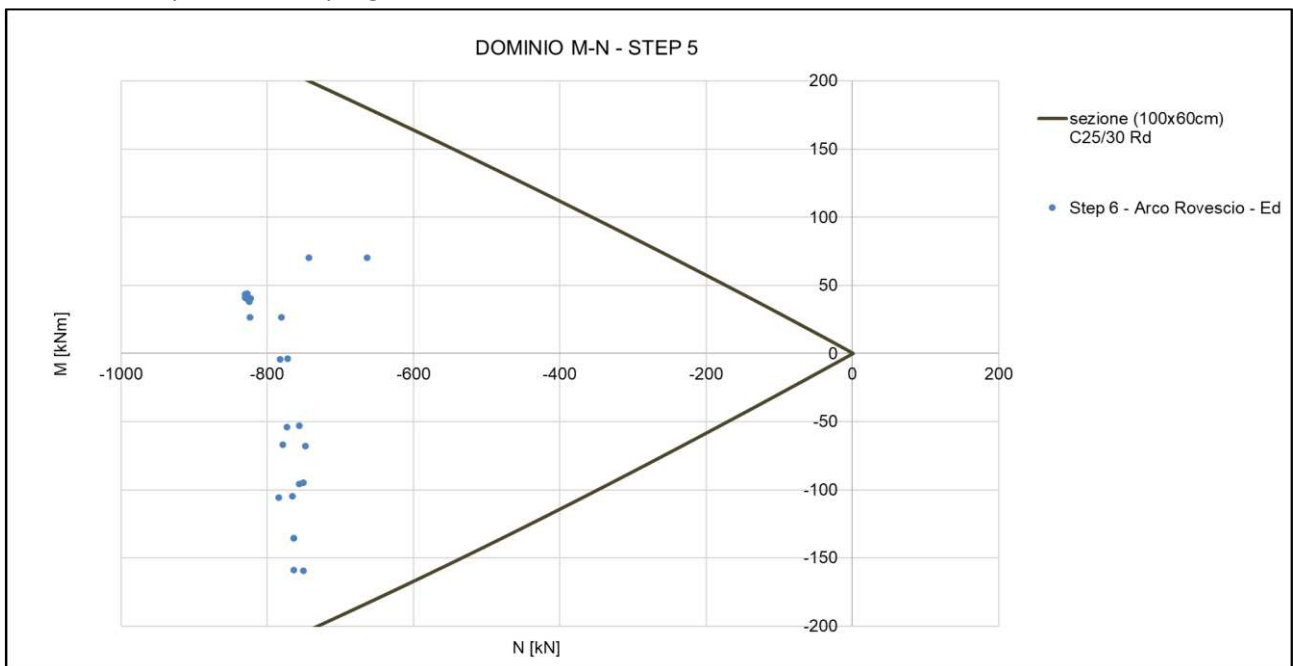
#### Calotta e piedritti, parametri di progetto



**Arco Rovescio, parametri caratteristici**



**Arco rovescio, parametri di progetto**



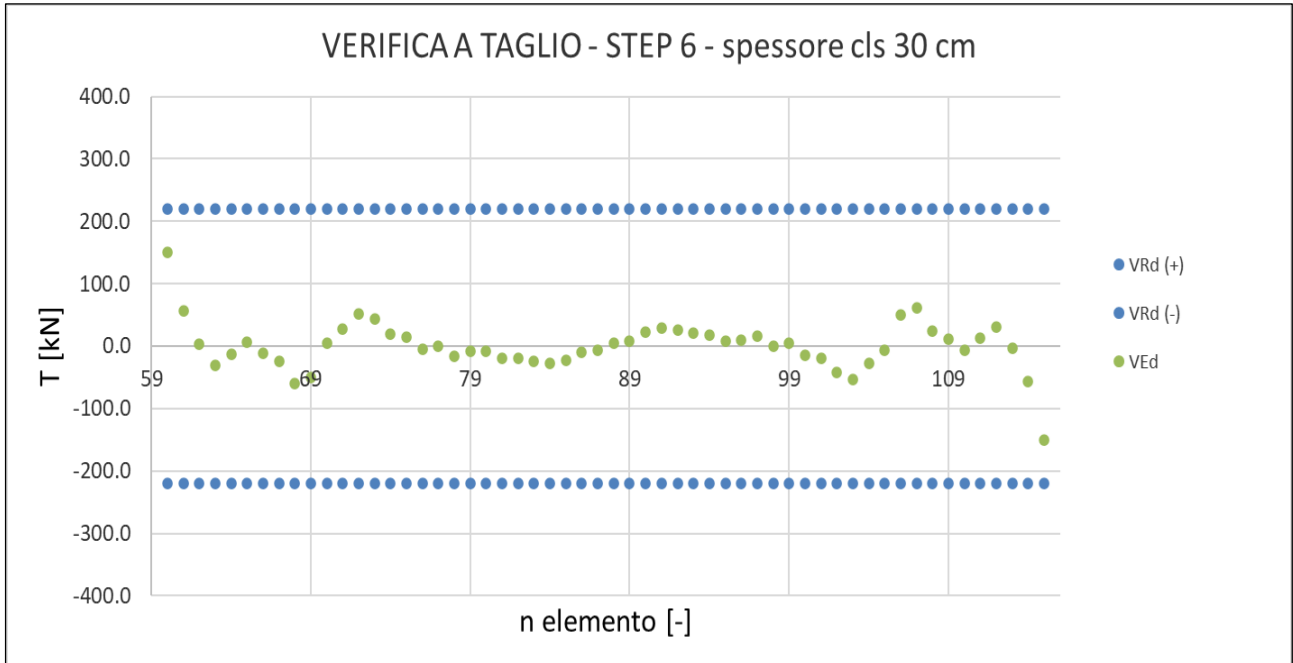
**13.2.1.2 Verifiche a taglio**

La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

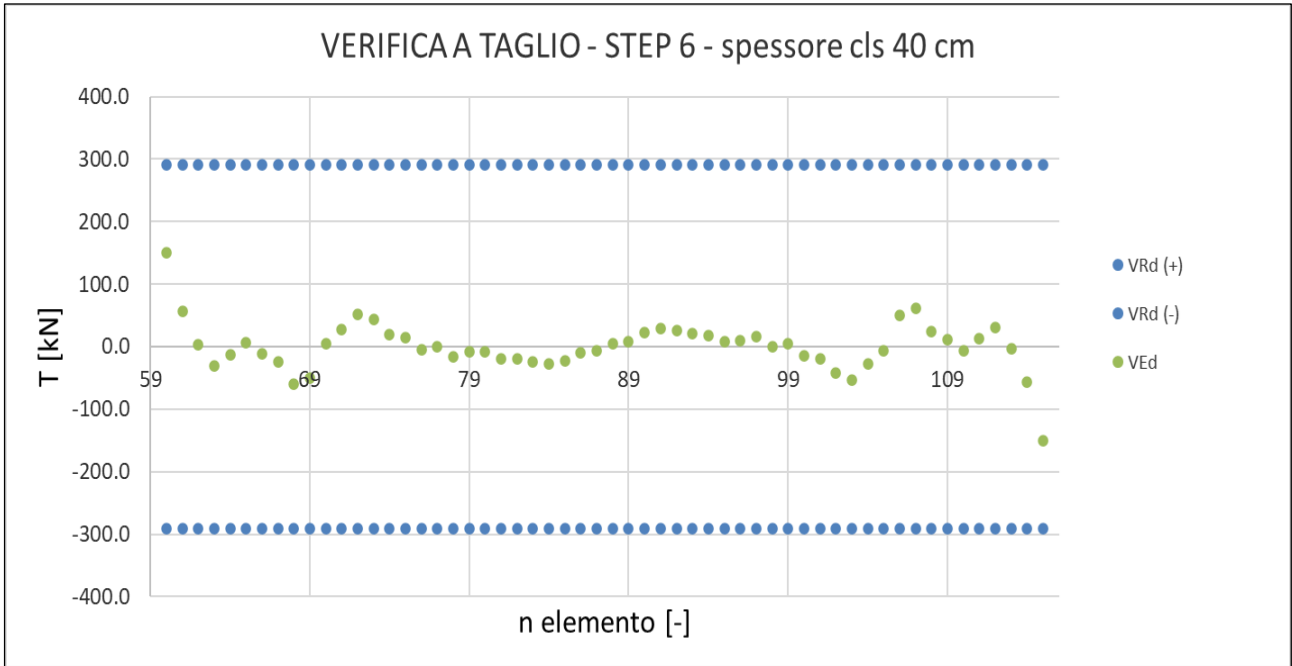
Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a taglio del rivestimento definitivo di calotta e arco rovescio. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate, il relativo valore di taglio.

Per brevità sono riportate esclusivamente le verifiche con i parametri di resistenza e di sollecitazione di progetto, riferiti a tre possibili spessori della calotta e dei piedritti (30 cm, 40 cm e 50 cm) e all'arco rovescio, di spessore costante pari a 60 cm.

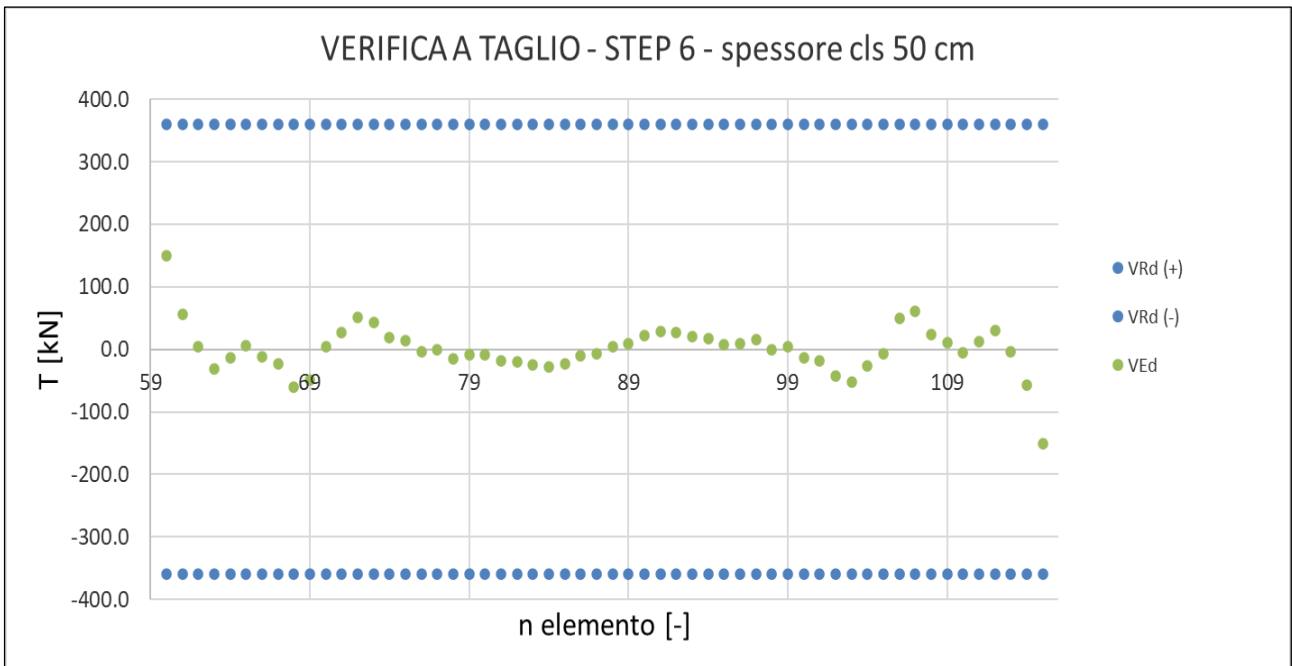
Calotta e piedritti, parametri di progetto



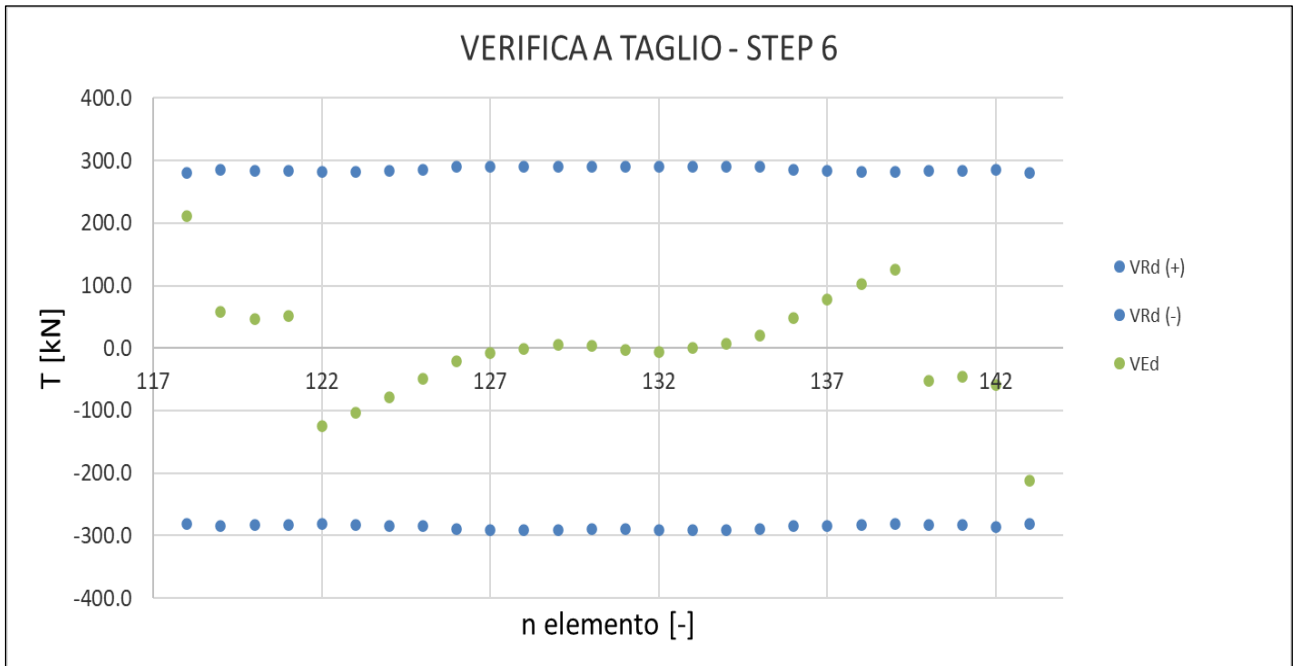
Calotta e piedritti, parametri di progetto



Calotta e piedritti, parametri di progetto



Arco rovescio, parametri di progetto



### 13.3 Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase. Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del bottoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [16]. Le verifiche a taglio sono effettuate considerando la resistenza della sola centina metallica.

Le verifiche sono state effettuate utilizzando i valori di resistenza e di sollecitazione di progetto.

Rivestimento di prima fase – configurazione di progetto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C25/30
Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]	14.06
Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ]	10.53
Interasse [m]	-1
Classe di resistenza acciaio	S275

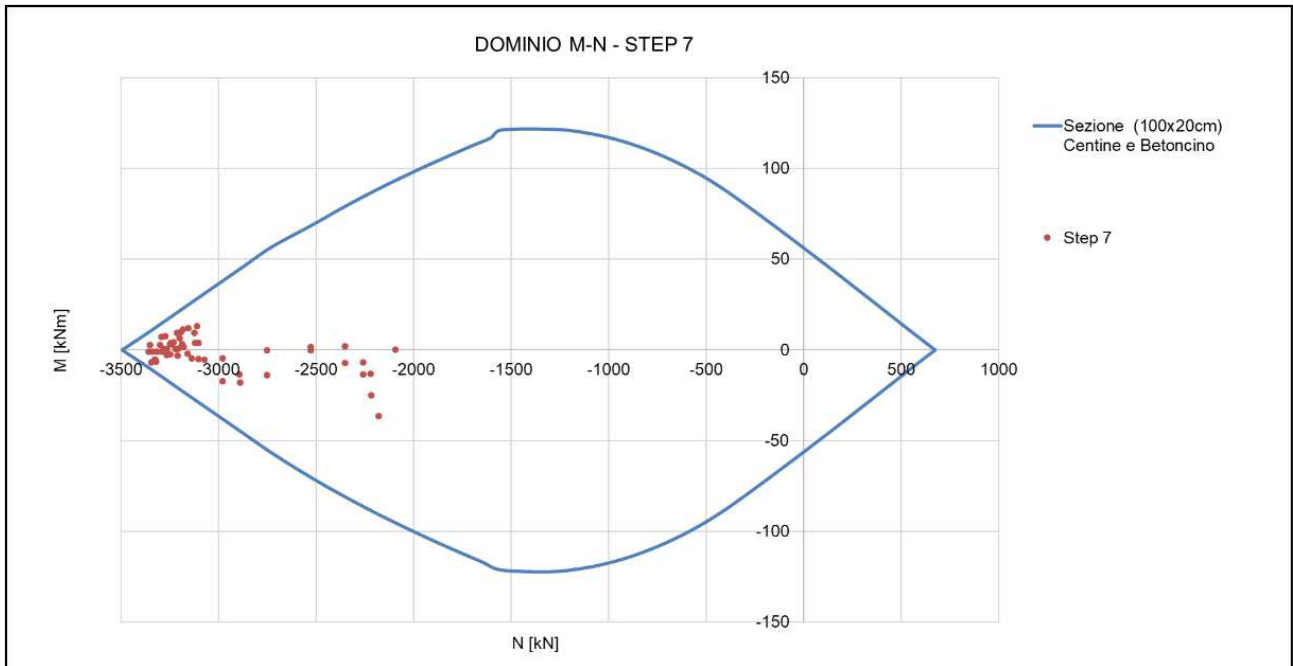
In questa fase la porzione di arco rovescio rimasta intatta durante la riprofilatura non viene verificata in quanto scollegata dai rivestimenti in calotta e quindi ritenuta completamente scarica al netto del peso proprio.

#### 13.3.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento di prima fase in esercizio sono svolte nelle seguenti condizioni:

- Step 7 – Rimozione del rivestimento definitivo a meno della porzione centrale di arco rovescio. Carico del terreno sul rivestimento di prima fase di progetto (betoncino armato con doppie centine IPN160 a passo 1 m).

### 13.3.1.1 Verifiche a pressoflessione



### 13.3.1.2 Verifiche a taglio

La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni in acciaio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018.

Considerando la massima sollecitazione a taglio ottenuta dal modello, si ha:

$$V_{Ed} = 51.9 \text{ kN} < 159.3 \text{ kN} = V_{Rd}$$



### 13.4 Rivestimento definitivo – configurazione di progetto

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo allo stato di fatto.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – configurazione di progetto	
Spessore cls [cm]	50
Classe di resistenza cls	C32/40
Armatura trasversale simmetrica	Φ20/20
Armatura a taglio	-
Ripartitori	Φ12/30

Rivestimento definitivo calotta e piedritti – configurazione di progetto	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C25/30
Armatura trasversale simmetrica	-
Armatura a taglio	-
Ripartitori	-

#### 13.4.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo esistente sono svolte nelle seguenti condizioni:

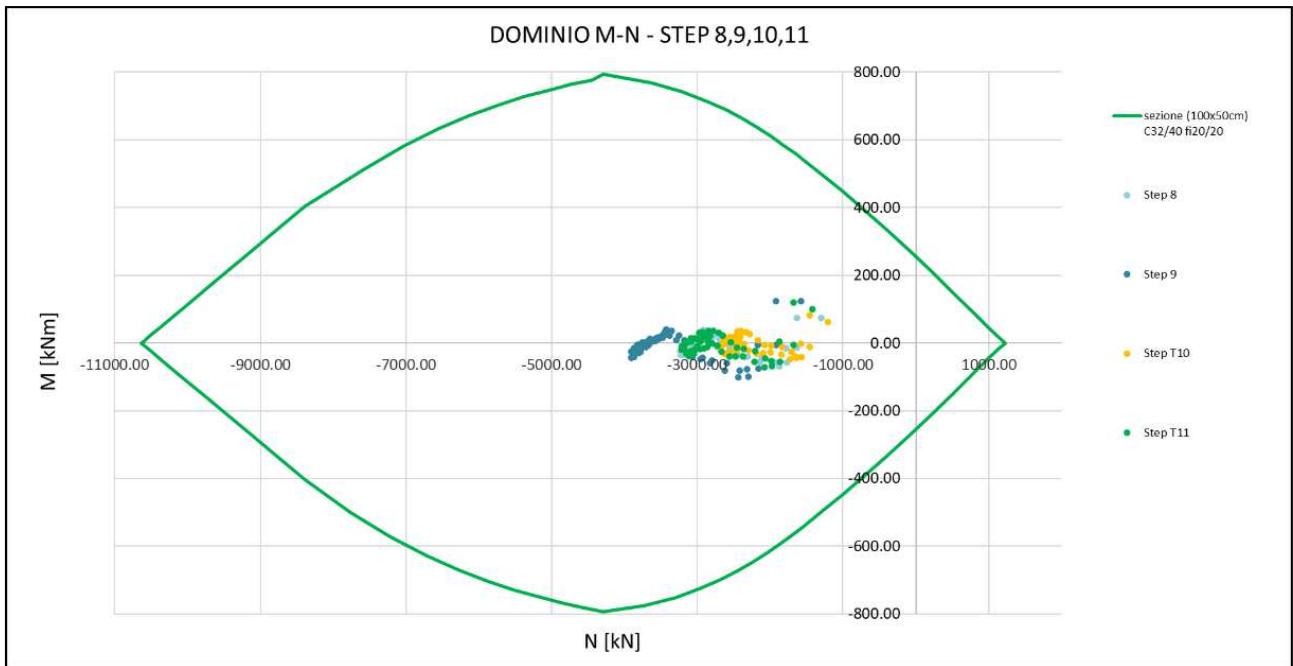
- Step 8 – Carico del terreno nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 9 – Carico del terreno + carico idraulico nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 10 – Condizioni presenti allo step 8 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica
- Step 11 – Condizioni presenti allo step 9 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica.

### 13.4.1.1 Verifiche a pressoflessione

Calotta

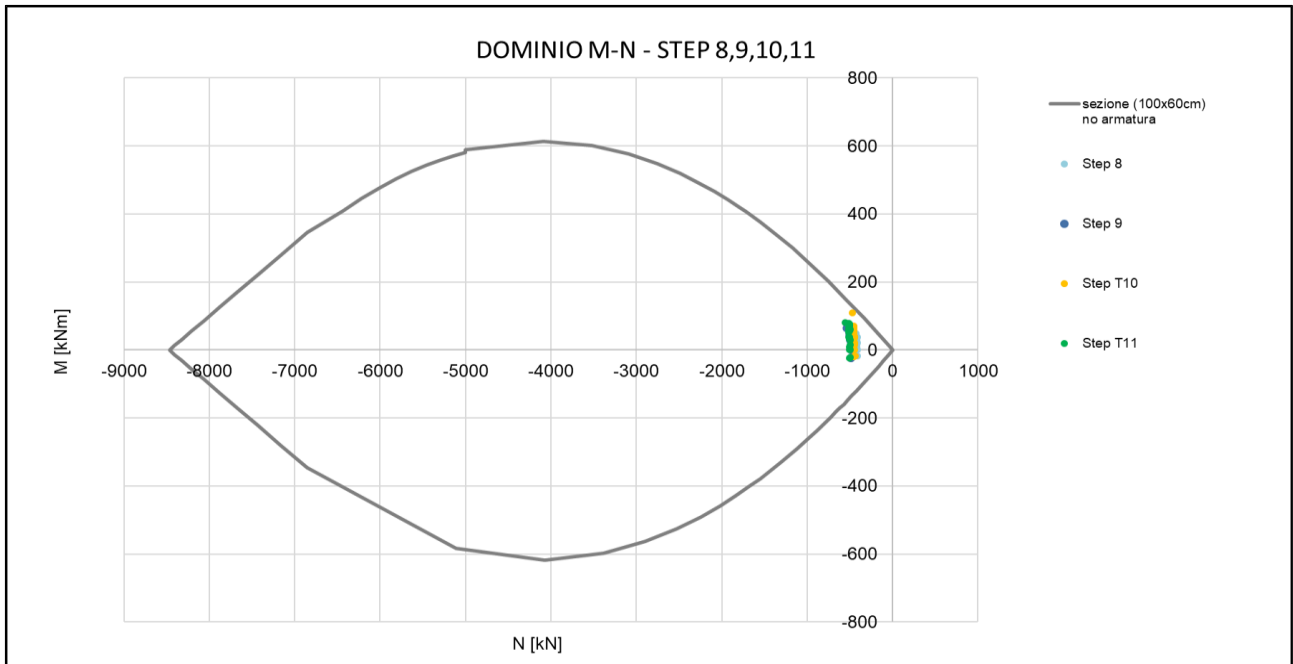
e

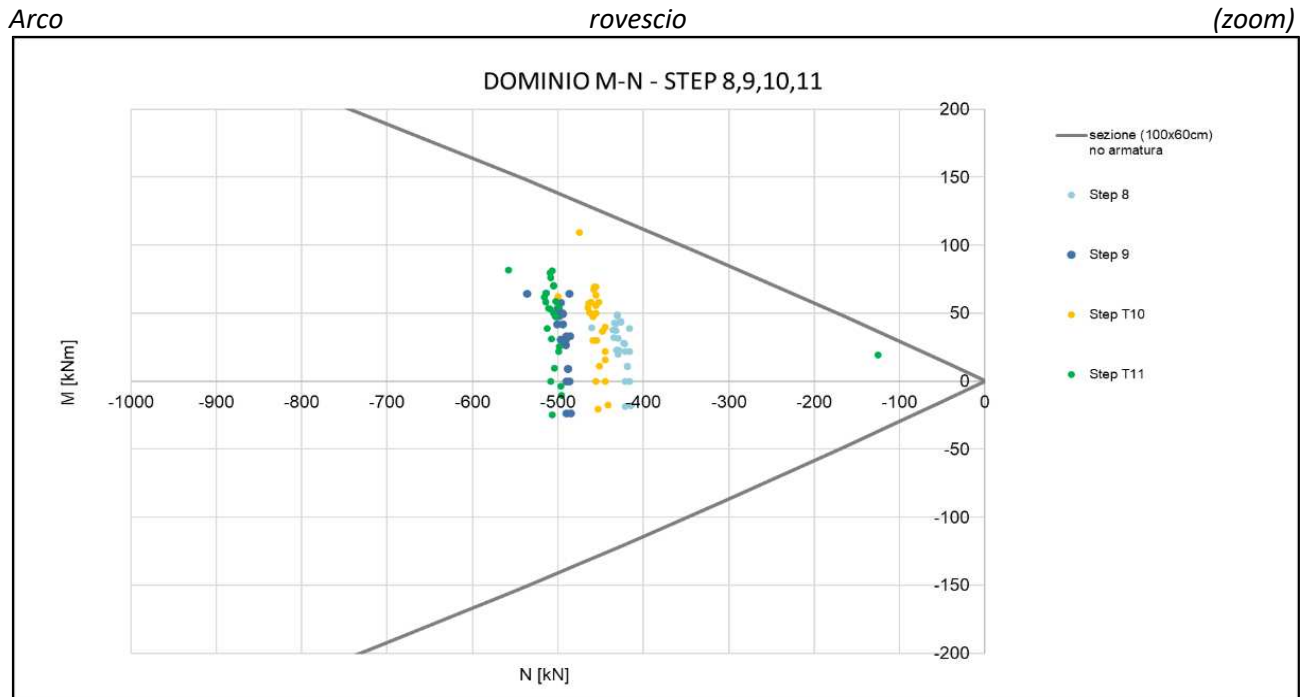
piedritti



Arco

rovescio



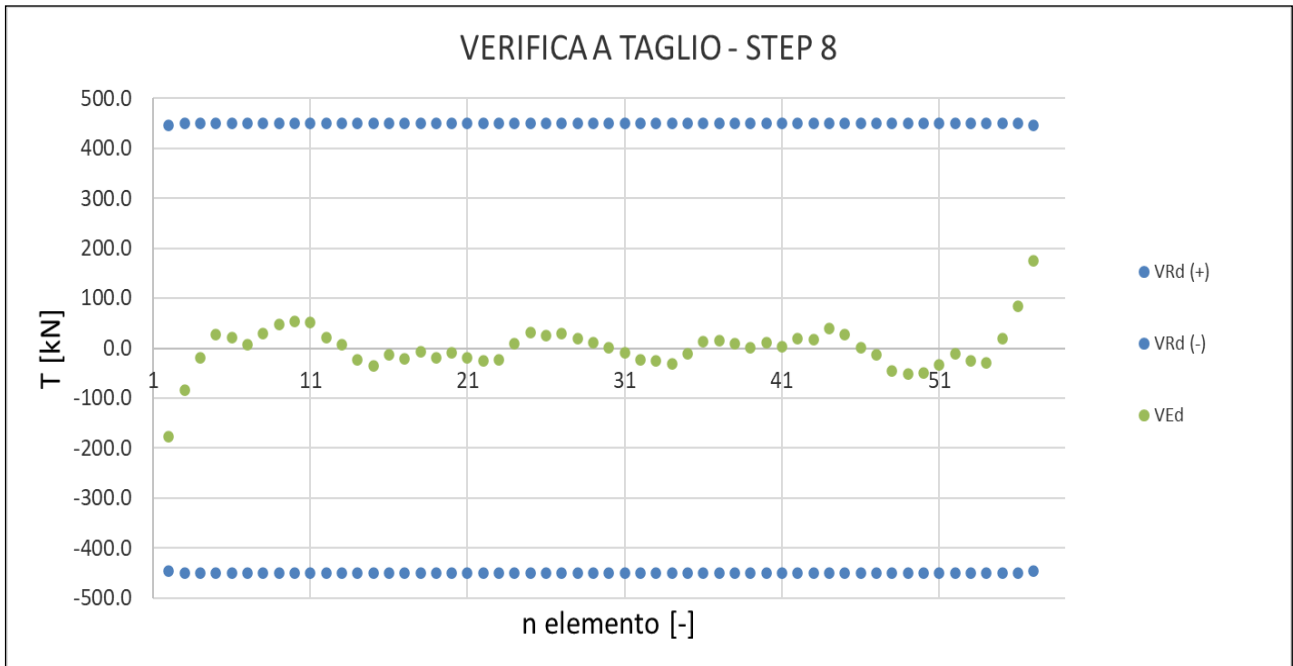


### 13.4.1.2 Verifiche a taglio

La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a taglio del rivestimento definitivo di calotta e arco rovescio. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate, il relativo valore di taglio.

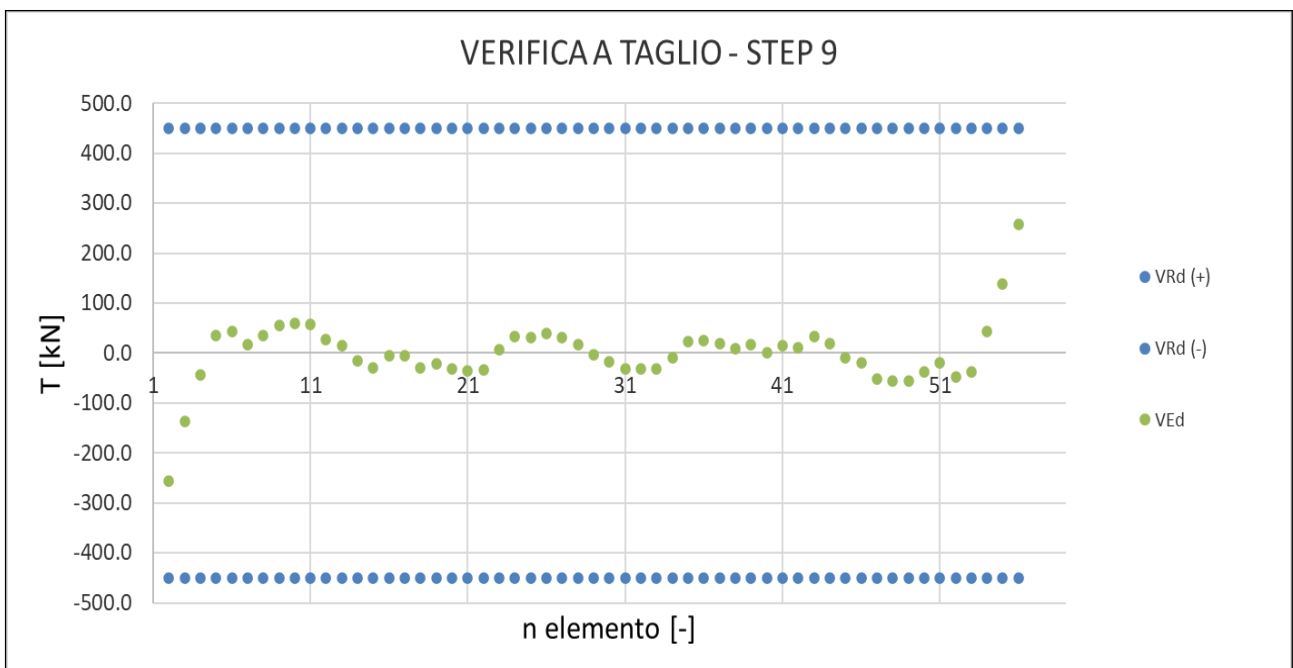
Calotta e piedritti



Calotta

e

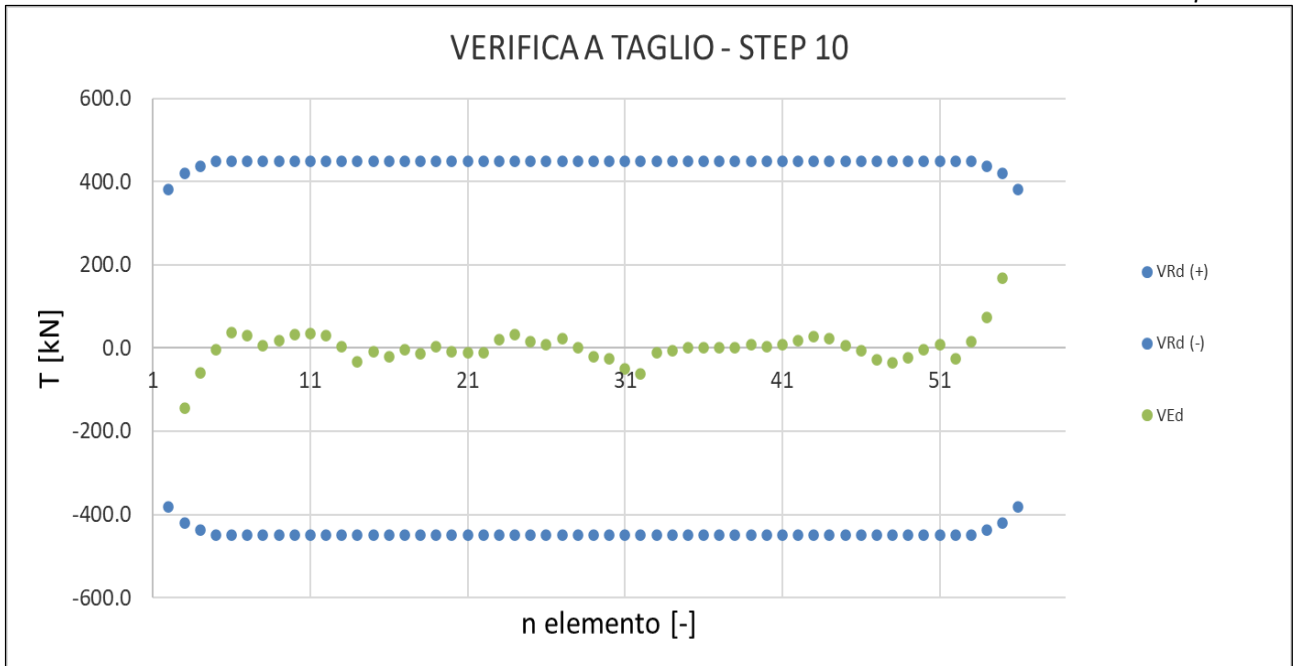
piedritti



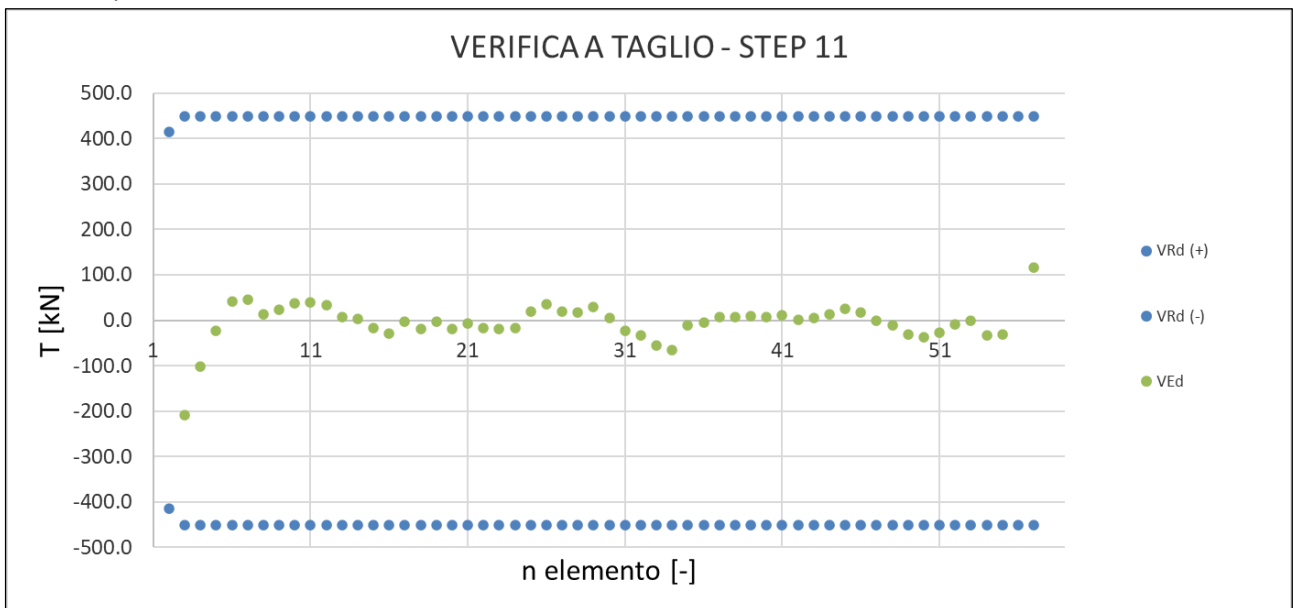
Calotta

e

piedritti

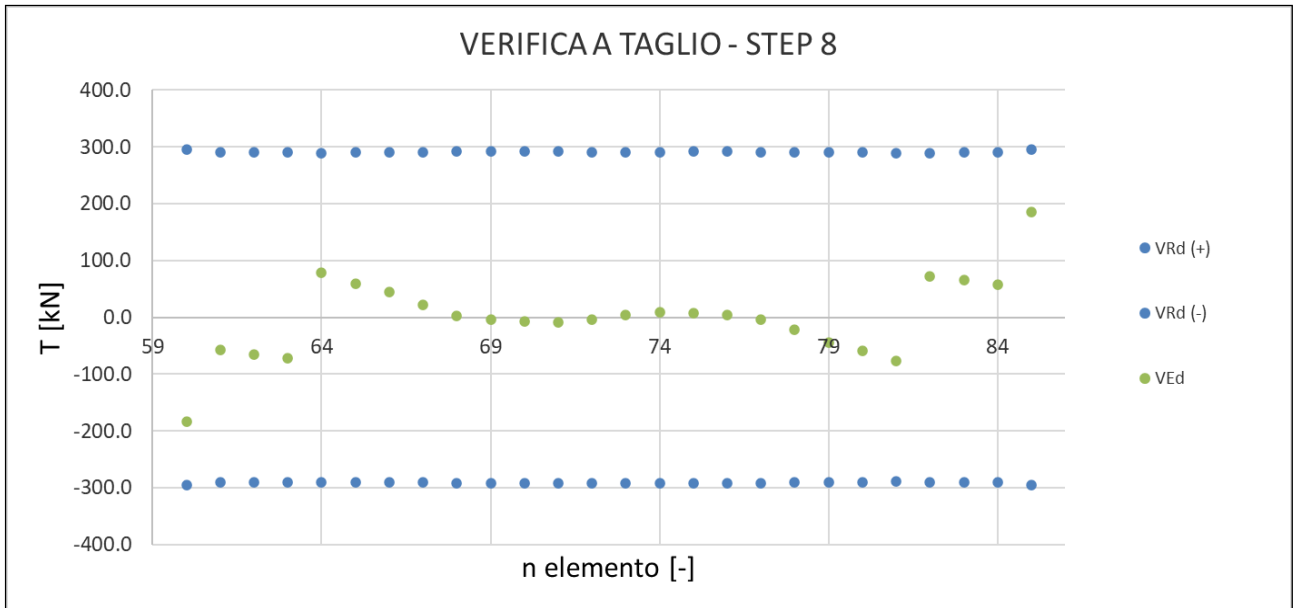


Calotta e piedritti



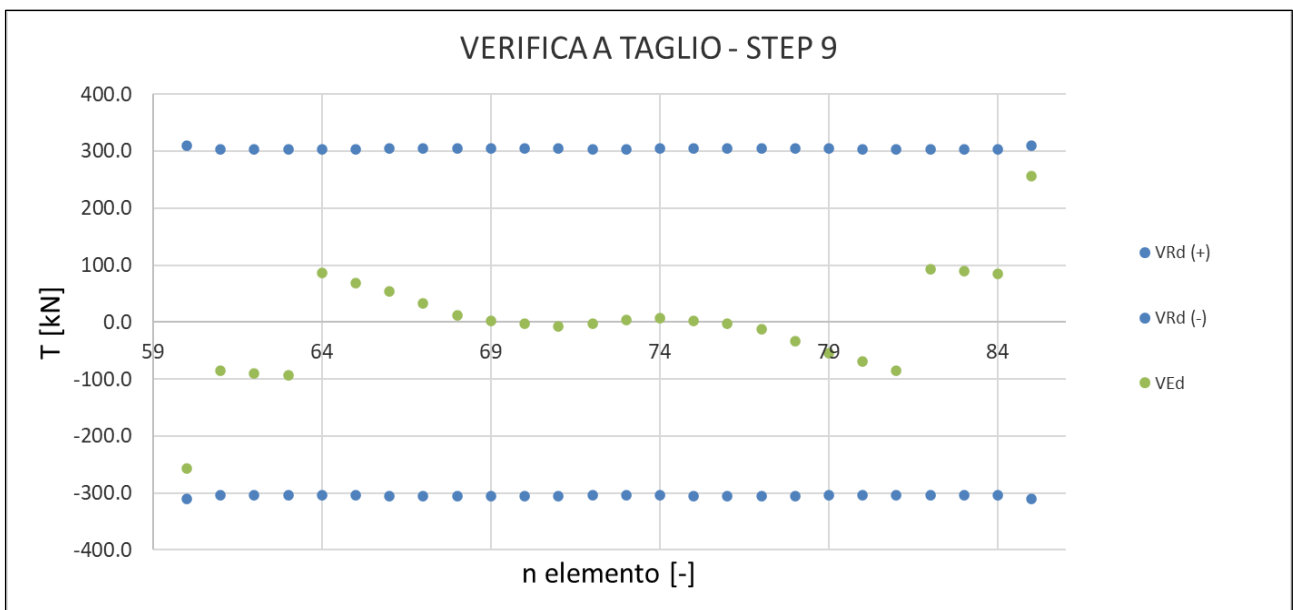
Arco

rovescio



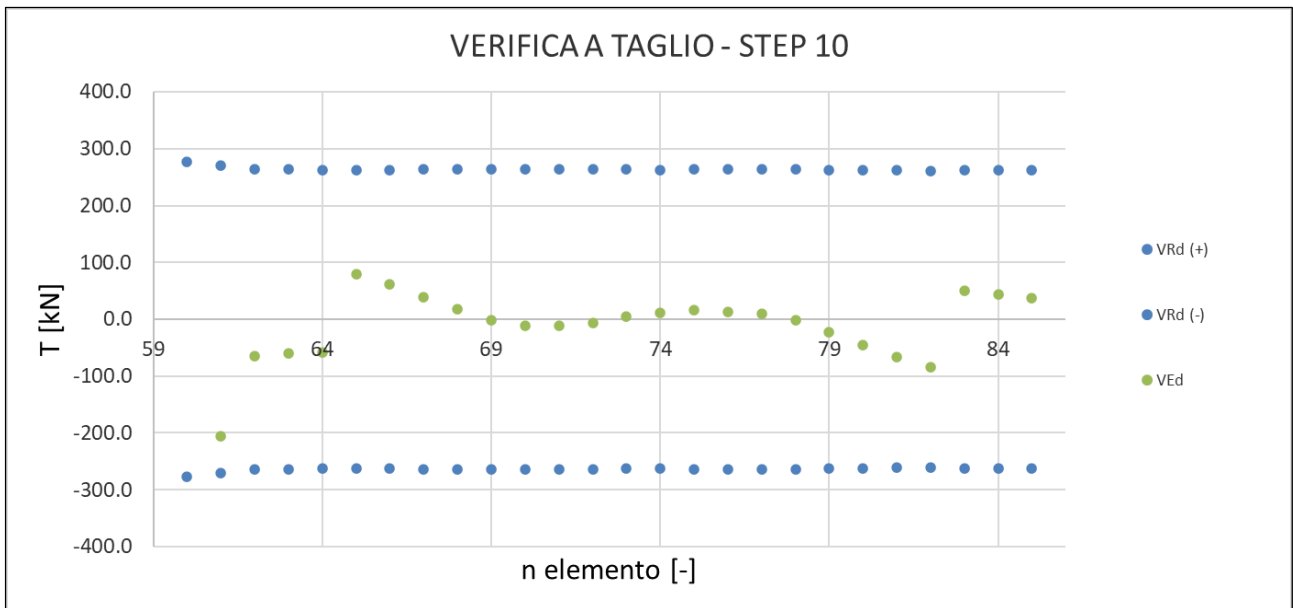
Arco

rovescio



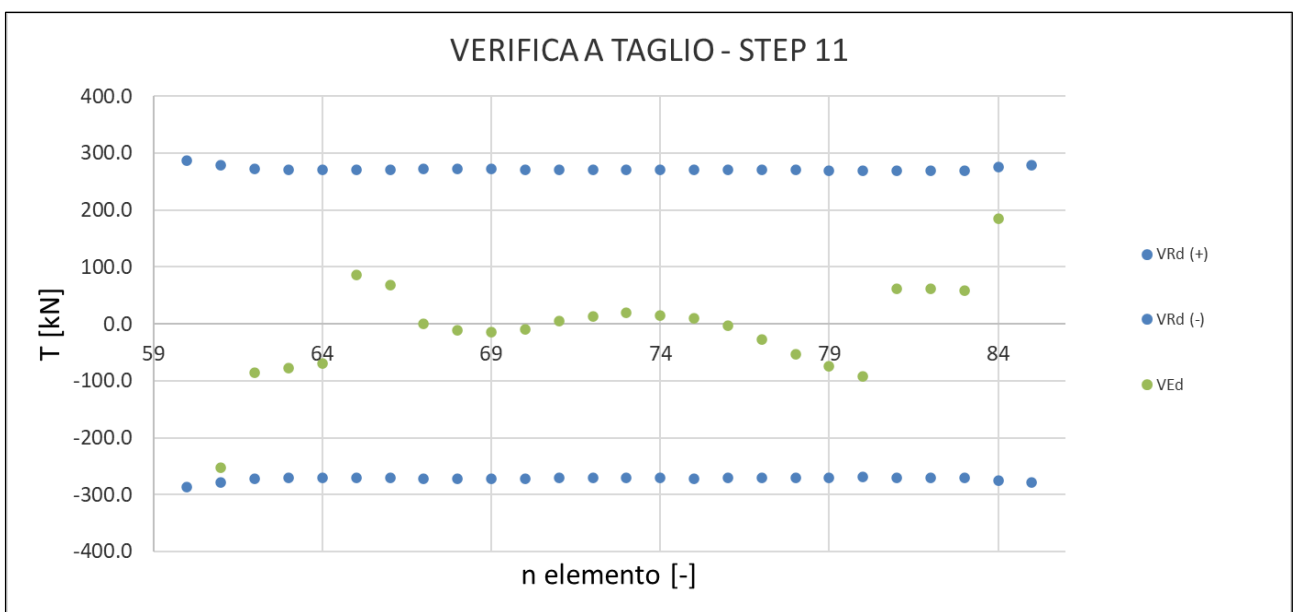
Arco

rovescio



Arco

rovescio



### 13.4.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Di seguito si riportano le verifiche a Stato Limite di Esercizio del rivestimento definitivo nelle seguenti condizioni:

- Step 8 – Carico del terreno nella configurazione definitiva di progetto;
- Step 9 – Carico del terreno + carico idraulico nella configurazione definitiva di progetto.

### 13.4.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC 2018. Si noti che per le sezioni dell'arco rovescio non armate la verifica viene eseguita solamente sul calcestruzzo; qualora l'intero elemento in calcestruzzo sia sottoposto a compressione il calcolo della sollecitazione massima viene effettuato in riferimento all'intera sezione del rivestimento, mentre nel caso in cui una porzione dell'elemento sia sottoposto a trazione si fa riferimento alla sezione parzializzata. In questo secondo caso il calcolo della sollecitazione massima avviene come segue

$$\sigma_{c,max} = \frac{2N}{3 \cdot u \cdot b}$$

Dove  $u = h/2 - e$  corrisponde alla lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia della sezione parzializzata mentre  $b$  allo spessore della sezione (1 m).

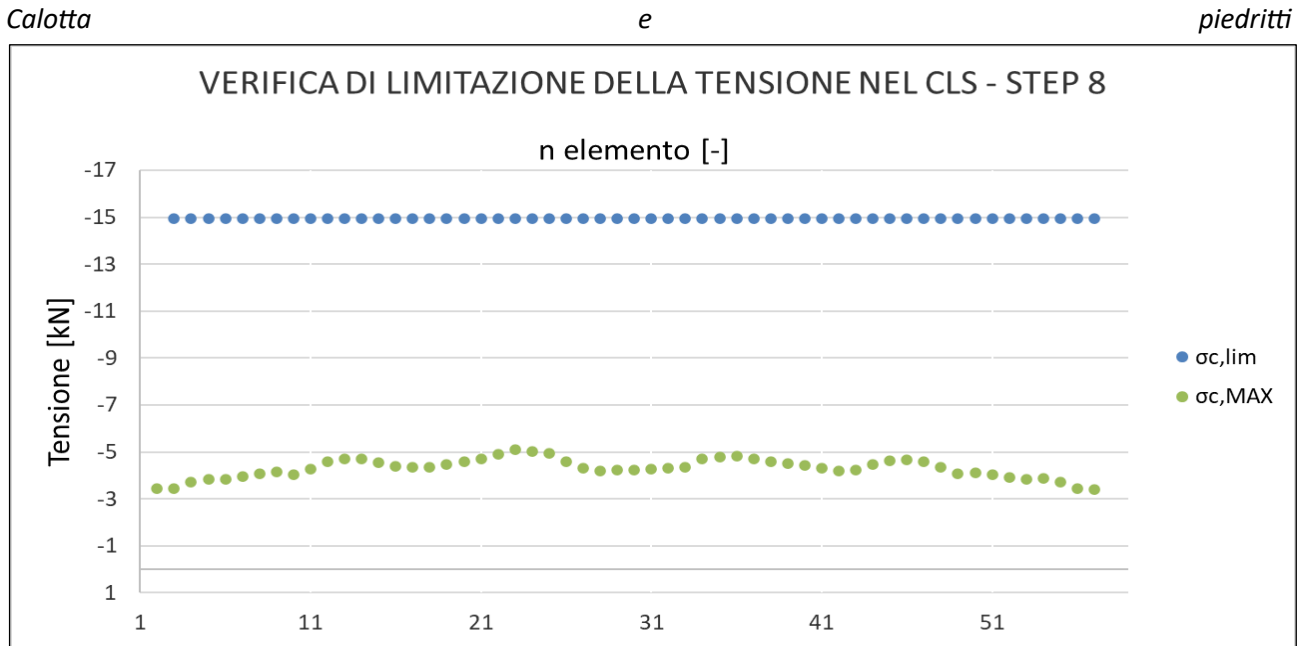
Affinchè la verifica di limitazione delle tensioni risulti soddisfatta, devono essere valide le seguenti disequazioni, rispettivamente per calotta e piedritti:

- $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 0.45 \cdot 0.83 \cdot 40 \text{ MPa} = 14.9 \text{ MPa}$
- $\sigma_{s,max} \leq 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 \text{ MPa} = 360 \text{ MPa}$

e per l'arco rovescio

- $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 0.45 \cdot 0.83 \cdot 30 \text{ MPa} = 11.2 \text{ MPa}$

Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a limitazione delle tensioni del rivestimento definitivo di calotta sia lato calcestruzzo che lato acciaio. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate il relativo valore di tensione.

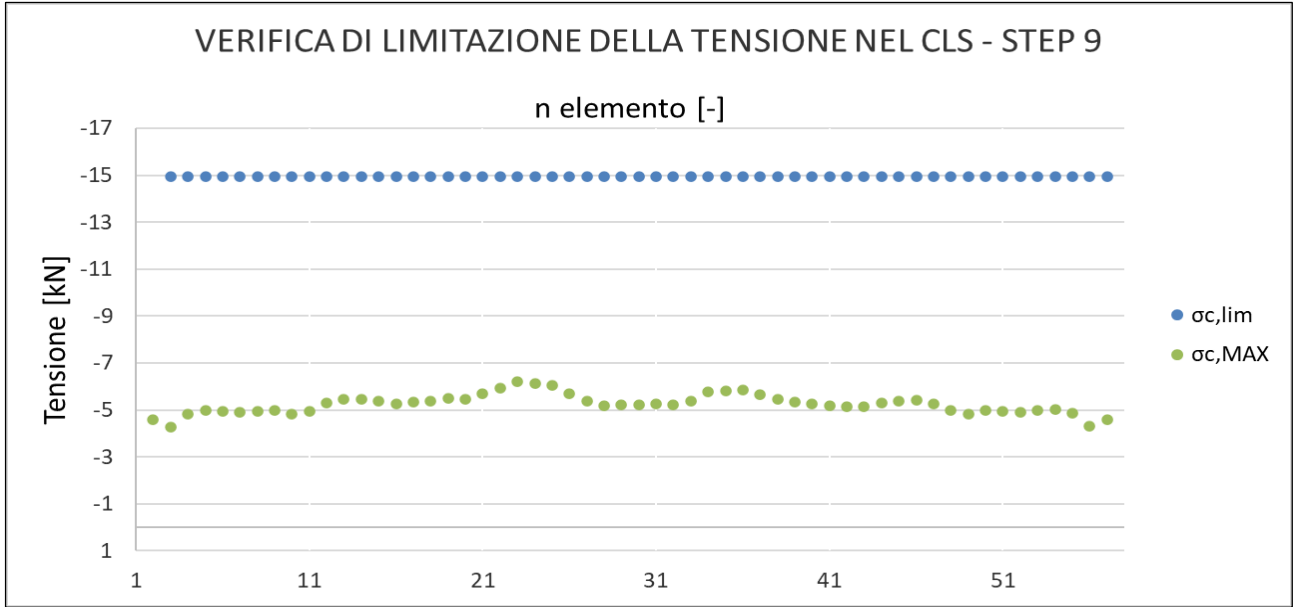




Calotta

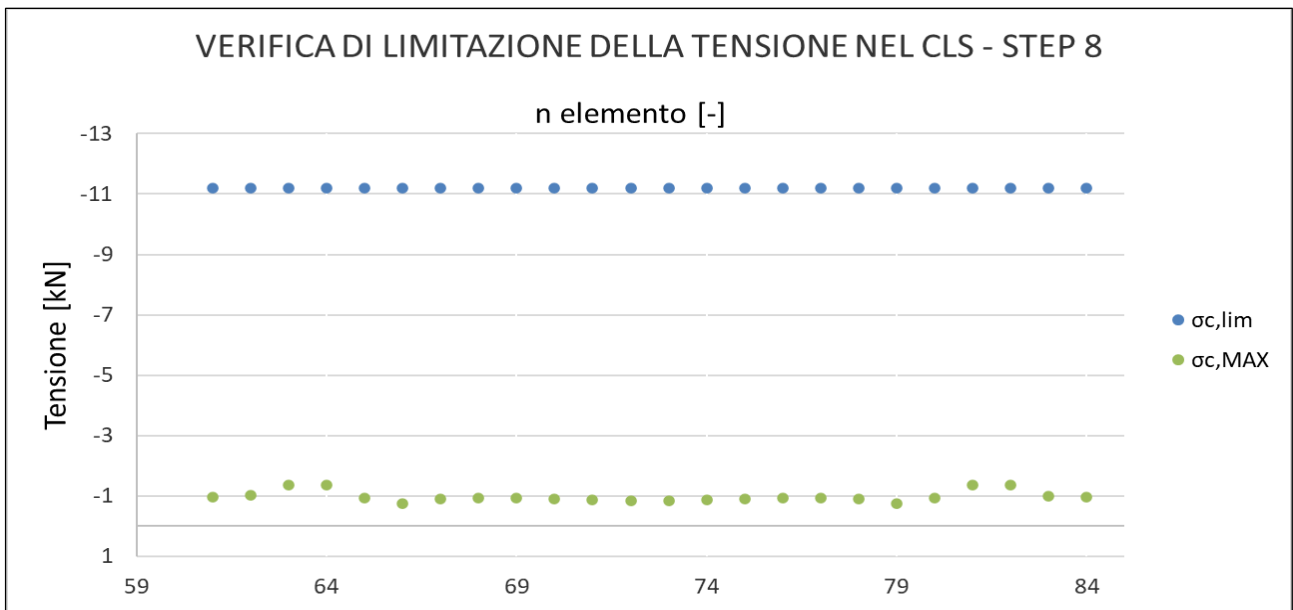
e

piedritti



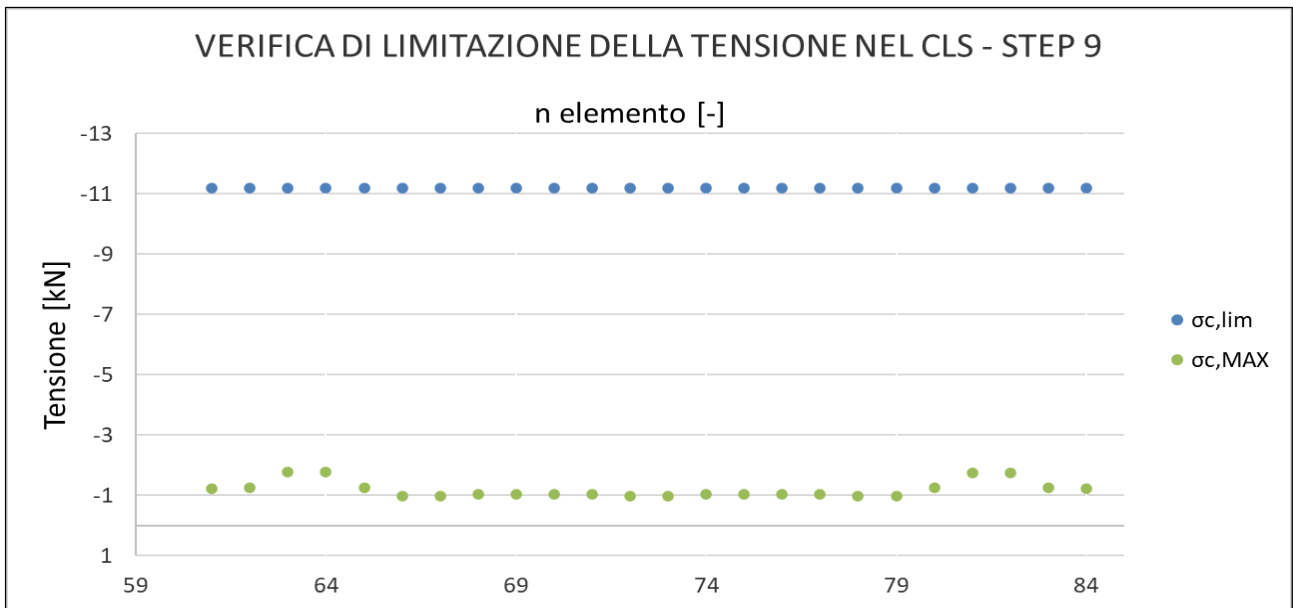
Arco

rovescio



Arco

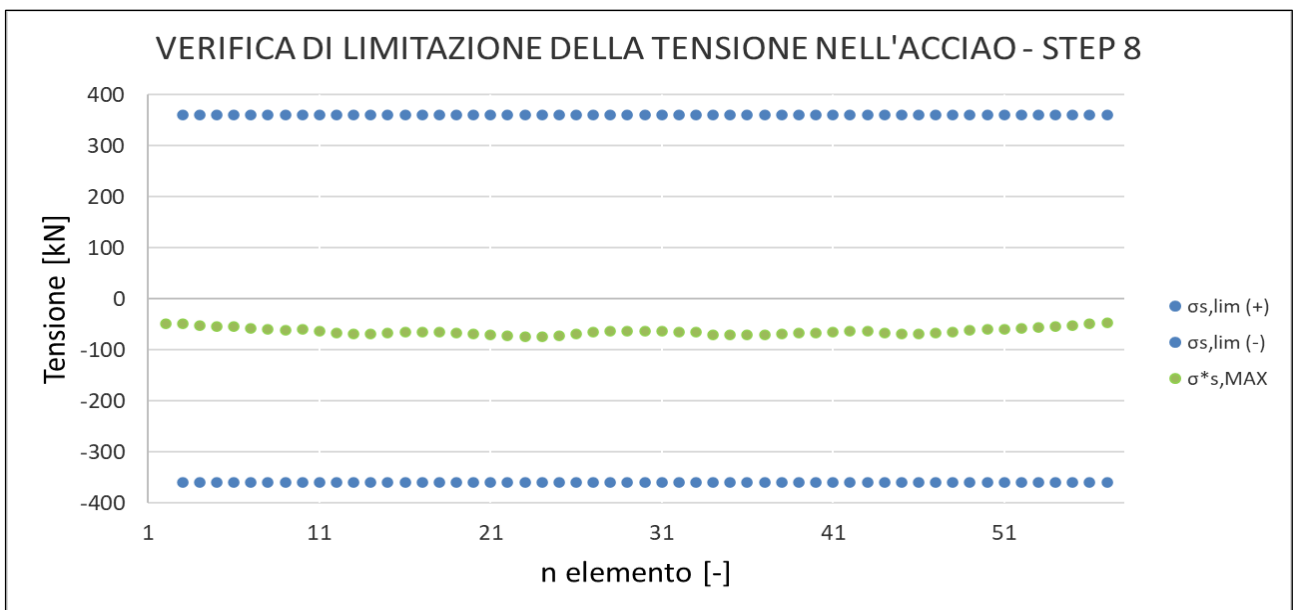
rovescio



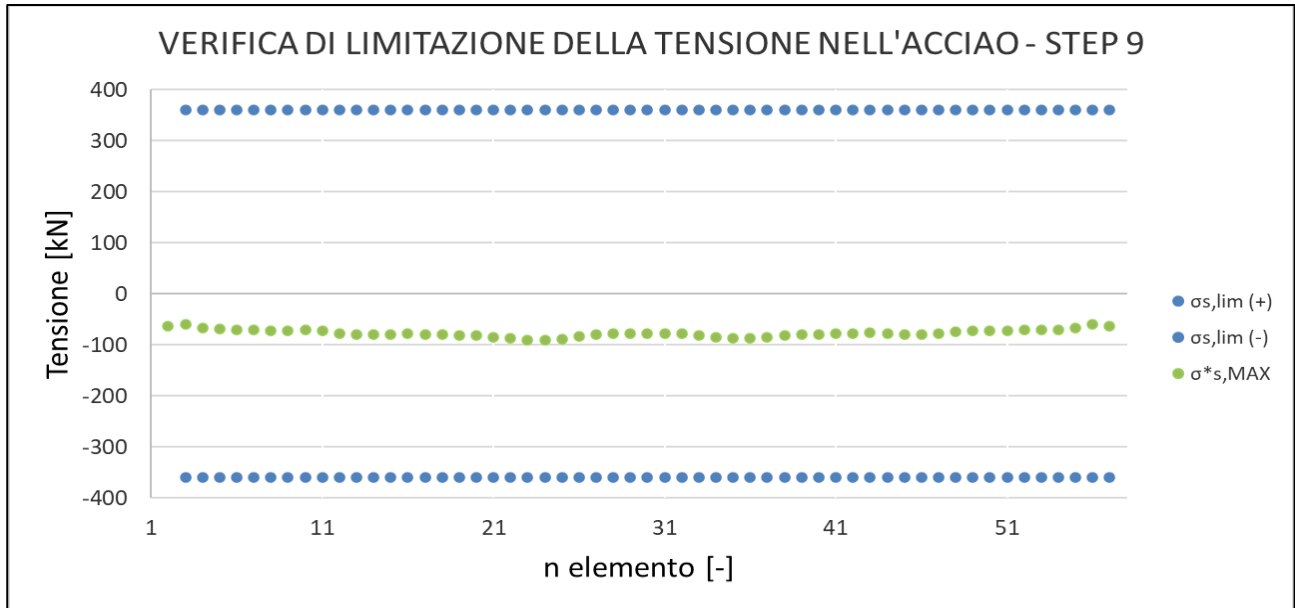
Calotta

e

pedritti



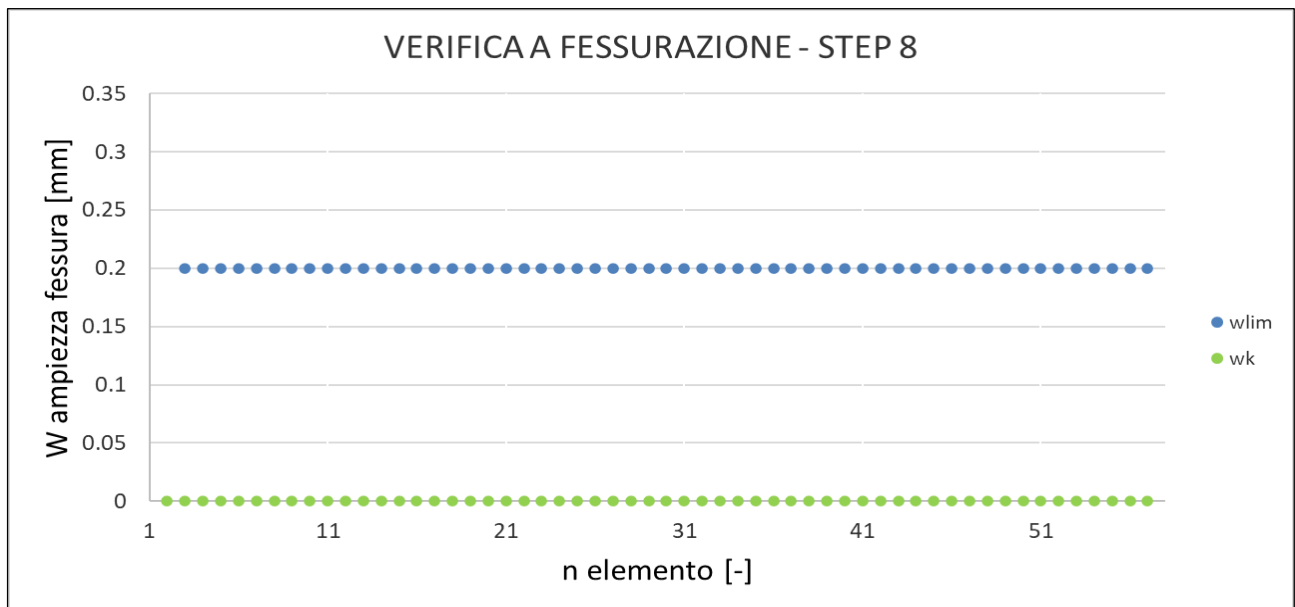
Calotta e pedritti

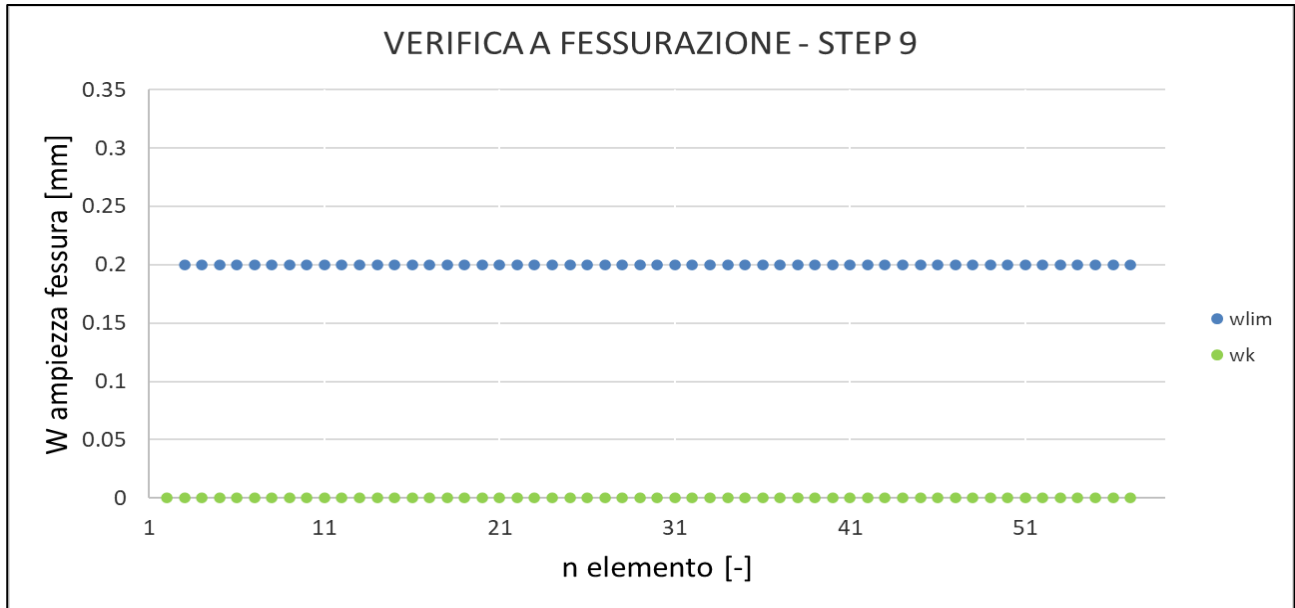


### 13.4.2.2 Verifica dello stato limite di fessurazione

Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle fessure nel rivestimento definitivo della galleria secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.4.5 delle NTC 2018. In particolare, tale verifica è stata effettuata considerando condizioni ambientali aggressive (secondo la Tabella 4.1.IV delle NTC 2018) e, pertanto, affinché risulti soddisfatta, l'ampiezza di calcolo delle fessure deve risultare inferiore a 0.2 mm.

Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a limitazione delle fessure del rivestimento definitivo di calotta. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate il relativo valore di ampiezza della fessura.





**RTP di progettazione:**

**Mandataria:**

**Mandanti:**

