

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 - Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m

CODICE PROGETTO			NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00GN01OSTRE03A.pdf			
L0702M	E	2101	T00GN01OSTRE03		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	3
2.1	Normativa	3
2.2	Documenti del Progetto Definitivo	3
2.3	Documenti del Progetto Esecutivo.....	3
2.4	Bibliografia.....	3
2.5	Programmi di calcolo	3
3	MATERIALI	4
3.1	Calcestruzzo per rivestimenti definitivi	4
3.2	Betoncino proiettato fibrorinforzato.....	4
3.3	Malta per la cementazione di infilaggi e ancoraggi	5
3.4	Acciaio per cemento armato tipo B450C	5
3.5	Acciaio per centine S275	5
3.6	Acciaio per infilaggi metallici S355	5
4	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA	6
5	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	7
6	FASI ESECUTIVE E DESCRIZIONE DELLA SEZIONE TIPO	8
6.1	Fasi esecutive	8
6.1.1	<i>Fase 1</i>	8
6.1.2	<i>Fase 2</i>	8
6.1.3	<i>Fase 3</i>	8
6.1.4	<i>Fase 4</i>	8
6.1.5	<i>Fase 5</i>	8
6.2	Sezione tipo di progetto	8
7	DESCRIZIONE DELL'ANALISI.....	10
7.1	Modello di calcolo	10
7.1.1	<i>Geometria</i>	10
7.1.2	<i>Materiali</i>	10
7.1.3	<i>Elementi strutturali</i>	11
7.2	Step di calcolo	14
7.3	Condizioni di carico sul rivestimento definitivo	15
7.3.1	<i>Carico idraulico</i>	15
7.3.2	<i>Applicazione del carico sismico</i>	15
7.4	Risultati	17
8	VERIFICHE DEI RIVESTIMENTI.....	19

Relazione di calcolo – Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m

RTP di progettazione:

Mandataria:



Mandanti:



8.1.1	Verifiche dei rivestimenti allo stato limite ultimo	19
8.1.1.1	Verifica a pressoflessione.....	19
8.1.1.2	Verifica a taglio.....	19
8.1.2	Verifiche a Stato Limite di Esercizio	19
8.1.2.1	Verifica di limitazione delle tensioni	19
8.1.2.2	Verifica dello stato limite di fessurazione	20
8.2	Rivestimento di prima fase.....	21
8.2.1	Verifiche a Stato Limite Ultimo	21
8.2.2	Risultati	21
8.3	Rivestimento definitivo	22
8.3.1	Verifiche a Stato Limite Ultimo	22
8.3.2	Verifiche a Stato Limite di Esercizio	22
8.3.3	Risultati	22
9	CONCLUSIONI	23
10	ELENCO ALLEGATI.....	24
11	ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE	25
12	ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL’ANALISI	27
13	ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLA SEZIONE TIPO	41
13.1	Rivestimento di prima fase.....	41
13.1.1	Verifiche a Stato Limite Ultimo	41
13.1.1.1	Verifiche a pressoflessione.....	41
13.1.1.2	Verifiche a taglio.....	42
13.2	Rivestimento definitivo	43
13.2.1	Verifiche a Stato Limite Ultimo	43
13.2.1.1	Verifiche a pressoflessione.....	44
13.2.1.2	Verifiche a taglio.....	45
13.2.2	Verifiche a Stato Limite di Esercizio	49
13.2.2.1	Verifica di limitazione delle tensioni	49
13.2.2.2	Verifica dello stato limite di fessurazione	54

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 di prima fase nonché dei rivestimenti definitivi della nicchia degli impianti posta alla progr. 2+777.59 m della Galleria naturale della Guinza.

La nicchia presenta una sezione interna di larghezza pari a circa 8.60 m e si estende per 16 m (di cui ca. 5.9 m già scavati) in direzione ortogonale, rispetto all'asse di tracciamento della galleria naturale.

Lo scavo della porzione rimanente avviene con geometria troncoconica e campi di avanzamento da 1 m garantendo il presostegno della calotta della galleria mediante infilaggi metallici. La cavità è sostenuta con un rivestimento di prima fase costituito da betoncino spruzzato fibrorinforzato e centine e attraverso un rivestimento definitivo di spessore variabile tra 40 – 110 cm. In Figura 1 sono riportati gli architettonici della sezione della nicchia impianti.

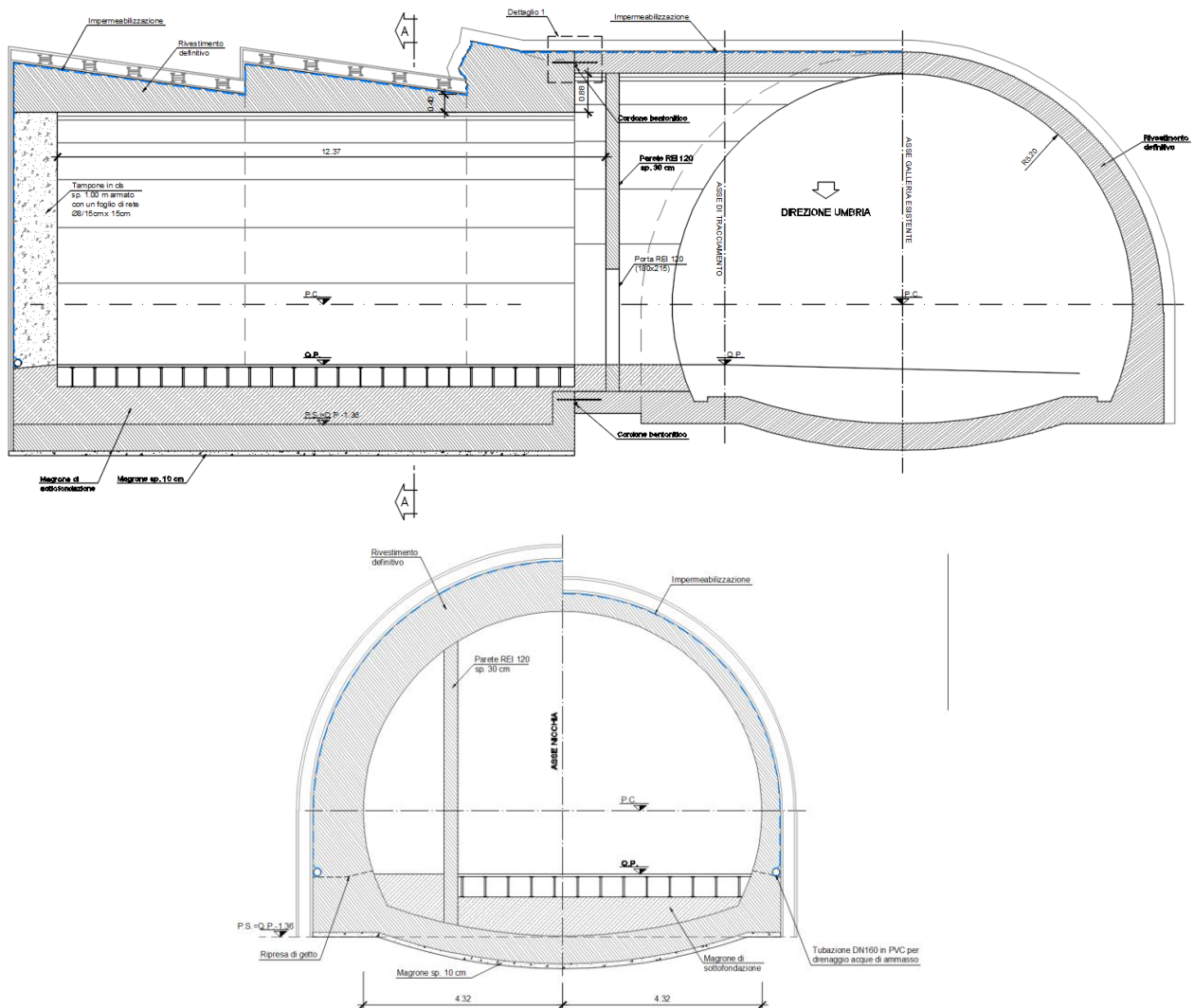


Figura 1 - Architettonici della nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m.

La galleria della Guinza 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 della nicchia è stata condotta

considerando i parametri relativi all'unità GA4, in accordo con il profilo geomeccanico di progetto (Paragrafo 4 e 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). Queste ultime hanno consentito di valutare lo stato tensio-deformativo dell'ammasso e le sollecitazioni nei rivestimenti in tutte le fasi realizzative dell'opera.

Per il dimensionamento del rivestimento definitivo (Paragrafo 8), 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.

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]. T00GN01OSTRE06B - Galleria Guinza – By-pass per impianti pr.2+777.59 - Relazione di calcolo
- [6]. T00GE00GETRE02B - Geotecnica – Relazione sismica

2.3 Documenti del Progetto Esecutivo

- [7]. T00GN01OSTFG02A – Galleria Guinza - Profilo geomeccanico - Tav. 2
- [8]. T00GN01OSTST10A – Galleria Guinza – Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m – Scavo e consolidamento
- [9]. T00GN01OSTCA01A – Galleria Guinza – Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m – Carpenteria
- [10]. T00GN01OSTAR04A – Galleria Guinza – Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m – Armatura
- [11]. T00GN01OSTRE01A – Galleria Guinza - Relazione di calcolo - Intervento Tipo A - Sezione corrente

2.4 Bibliografia

- [12]. 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.
- [13]. Itasca Consulting Group, Inc. (2019) FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.1. User's Manual. Minneapolis: Itasca.
- [14]. 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.
- [15]. 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 ³
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 ²
Resistenza caratteristica a compressione cilindrica	$f_{ck} =$	33.2	N/mm ²
Resistenza media a compressione cilindrica	$f_{cm} = f_{ck} + 8$	= 41.2	N/mm ²
Modulo elastico	$E_c = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3}$	= 33642.8	N/mm ²
Resistenza a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{2/3}$	= 3.1	N/mm ²
Resistenza a trazione caratteristica (frattile 5%)	$f_{ctk} = 0.70 \times f_{ctm}$	= 2.17	N/mm ²

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 ²
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C$	= 1.45	N/mm ²

Stato Limite di Esercizio

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

3.2 Betoncino proiettato fibrorinforzato

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

Resistenza caratteristica a compressione cubica	$R_{ck} =$	30	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 ²
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} =$	275.00	N/mm ²

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 ²

3.6 Acciaio per infilaggi metallici S355

Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} =$	510.00	N/mm ²
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} =$	355.00	N/mm ²

Stato Limite Ultimo

Coefficiente parziale di sicurezza	$\gamma_S =$	1.05	--
Resistenza a trazione di calcolo	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$	=	308.7 N/mm ²

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 dallo scavo della nicchia impianti sono principalmente l'unità GA4 (15% arenaria – 85% marna).

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: $D = 0.5$
- 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 " ϕ ") 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) [12].

Nella seguente tabella sono riportati i parametri geomeccanici adottati per il dimensionamento della sezione di scavo, ricavati considerando la profondità della galleria in corrispondenza della nicchia, pari a circa 230 m [7]:

Formazione	GSI	$\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$	ϕ'	ϕ'_{res}	$c' \text{ [kPa]}$	$c'_{res} \text{ [kPa]}$	$\nu \text{ [-]}$	$E_r \text{ [MPa]}$	K_0
G4	36	26	28.1	22.1	456	304	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_0 , T_c^* considerati nel caso in esame.

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	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.

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

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 DELLA SEZIONE TIPO

6.1 Fasi esecutive

Lo scavo della porzione rimanente avviene con geometria troncoconica e campi di avanzamento da 1 m garantendo il presostegno della calotta della galleria mediante infilaggi metallici. La cavità è sostenuta con un rivestimento di prima fase costituito da betoncino spruzzato fibrorinforzato e centine e attraverso un rivestimento definitivo di spessore variabile tra 40 – 110 cm. Maggiori dettagli sono contenuti nell'elaborato di riferimento [8].

6.1.1 Fase 1

- Messa in sicurezza del fronte della nicchia mediante l'esecuzione di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di 10 cm.

6.1.2 Fase 2

- Posa in opera degli interventi di presostegno mediante tubi in acciaio $\varnothing 127$ mm, L=9 m, valvolati.

6.1.3 Fase 3

- Scavo a piena sezione della nicchia per sfondi max pari a 1.0 m (ad eccezione dell'ultimo) ed esecuzione di un primo strato di betoncino proiettato fibrorinforzato sul contorno di spessore 5 cm;
- Posa in opera delle centine;
- Esecuzione di un secondo strato di betoncino proiettato fibrorinforzato sul contorno di spessore 25 cm;
- Esecuzione di uno strato di betoncino proiettato di regolarizzazione di spessore 5 cm.

6.1.4 Fase 4

- Scavo ed esecuzione del rivestimento definitivo in arco rovescio;
- Posa in opera del sistema di impermeabilizzazione in calotta;
- Esecuzione del rivestimento definitivo.

6.1.5 Fase 5

- Chiusura fronte con getto di un tampone di fondo in cls magro dello spessore di 1.00 m.
- Realizzazione rifiniture e parete REI120 di chiusura all'imbocco della nicchia, spessore 30 cm.

6.2 Sezione tipo di progetto

Lo scavo è previsto a piena sezione mediante mezzi meccanici, con sfondi di lunghezza 1.00 m e campi di lunghezza pari a 5.0 m circa. La sezione prevede i seguenti interventi:

- Eventuali 3+3 drenaggi in avanzamento, L=15m, sovrapp.=6m, rivestiti con calza TNT
- Intervento di presostegno del cavo mediante infilaggi metallici costituiti da 35 tubi $\Phi 127$ in acciaio S355 spessore 10mm, L=9m, sovrapposizione minima 3.5m, valvolati (1V/m) cementati in foro con miscele cementizie;
- Rivestimento di prima fase composto da 5+25 cm di betoncino proiettato C25/30 fibrorinforzato mediante fibre di vetro (35 kg/m^3) armato con doppie centine IPN200 in acciaio S275 a passo 1.00 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 arco rovescio, spessore 60 cm (C32/40), gettato una volta terminati i due campi di scavo
- Rivestimento definitivo in calotta, spessore variabile da 40 a 110 cm (C32/40), gettato una volta terminati i due campi di scavo

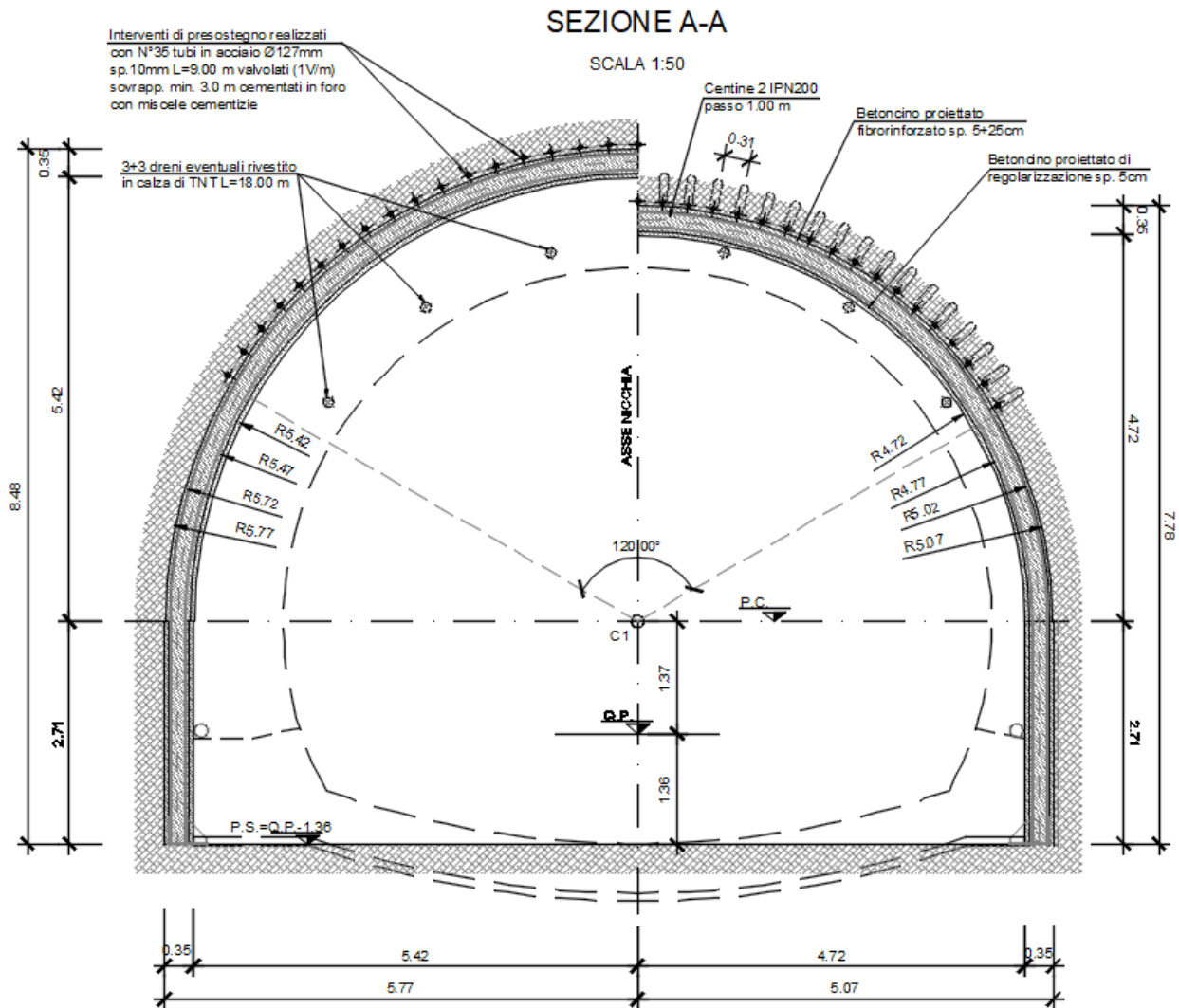


Figura 2 - Sezione di scavo della nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m [8].

7 DESCRIZIONE DELL'ANALISI

Nel seguito del presente capitolo sono riportati:

- la descrizione del modello di calcolo adottato per lo svolgimento delle analisi FDM 2D (geometria del modello 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 Modello di calcolo

7.1.1 Geometria

Come già osservato nell'introduzione, la massima distanza tra la calotta e il piano campagna è pari a 230 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;

k0 = 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 (230 m) e l'altezza del modello riferita al piano dei centri (100 m)

La geometria della sezione di scavo corrisponde alla sezione media lungo lo sviluppo della troncoconica.

7.1.2 Materiali

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 ϕ), 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 ϕ_p , c_p , che tali parametri decrescano in funzione dell'aumentare della deformazione plastica fino al raggiungimento dei corrispettivi valori residui

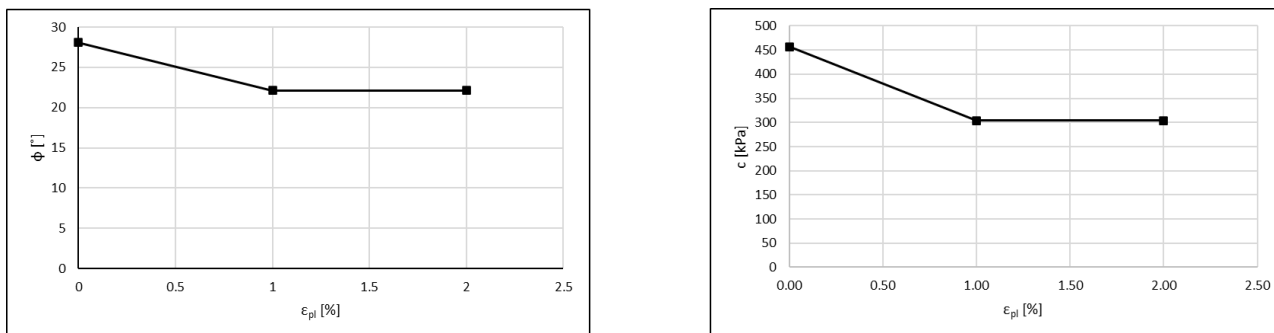


Figura 3 - Andamento qualitativo dei valori dei parametri di resistenza dell'ammasso in funzione della deformazione plastica

7.1.3 Elementi strutturali

Poiché nelle fasi finali di progettazione sono state effettuate alcune modifiche alle fasi di scavo e alla carpenteria della nicchia, il modello di calcolo differisce in alcuni aspetti dalla sezione tipo di progetto. Trattandosi tutte di modifiche migliorative in termini di risposta dei rivestimenti alle deformazioni dell'ammasso, si ritiene ammissibile mantenere il modello di calcolo numerico sviluppato in precedenza.

Di seguito in tabella sono riportate le caratteristiche della sezione tipo come da modello numerico e come da progetto

		MODELLO NUMERICO	PROGETTO ESECUTIVO
Scavo	L sfondo	1.2 m	1.0 m
Consolidamento	Presostegno	-	N. 35 infilaggi $\phi 127$ in acciaio S355 sp. 10mm, L=9m, sovrapp.=3.5m
	Betoncino proiettato fibrorinforzato	Betoncino proiettato fibrorinforzato C25/30 5+25 cm	Betoncino proiettato fibrorinforzato C25/30 5+25 cm
	Betoncino proiettato di regolarizzazione	-	Betoncino proiettato C25/30 5 cm
	Centine	2 IPN200 S275 / 1.2 m	2 IPN200 S275 / 1.0 m
Rivestimento definitivo	Riv. definitivo AR	C32/40 sp. 60 cm	C32/40 sp. 60 cm
	Armatura AR	-	$\phi 20/25$
	Riv. definitivo calotta	C32/40 (sp. 30 - 100 cm)	C32/40 (sp. 40 - 110 cm)
	Armatura calotta	-	$\phi 20/25$
	Ripartitori	-	$\phi 10/25$
	Spilli	-	$\phi 10/50 \times 50$

Figura 4 - Caratteristiche della sezione tipo nel modello numerico e di progetto [9][10]

Il rivestimento di prima fase è modellato 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.

Il rivestimento definitivo è costituito da elementi strutturali di tipo beam connessi alla griglia mediante interfaccia attritiva. In accordo con il modello di calcolo per il dimensionamento degli interventi di consolidamento [11], in calotta e piedritti sono assegnati all'interfaccia parametri di resistenza dimezzati rispetto a quelli dell'ammasso roccioso ($c_{int}=c/2$, $\phi_{int}=\phi/2$) mentre nell'arco rovescio all'interfaccia è assegnata coesione nulla ($c_{int}=0$, $\phi_{int}=\phi/2$).

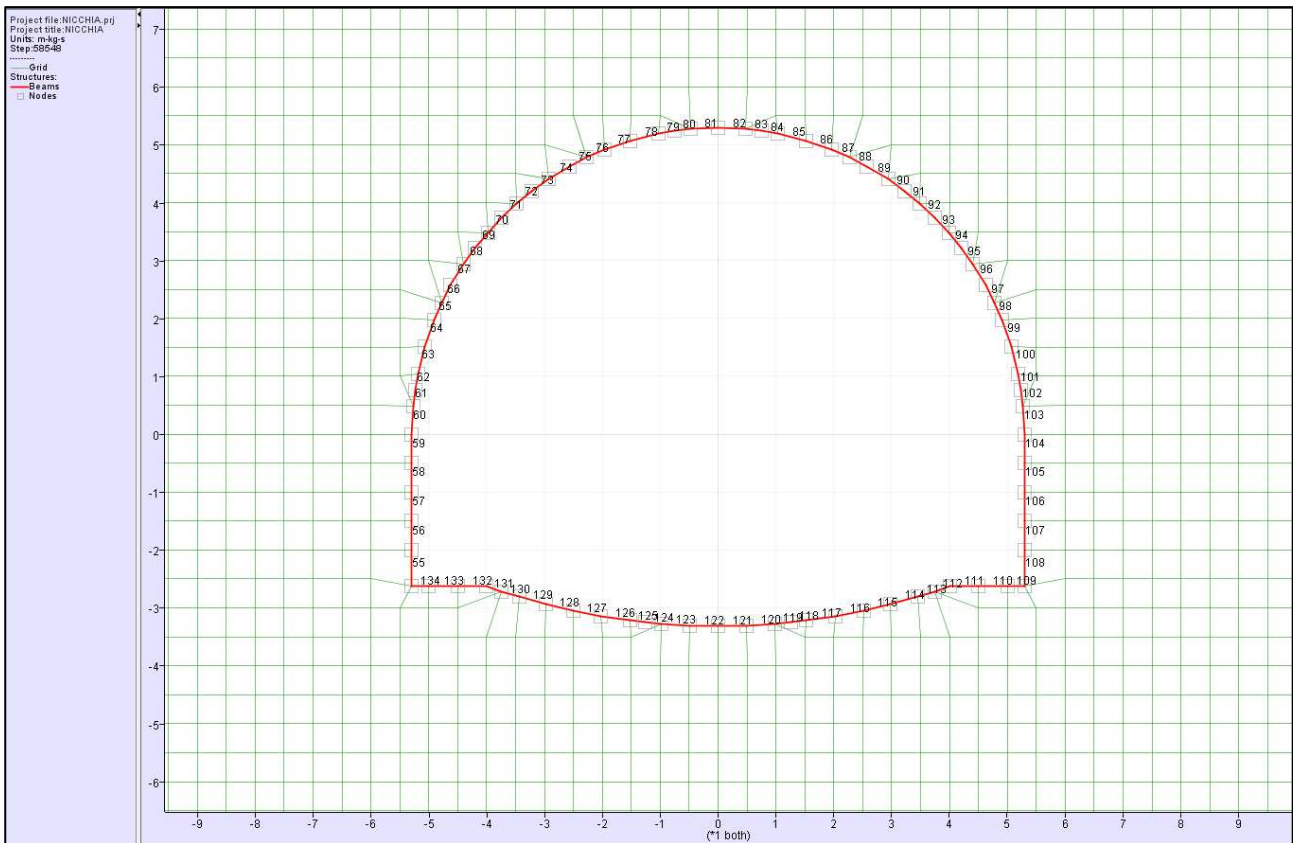


Figura 5 – Numerazione degli elementi beam

Il rivestimento definitivo è inserito nel modello assumendo uno spessore di 65 cm, pari a quello medio lungo lo sviluppo della sezione troncoconica.

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 [13].

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

Nelle seguenti tabelle sono riportati i parametri utilizzati nel programma di calcolo per schematizzare, il rivestimento di prima fase (centine e sezione mista) e i rivestimenti definitivi nelle varie sezioni all'interno dell'analisi FDM 2D.

Rivestimento di prima fase – Sezione mista	
Densità betoncino [kg/m ³]	2500
Modulo elastico betoncino [GPa]	32.8
A rivestimento 1° fase equivalente [m ²]	0.336
J rivestimento 1° fase equivalente [m ⁴]	0.00236
h rivestimento 1° fase equivalente [m]	0.336
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in calotta	
Densità cls [kg/m ³]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	35
A rivestimento definitivo [m ²]	0.65
J rivestimento definitivo [m ⁴]	0.0229
h rivestimento definitivo [m]	0.65
v betoncino	0.2

Rivestimento definitivo in arco rovescio	
Densità cls [kg/m ³]	2500
Modulo elastico cls [GPa]	35
A rivestimento definitivo [m ²]	0.6
J rivestimento definitivo [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 nelle analisi della sezione corrente:

0. Condizioni iniziali geostatiche, con successivo annullamento degli spostamenti e delle deformazioni avvenute nel terreno.
1. Realizzazione dello scavo della nicchia e riduzione attraverso step delle Forze Fittizie di Scavo (FFS) fino a 11% per simulare le condizioni al fronte.
2. Riduzione delle FFS a 8% per simulare le condizioni antecedenti all'installazione del rivestimento di prima fase (sole centine) a una distanza dal fronte pari a 1.2 m circa.
3. Riduzione delle FFS a 2%, scavo dell'arco rovescio, rimozione del rivestimento di prima fase
Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio e in calotta, distanza dal fronte pari a 12 m circa
4. Riduzione delle FFS a 0%, verifica del rivestimento definitivo a lungo termine
5. Applicazione del carico idraulico dovuto alla falda
6. Applicazione dei carichi di cui al punto 5 con l'aggiunta dell'azione sismica
7. Applicazione dei carichi di cui al punto 6 con l'aggiunta dell'azione sismica

Il percorso di detensionamento del cavo e il conseguente andamento delle FFS è stato definito sulla base dei risultati analitici ottenuti con le curve di deconfinamento sviluppate da Ribacchi e Riccioni (1977)

Le curve di andamento delle FFS, le linee caratteristiche e le convergenze attese con ipotesi di cavità non rivestita per la formazione G4 sono riportate nell'ALLEGATO 1 (Paragrafo 11)

Per la definizione e il calcolo dei carichi di cui ai punti 5, 6 e 7. 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/m³, 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 nella configurazione di progetto sono previsti dreni laterali in prossimità delle murette, 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 dreno e h_{sez} è l'altezza della sezione di scavo

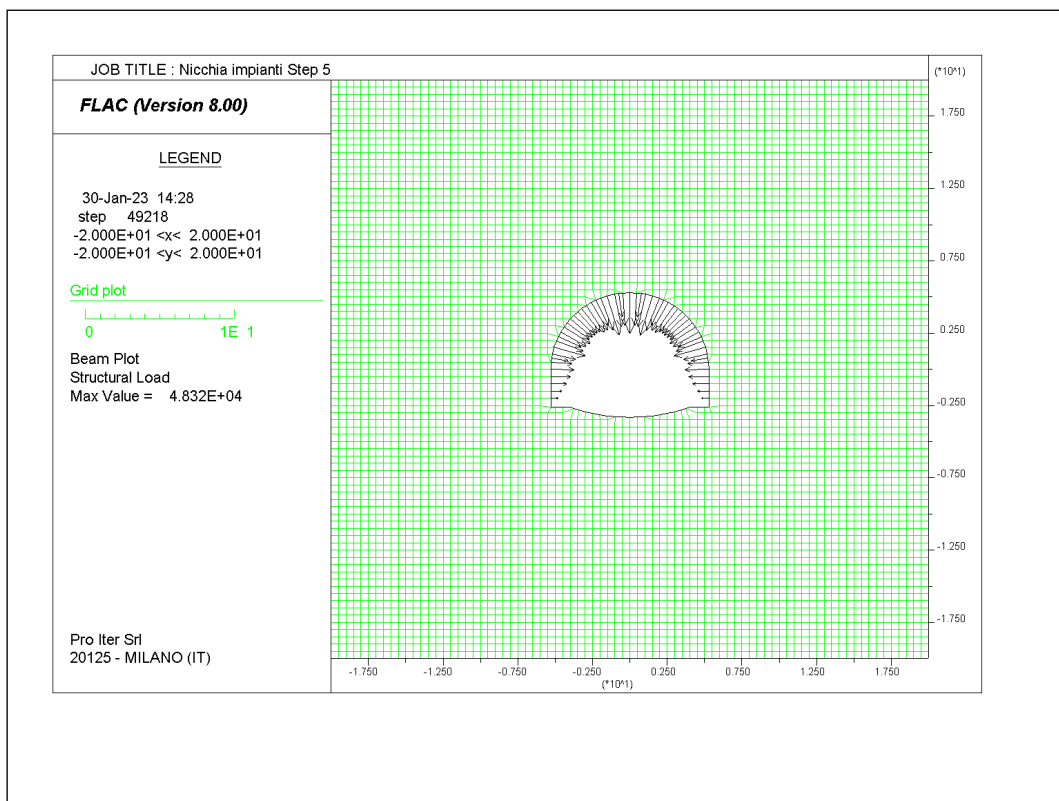


Figura 6 - Applicazione del carico idraulico in presenza di dreni

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) [14].

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 [14].

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

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^a</i>			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
<i>Stiff soil^a</i>			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
<i>Soft soil^a</i>			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

^aIn this table, the sediment types represent the following shear wave velocity ranges: rock ≥ 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).

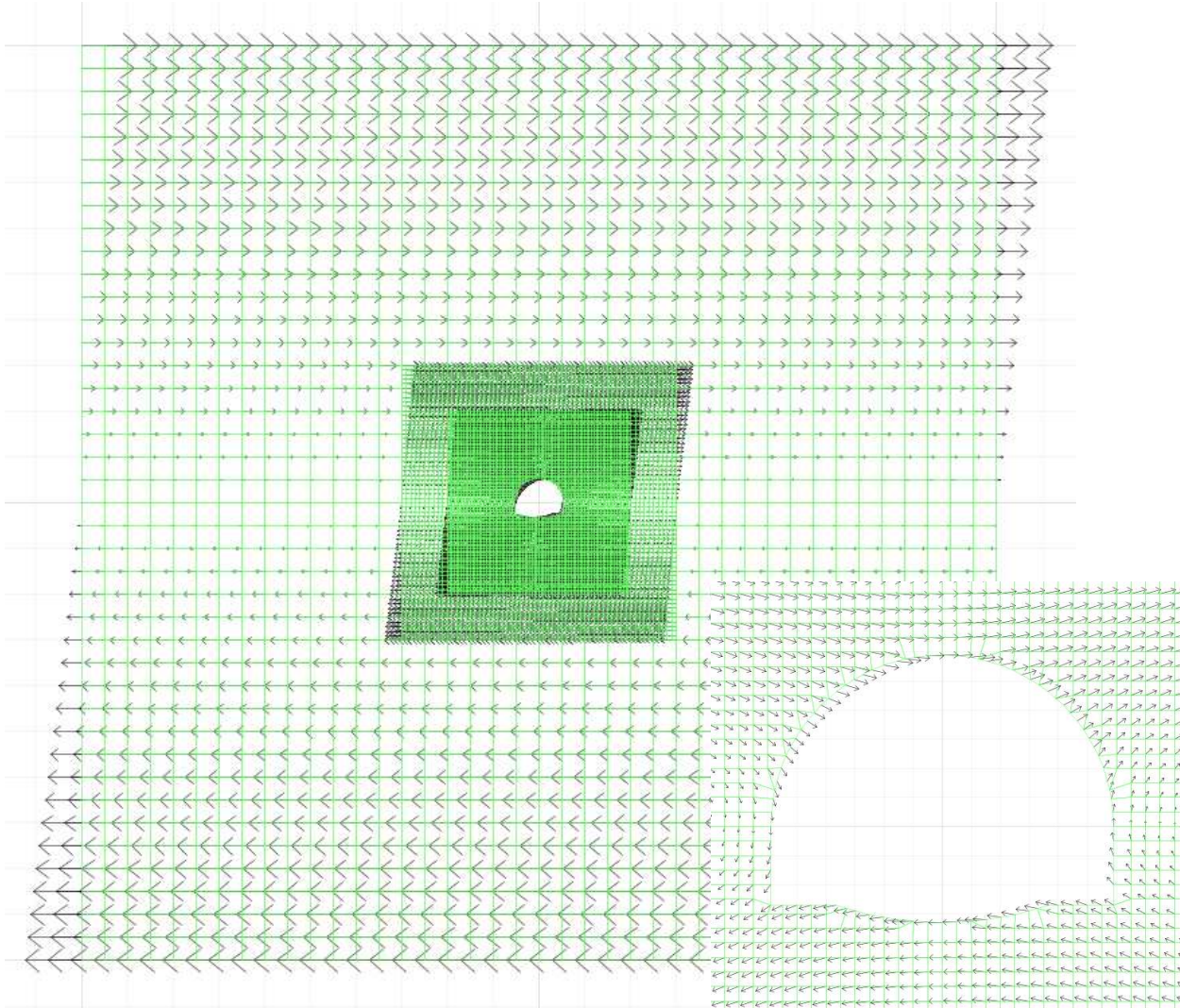
In definitiva risulta:

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

La deformazione tangenziale massima viene applicata mediante uno spostamento a farfalla ai lati del modello Δx_{max} , 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 dettaglio nell'ALLEGATO 2 (Paragrafo 12 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), confermano sostanzialmente i risultati delle Linee Caratteristiche. La convergenza al fronte è pari a circa 3 cm, in accordo con i 2.8 cm previsti con i metodi analitici. Il valore di

convergenza assoluta, pari a 4.5 cm circa, conferma la bontà delle opere di confinamento previste, a fronte di 9.4 cm di spostamento calcolati nel caso di cavità non supportata.

8 VERIFICHE DEI RIVESTIMENTI

Nel seguito del presente paragrafo si riportano le verifiche relative al rivestimento di prima fase e al rivestimento definitivo della nicchia impianti. Tutte le verifiche sono state effettuate considerando cautelativamente le caratteristiche della sezione tipo adottate nel modello numerico, senza recepire le modifiche effettuate nella sezione tipo di Progetto Esecutivo (Figura 4).

Le uniche verifiche aggiornate sono quelle allo SLE di limitazione delle tensioni nell'acciaio e di fessurazione, effettuate considerando l'armatura di progetto (ferri $\Phi 20/25$ in calotta e arco rovescio).

8.1.1 Verifiche dei rivestimenti allo stato limite ultimo

In conformità alle NTC 2018 [1] [2] le azioni ricavate dal modello FDM sul rivestimento di prima fase sono aumentate di $\gamma_G=1.30$ e le resistenze 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:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

- R_d = Valore di progetto della resistenza.
- E_d = 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) sono state effettuate esclusivamente per i rivestimenti definitivi della nicchia, considerando la funzione provvisoria assegnata al rivestimento di prima fase.

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).

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

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase con betoncino a piena maturazione. Si segnala nuovamente che, come indicato in Figura 4, questi non corrispondono perfettamente ai valori di Progetto Esecutivo, ma vengono ritenuti ammissibili in quanto cautelativi.

Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del betoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [15]. 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 – stato di fatto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C25/30
Area centine (solo ali) [cm ²]	20.34
Area centine (solo anima) [cm ²]	13.30
Interasse [m]	-1.20
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 3 – Carico del terreno sulle centine, FFS = 2% per simulare condizioni a 12 m dal fronte.

8.2.2 Risultati

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

8.3 Rivestimento definitivo

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. Si segnala nuovamente che, come indicato in Figura 4, questi non corrispondono perfettamente ai valori di Progetto Esecutivo, ma vengono ritenuti ammissibili in quanto cautelativi.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti	
Spessore cls [cm]	65
Classe di resistenza cls	C32/40
Armatura trasversale simmetrica	–
Armatura a taglio	–
Ripartitori	–

Rivestimento definitivo arco rovescio	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C32/40
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 nelle seguenti condizioni:

- Step 4 – Carico del terreno a lungo termine, FFS nulle;
- Step 5 - Carico del terreno + carico idraulico;
- Step 7 - Condizioni presenti allo step 5 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 8 - Condizioni presenti allo step 6 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica.

8.3.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 5 – Carico del terreno a lungo termine, FFS nulle
- Step 6 - Carico del terreno + carico idraulico.

8.3.3 Risultati

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

9 CONCLUSIONI

I risultati illustrati nel presente report confermano l'adeguatezza e l'efficacia degli interventi proposti per lo scavo della nicchia impianti alla progressiva 2+777.59.

In particolare, le analisi FDM 2D svolte hanno confermato il corretto dimensionamento dei rivestimenti di prima 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**

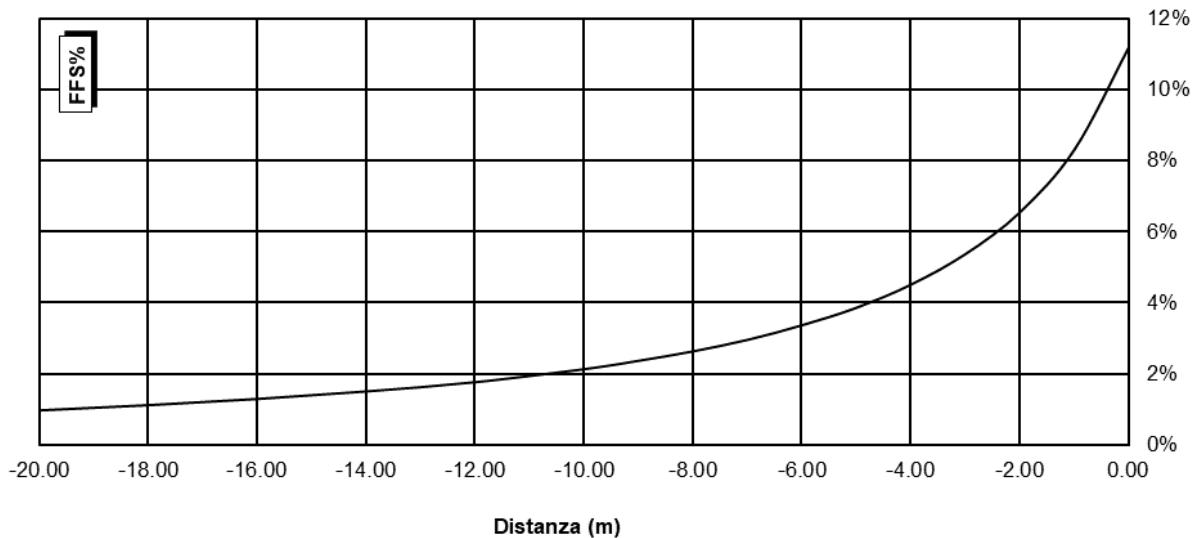
11 ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE

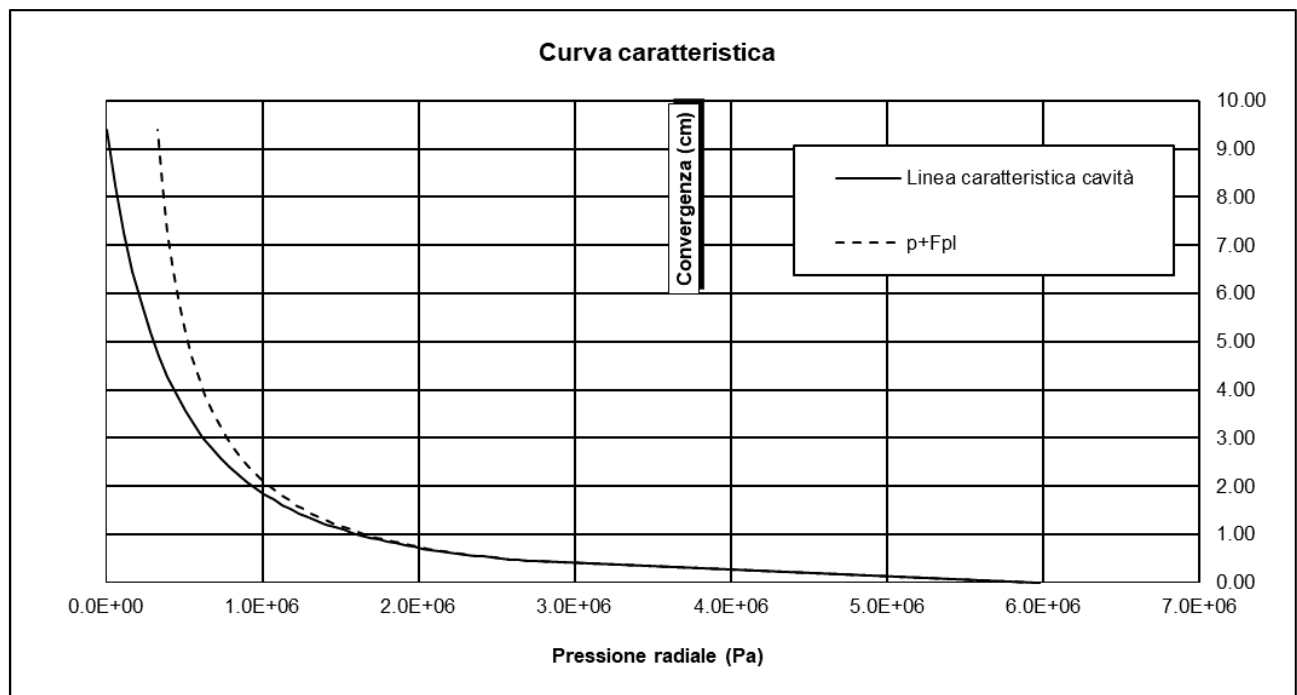
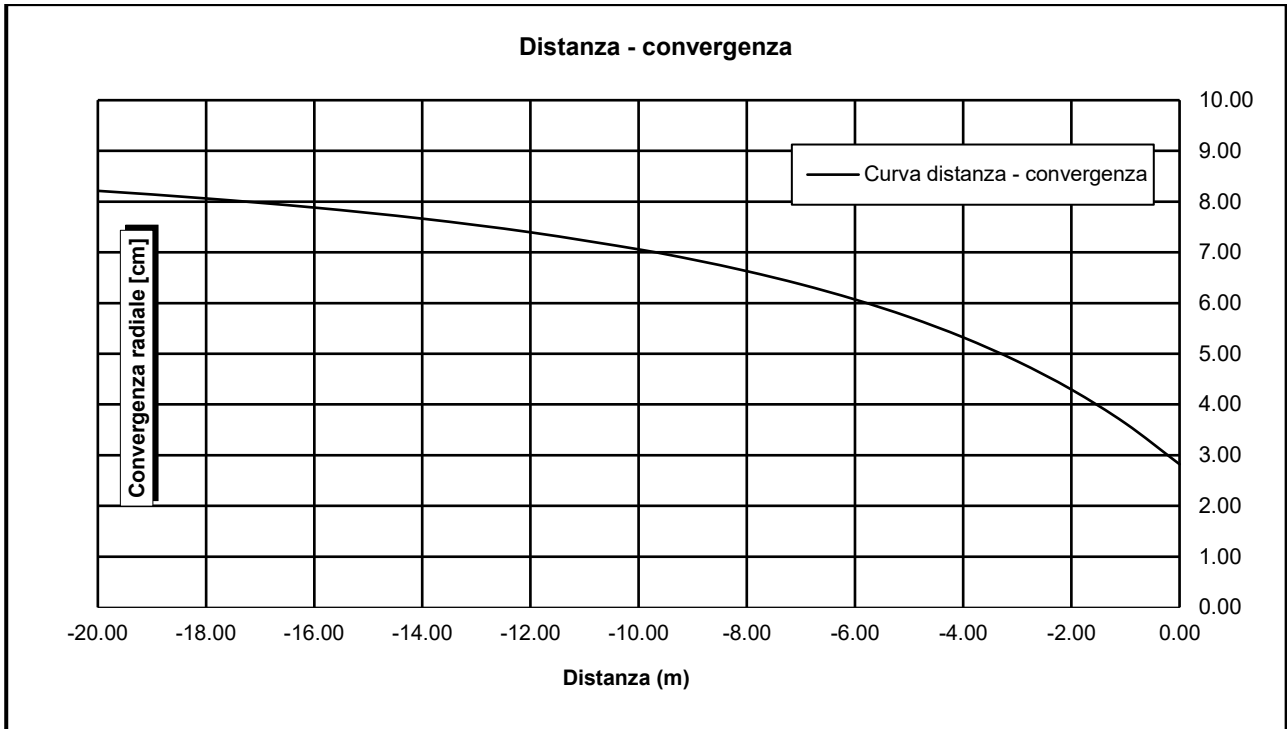
Di seguito vengono riportate le proprietà geotecniche e i grafici delle Linee Caratteristiche calcolate con approccio analitico (Ribacchi e Riccioni, 1977) dell'ammasso G4 con la copertura stimata (230 m).

G4_H=230m_classeIV - LC GSI = 36, H = 230m, C0 = 30Mpa, mi = 10, Ei = 9000GPa

DATI DI INGRESSO		RISULTATI	
peso di volume [N/mc]	26000	All'equilibrio naturale (da L.C.)	
copertura [m]	230	Convergenza assoluta [cm]	9.4
raggio di scavo [m]	4.90	Convergenza relativa [cm]	6.6
		Estensione fascia plastica [m]	12.7
angolo d'attrito di picco [°]	28.11	Equilibrio al fronte	
angolo d'attrito residuo [°]	22.09	Convergenza assoluta [cm]	2.8
coesione di picco [Pa]	456881	FFS	11.2%
coesione residua [Pa]	304050		
modulo elastico [Pa]	4.50E+09	c(fronte) / Rscavo	0.58 [%]
coefficiente di Poisson	0.25	c(assoluta) / Rscavo	1.92 [%]
		c(relativa) / Rscavo	1.34 [%]
angolo di dilatazione [°]	3.51	Fpl(fronte)/Rscavo	112.0 [%]
		Fpl(assoluta)/Rscavo	259.9 [%]

Distanza - forze fittizie di scavo (%)

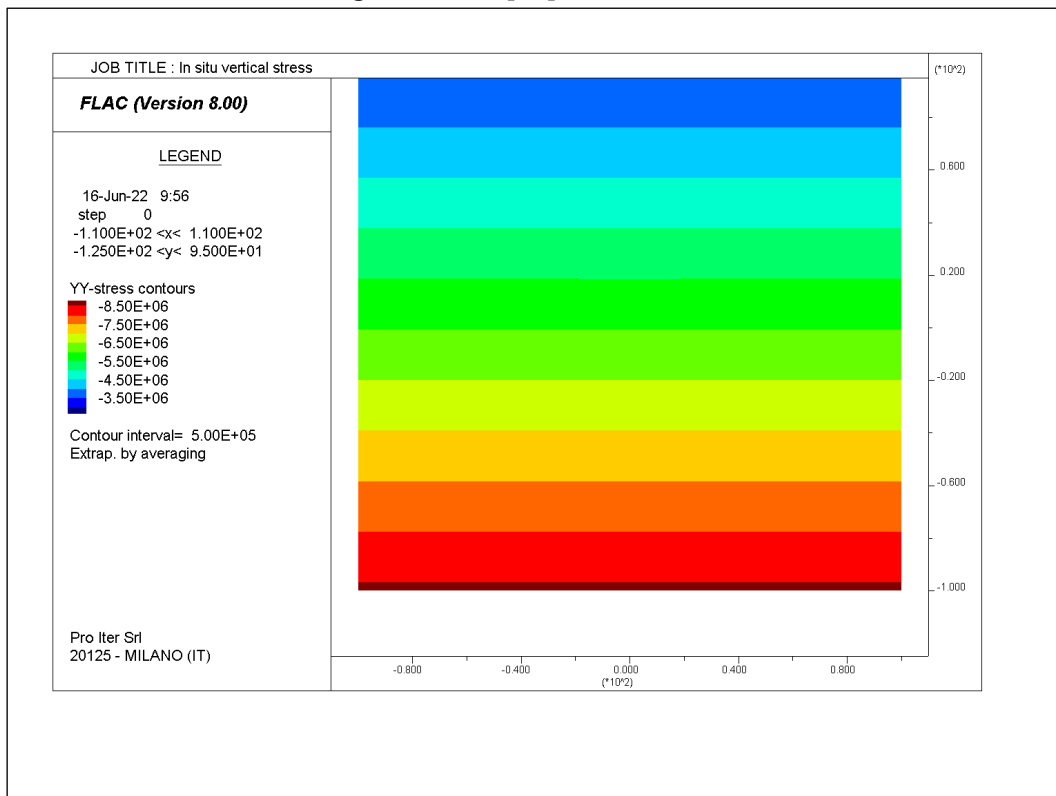




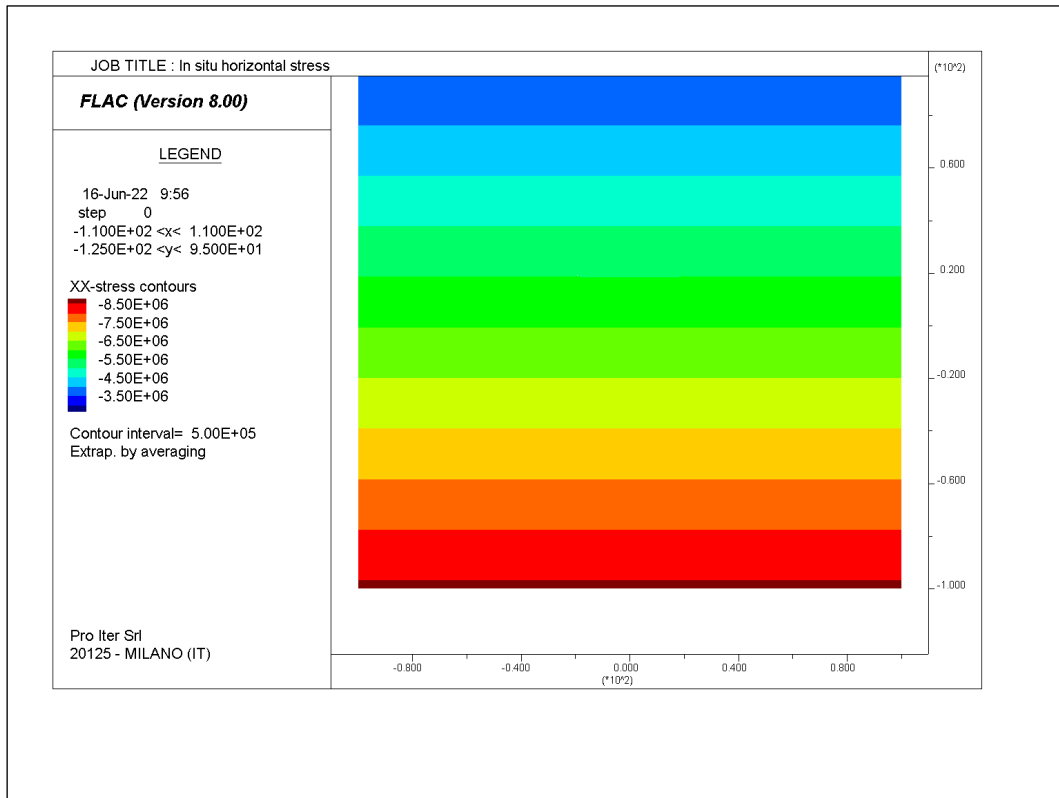
12 ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL'ANALISI

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

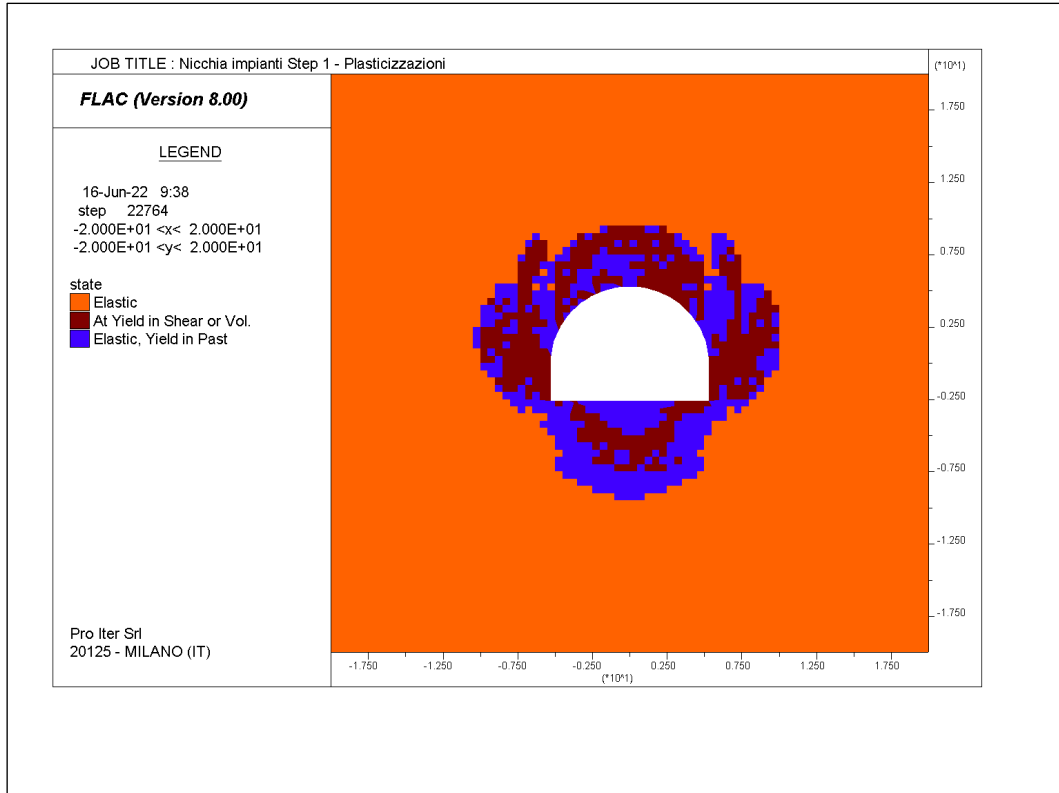
- gli sforzi geostatici [Pa] prima dello scavo della galleria;
 - plasticizzazioni;
 - spostamenti totali nelle varie configurazioni di carico.
 - sforzi verticali nel terreno nelle varie configurazioni di carico
 - sollecitazioni (momento flettente [Nm], azione assiale [N] e taglio [N]) nel rivestimento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



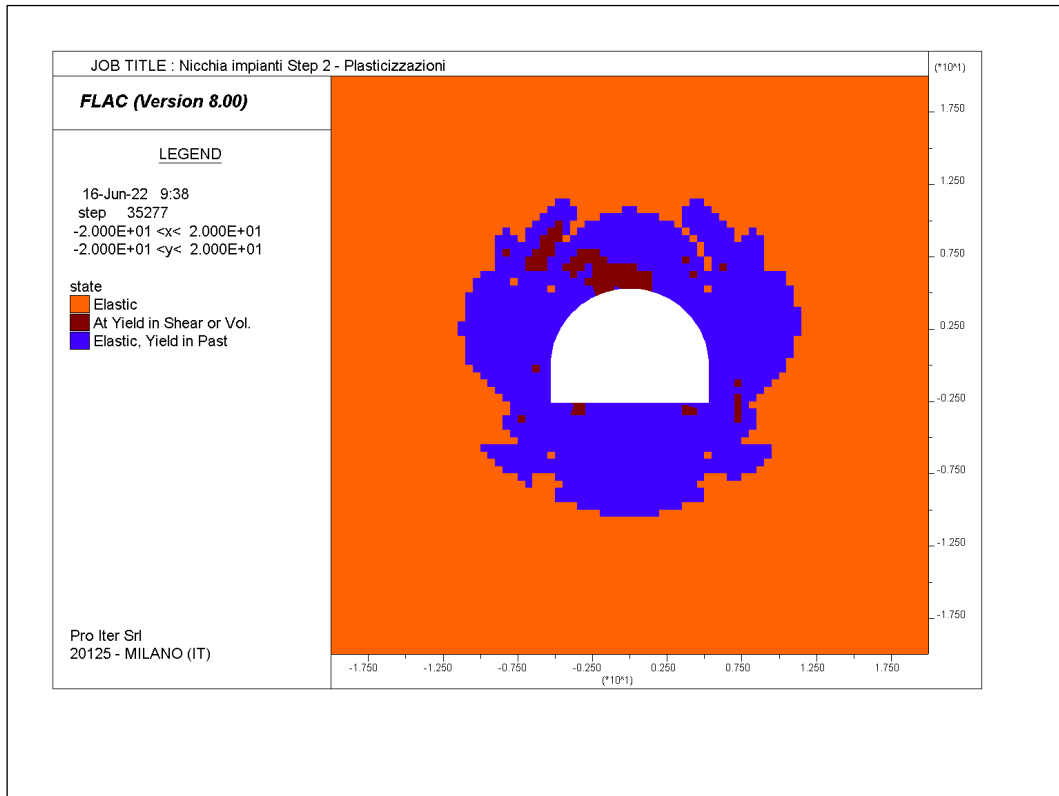
• **Sforzi orizzontali in condizioni geostatiche [Pa]**



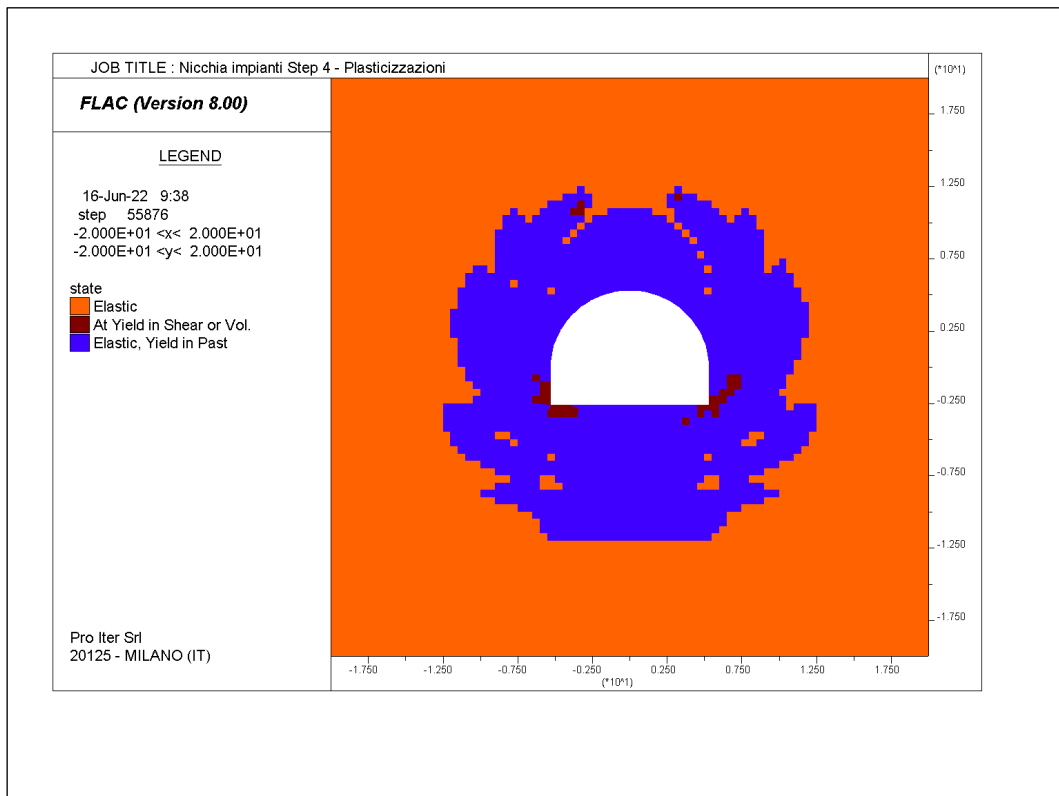
• **Plasticizzazioni nel modello – Step 1 (Scavo nicchia – FFS 11%)**



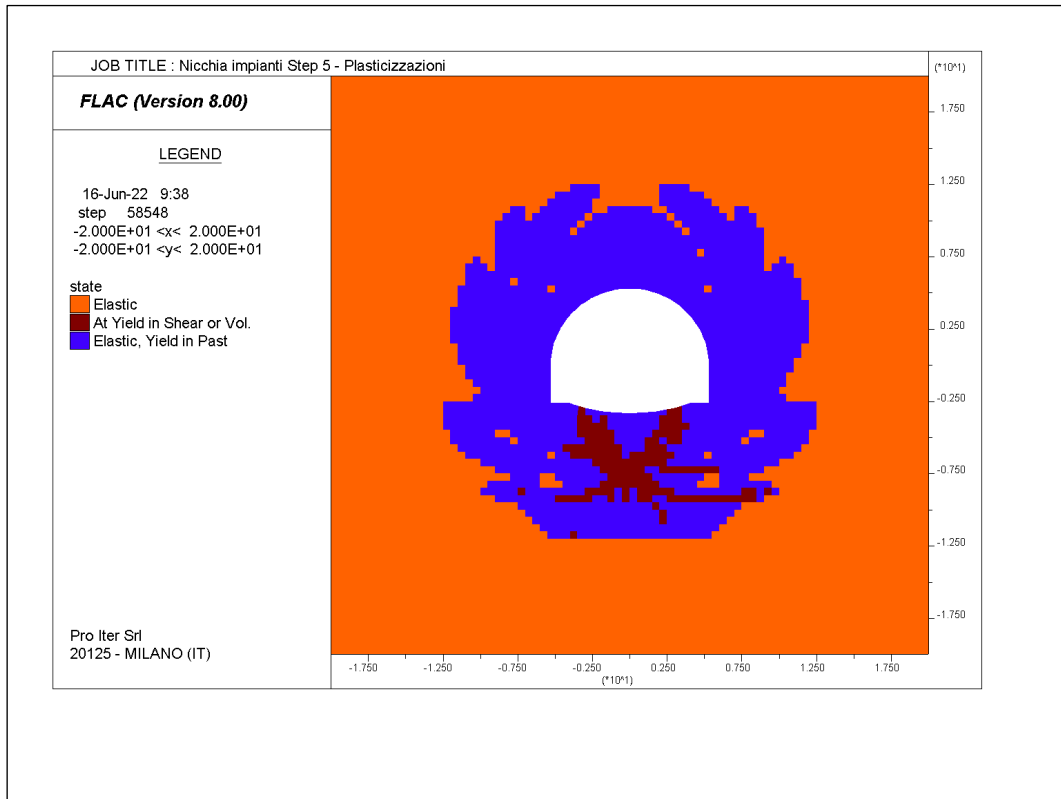
• Plasticizzazioni nel modello – Step 2 (Distanza 1.2 m dal fronte – FFS 8%)



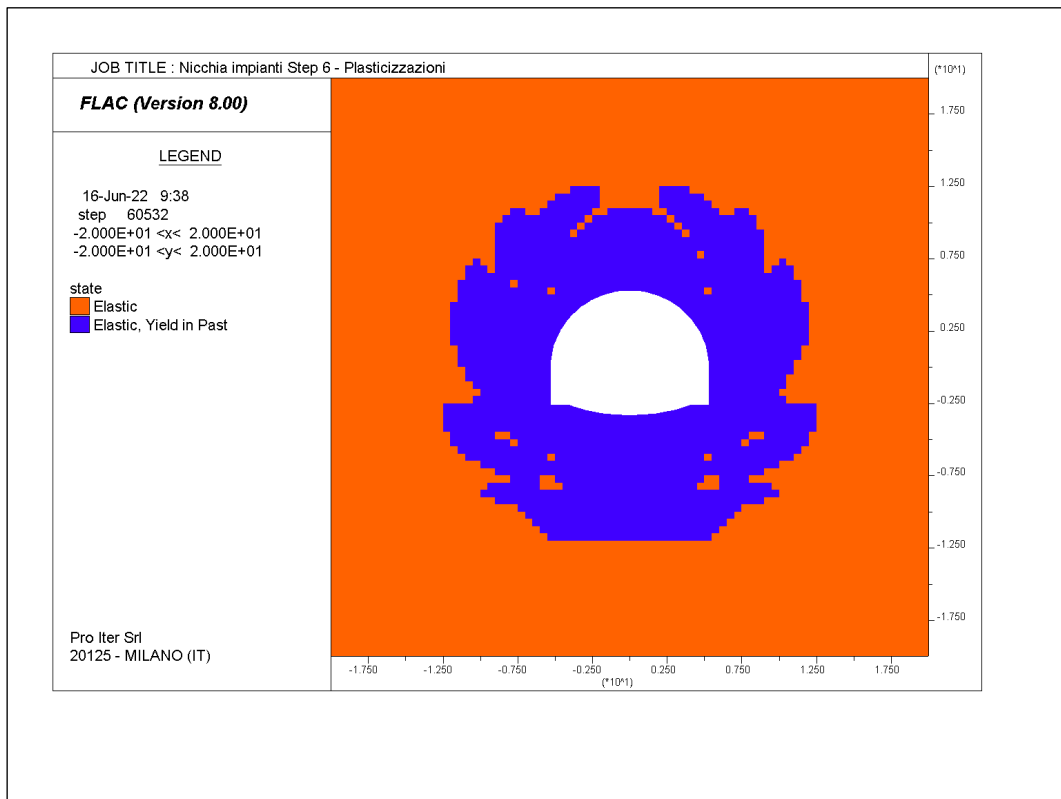
• Plasticizzazioni nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)



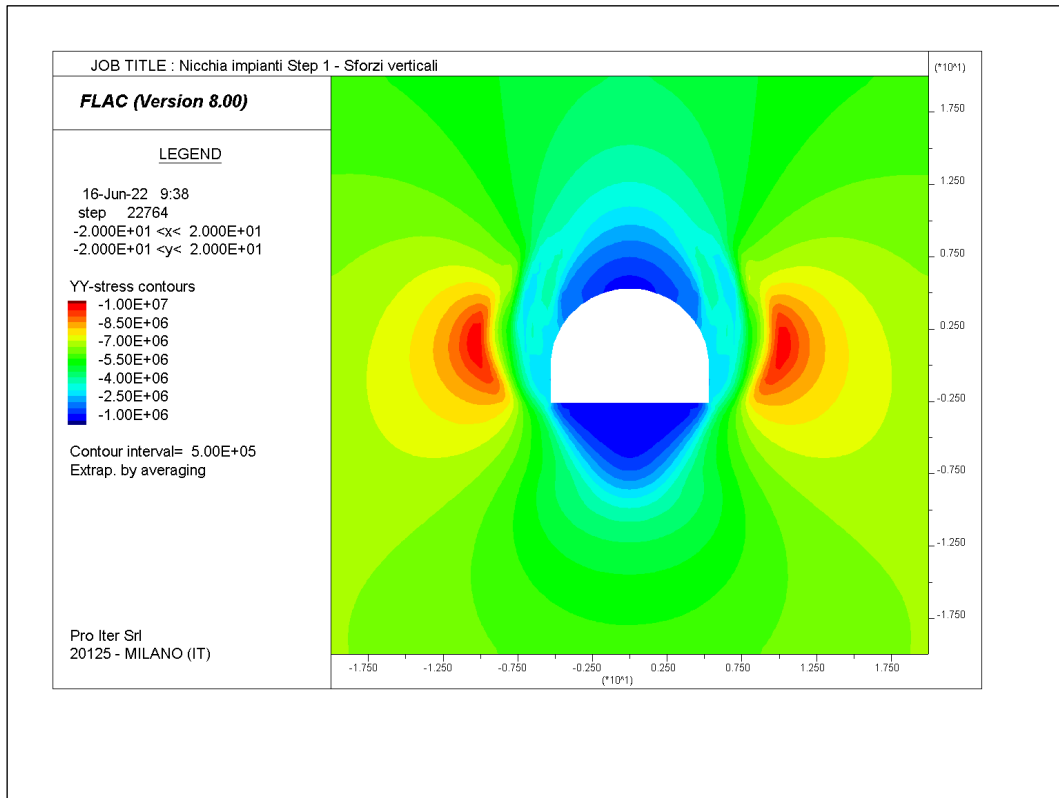
• **Plasticizzazioni nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



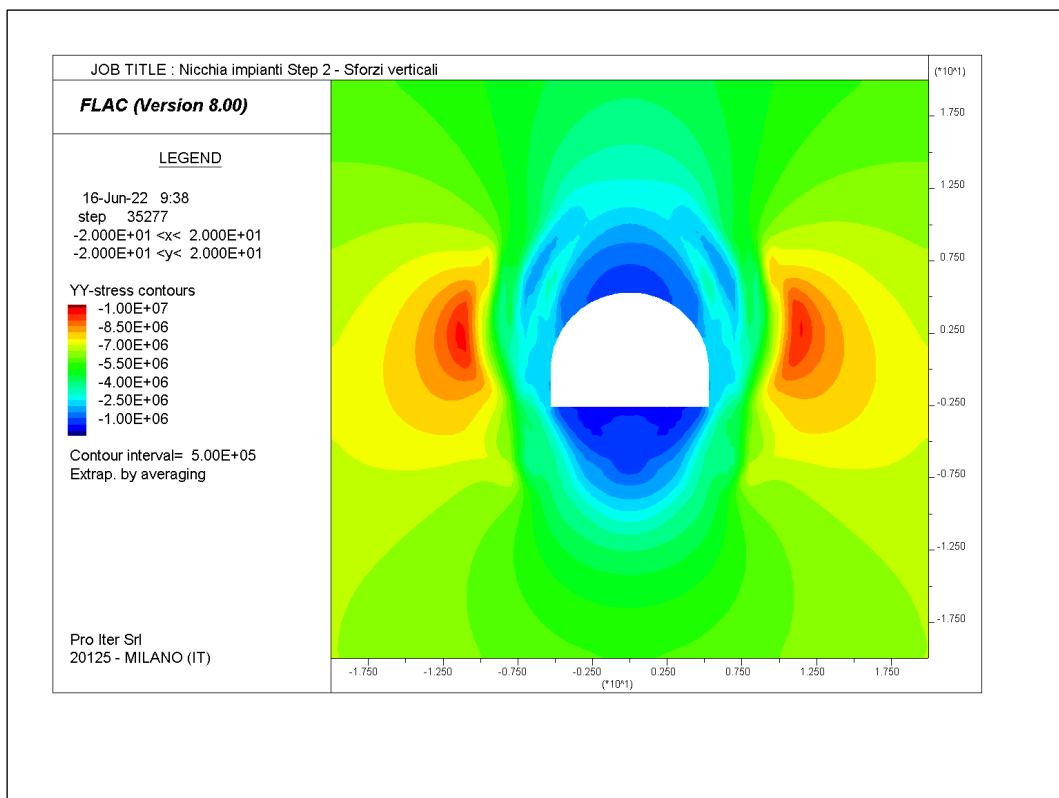
• **Plasticizzazioni nel modello – Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



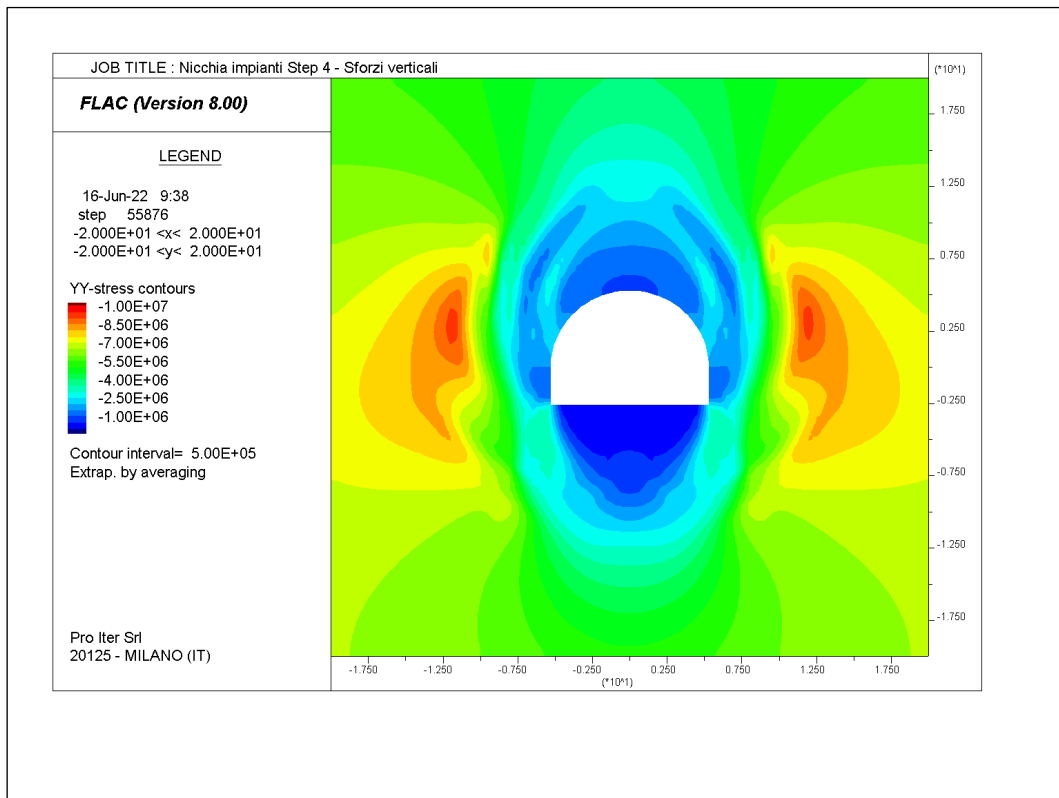
- Sforzi verticali nel modello –Step 1 (Scavo nicchia – FFS 11%)



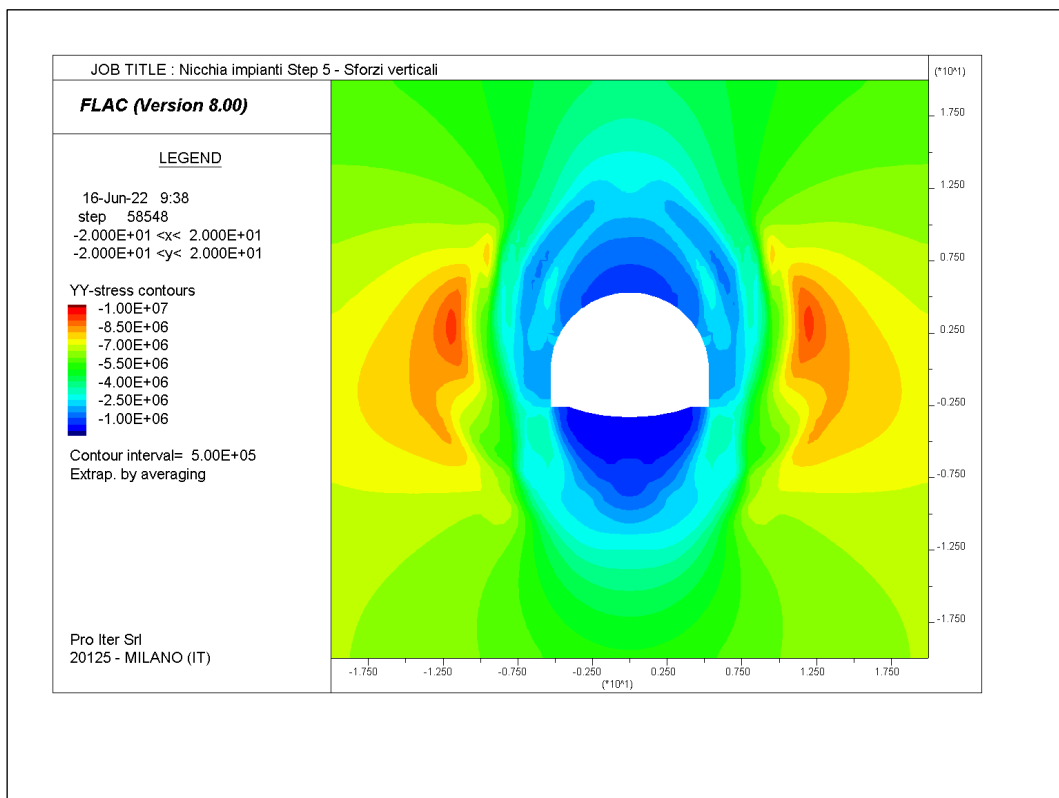
- Sforzi verticali nel modello – Step 2 (Distanza 1.2 m dal fronte – FFS 8%)



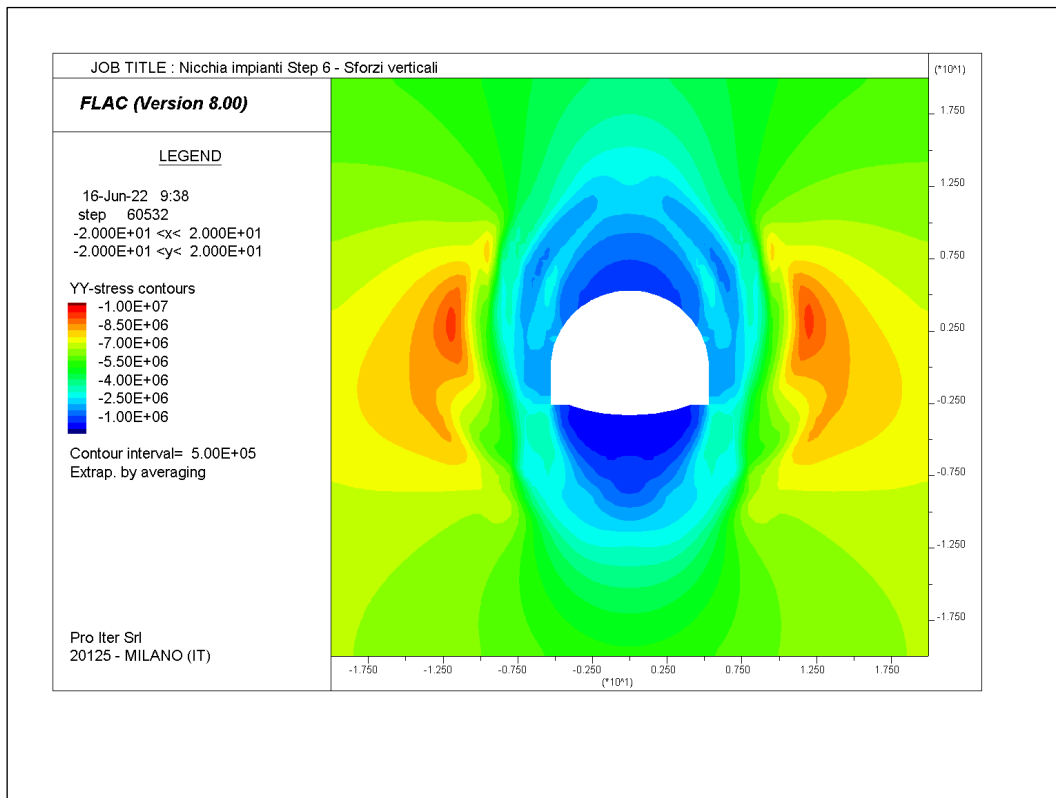
• **Sforzi verticali nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)**



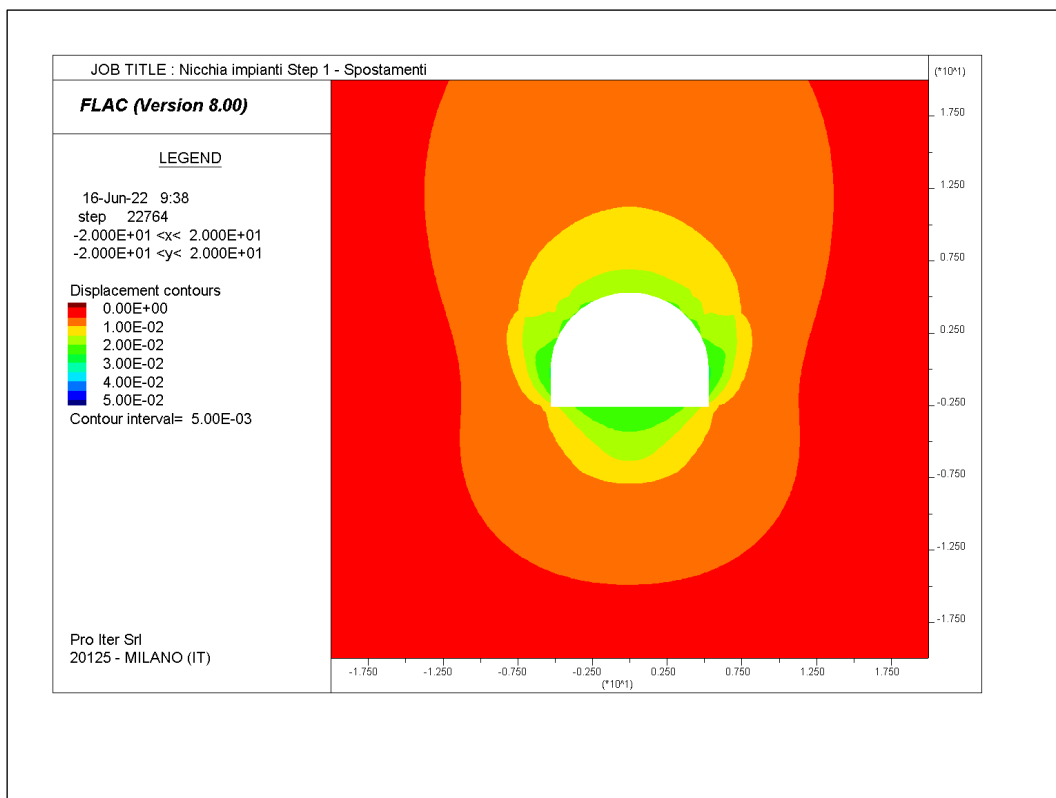
• **Sforzi verticali nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



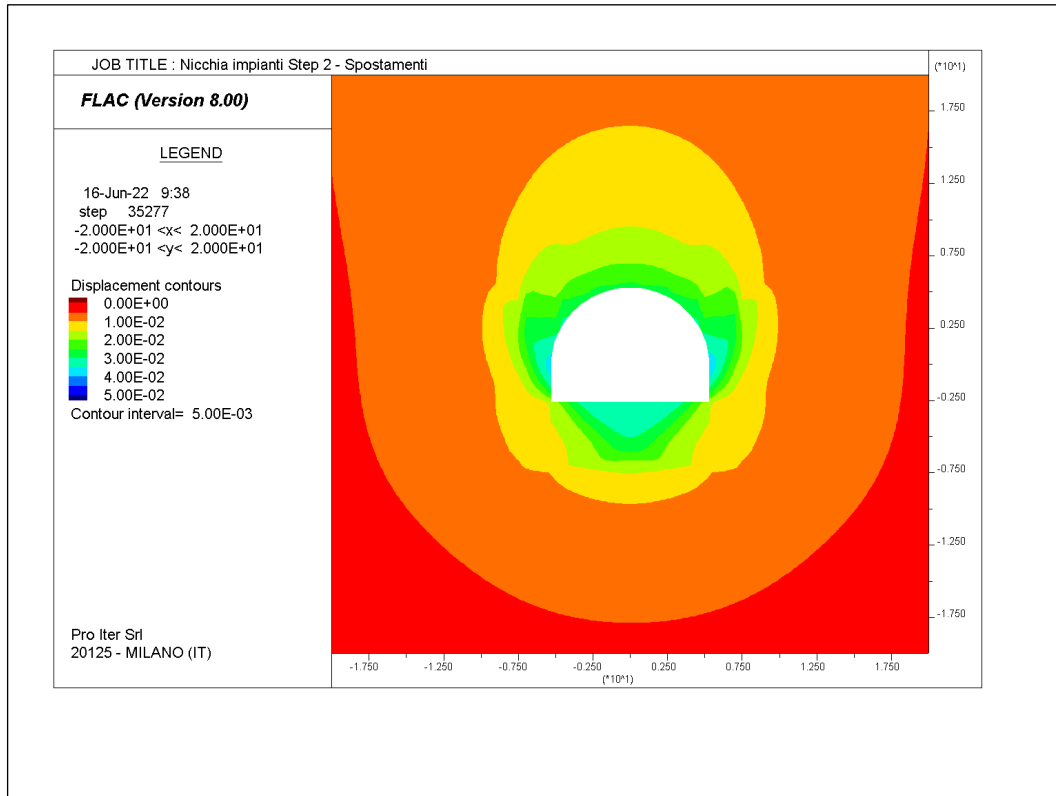
- Sforzi verticali nel modello – Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



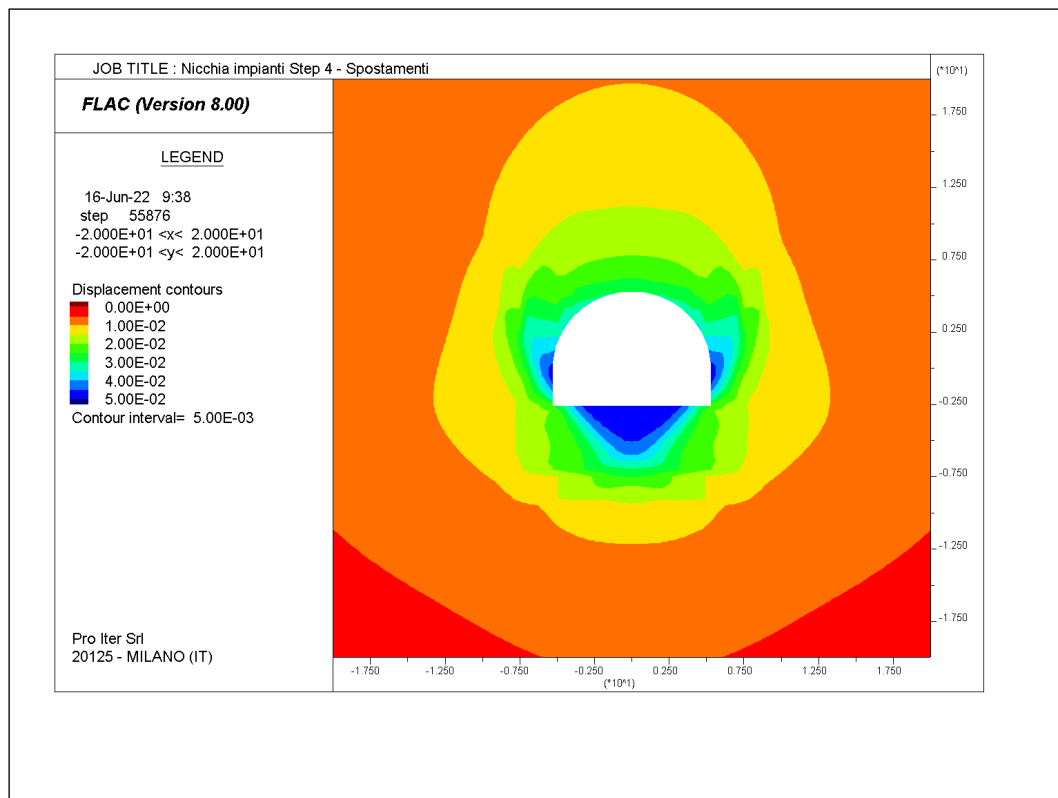
- Spostamenti totali nel modello – Step 1 (Scavo nicchia – FFS 11%)**



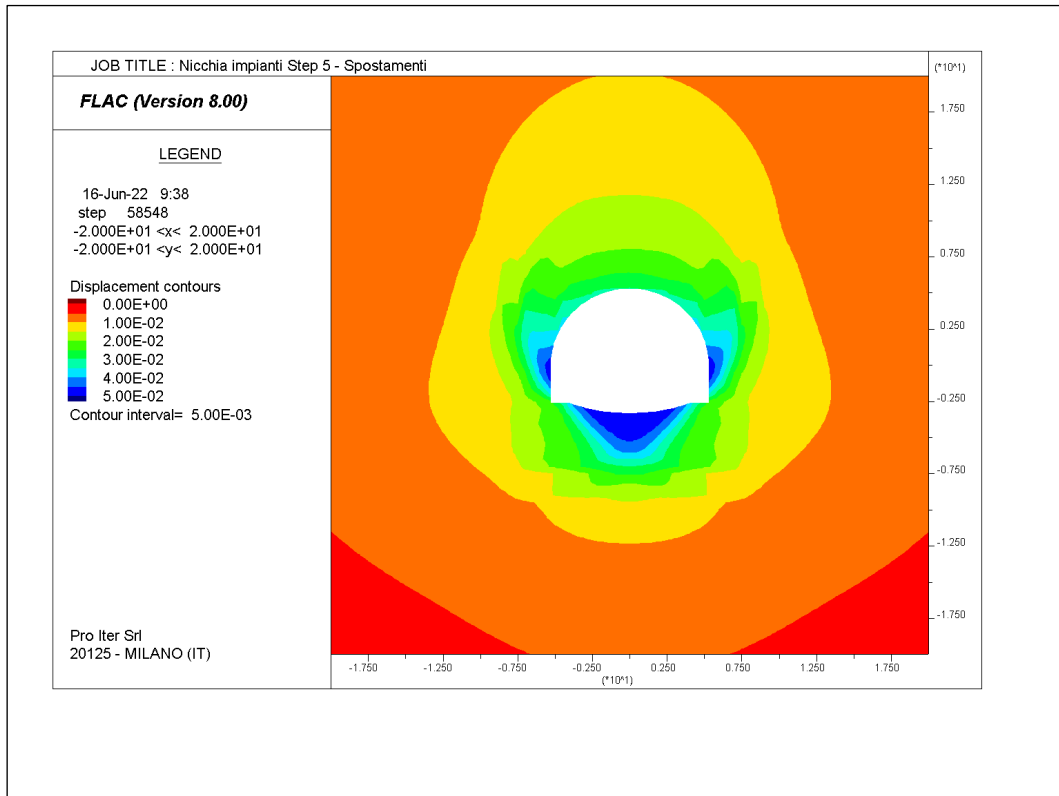
- **Spostamenti totali nel modello – Step 2 (Distanza 1.2 m dal fronte – FFS 8%)**



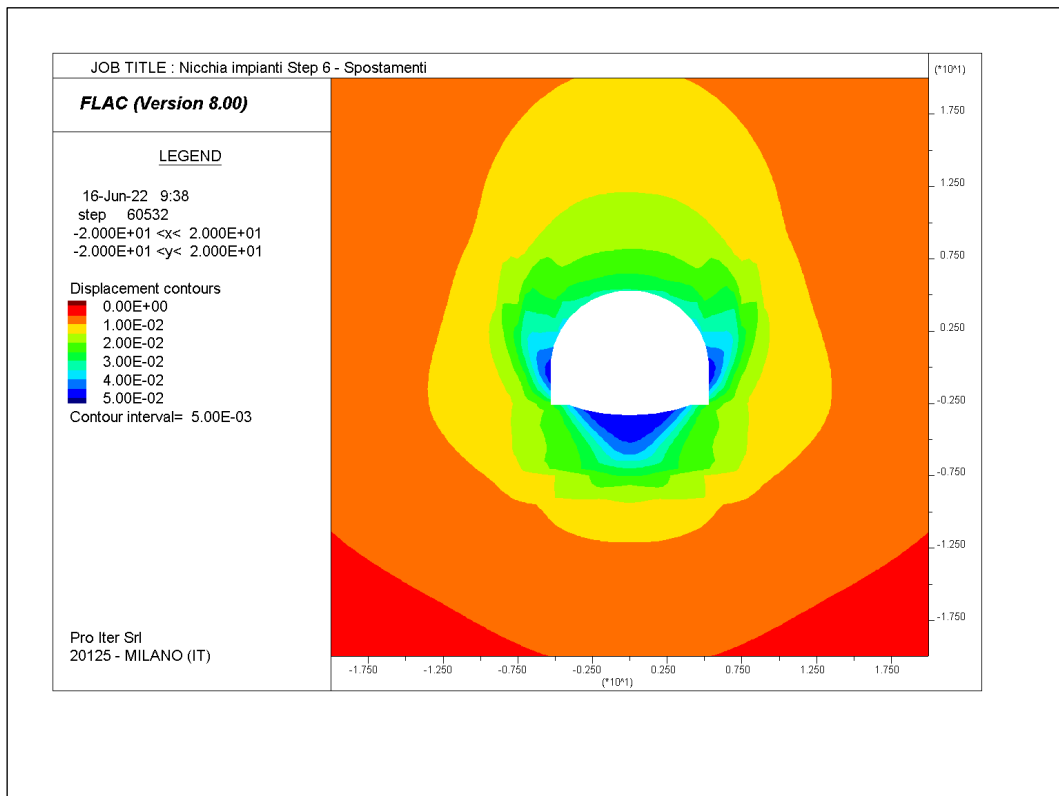
- **Spostamenti totali nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)**



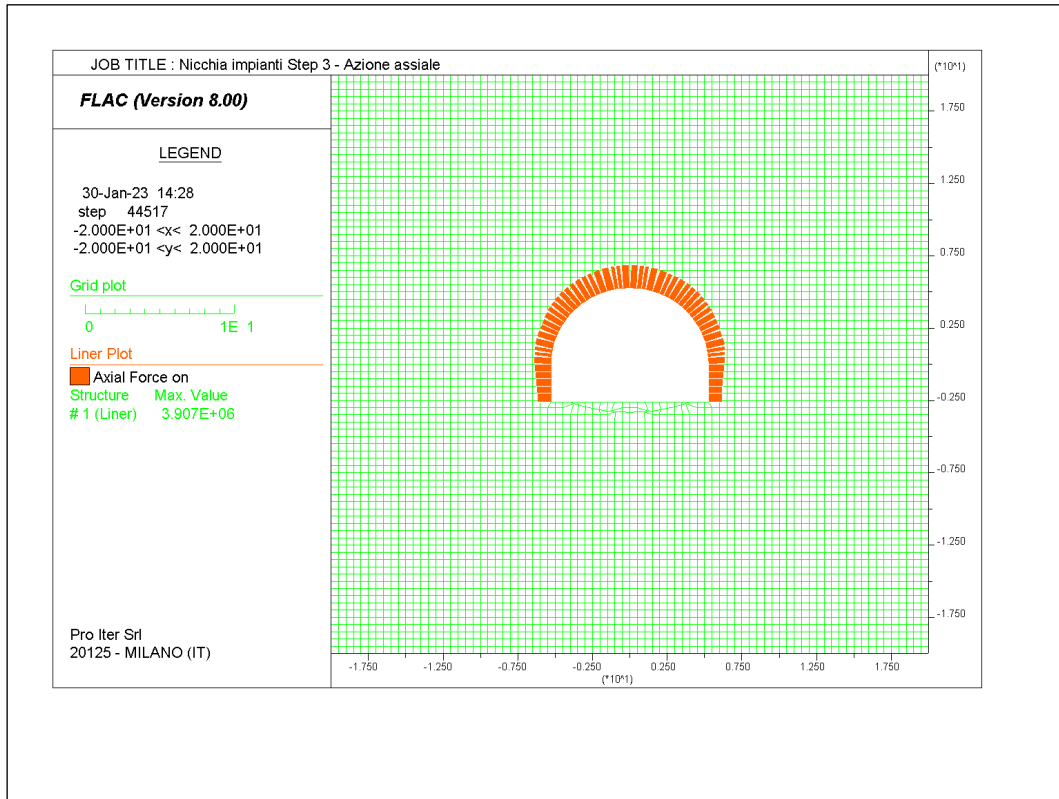
• **Spostamenti totali nel modello – Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



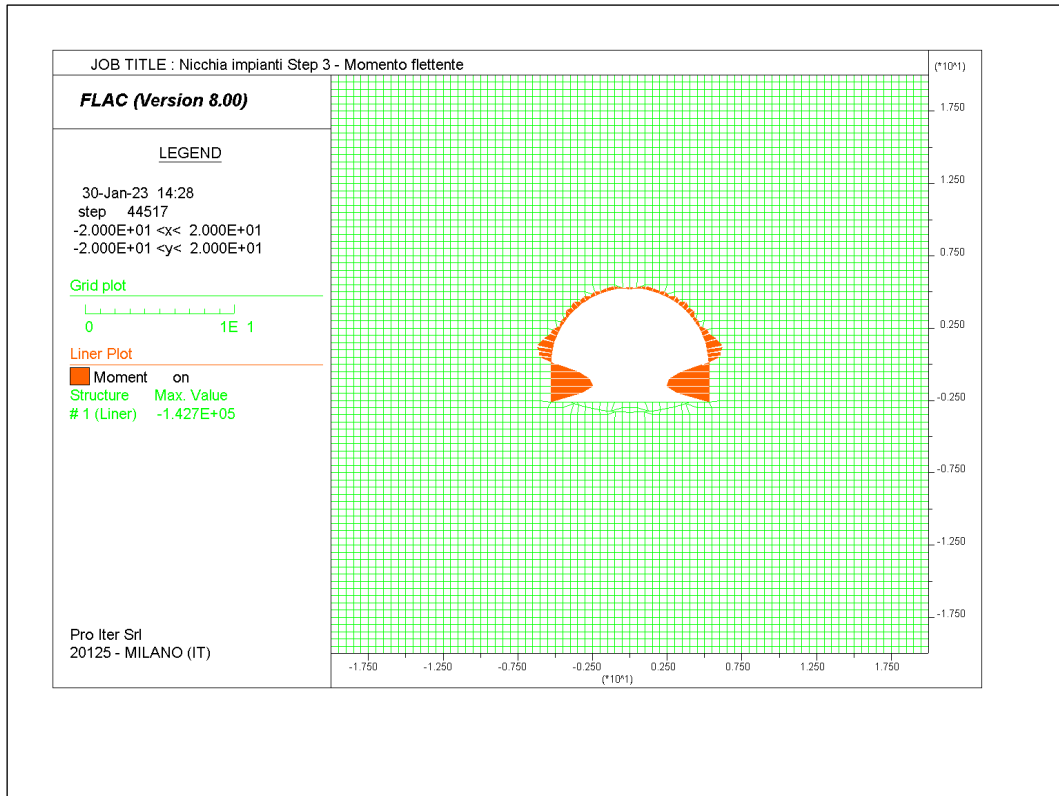
• **Spostamenti totali nel modello – Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



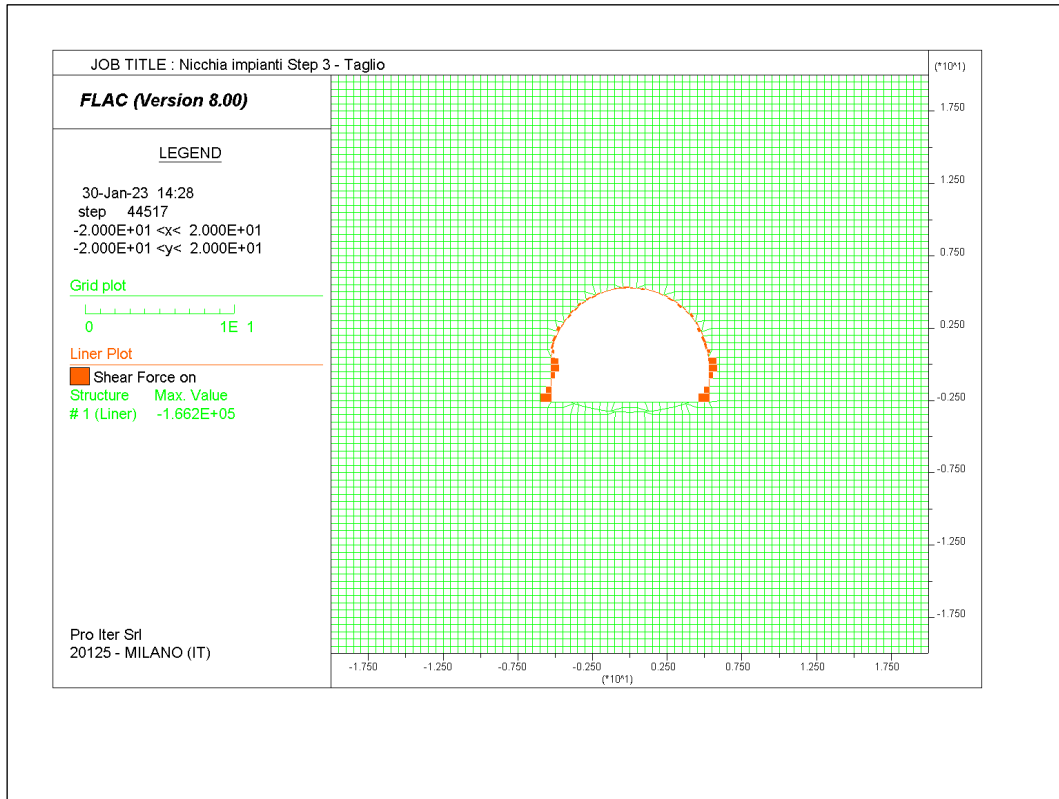
- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase [N] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)**



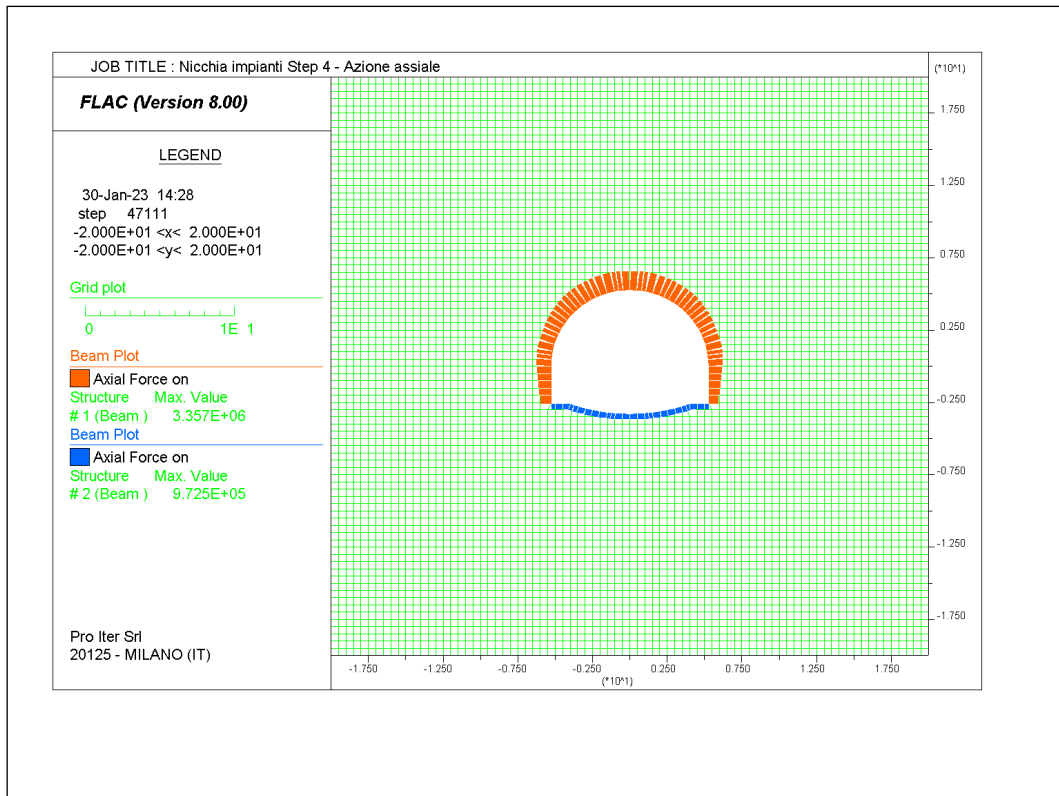
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase [N] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)**



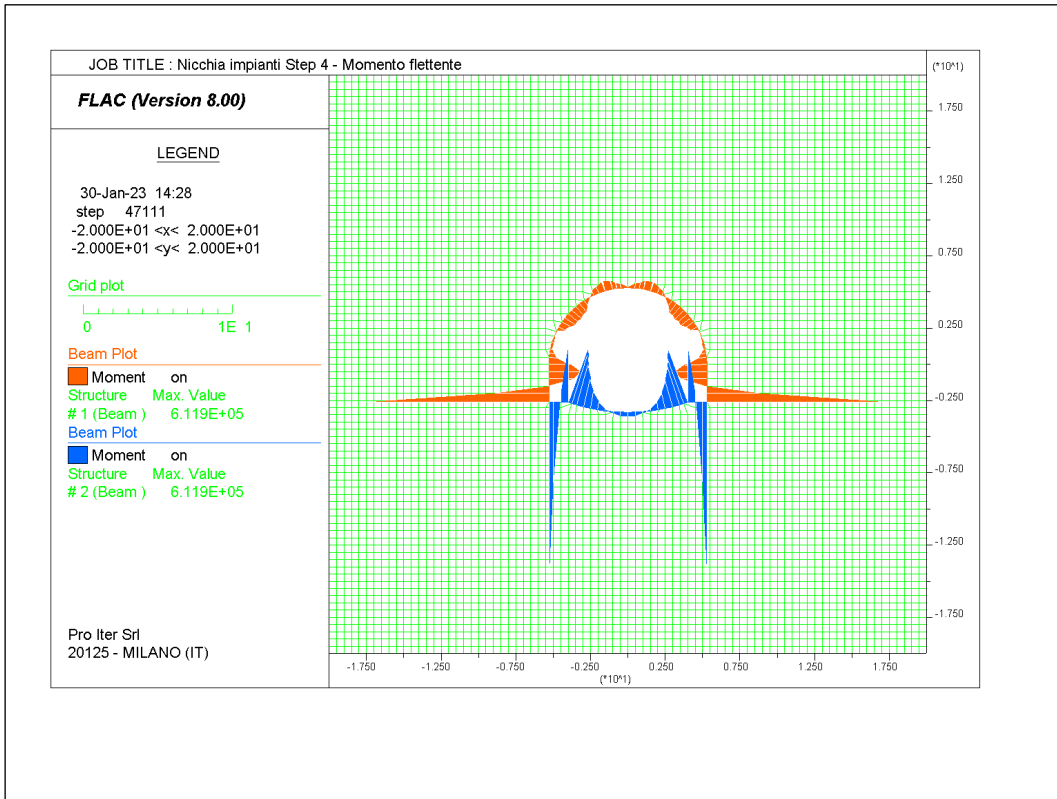
- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase [Nm] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase – FFS 2%)**



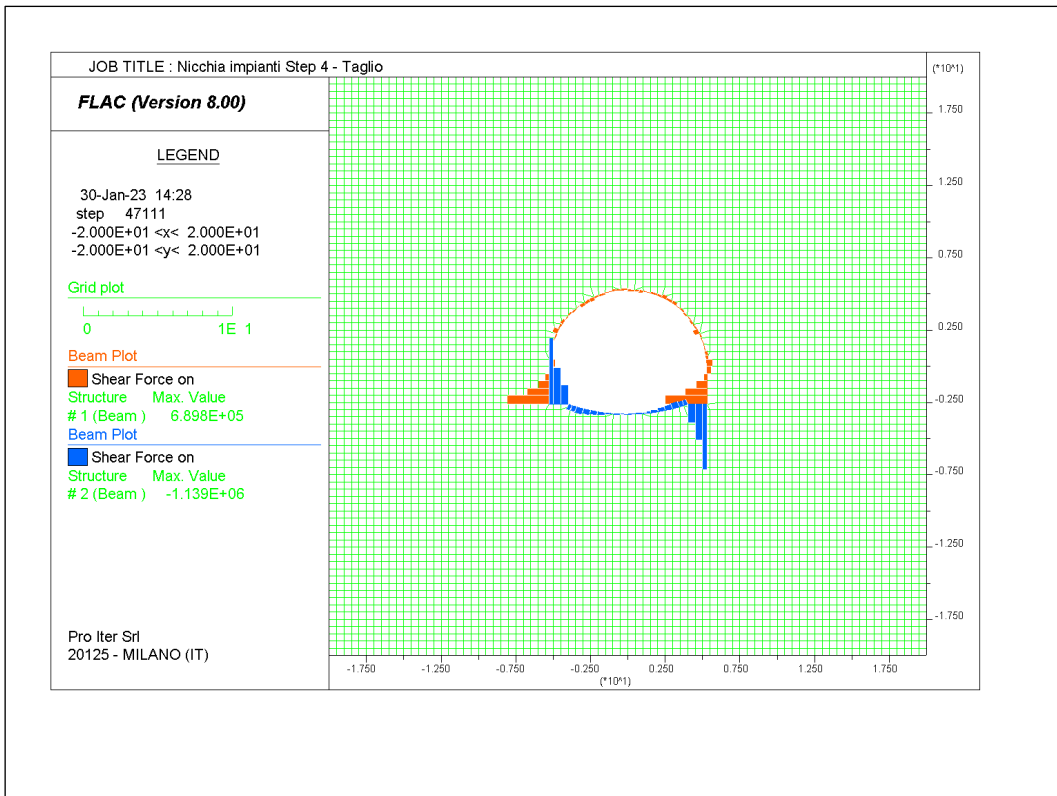
- **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



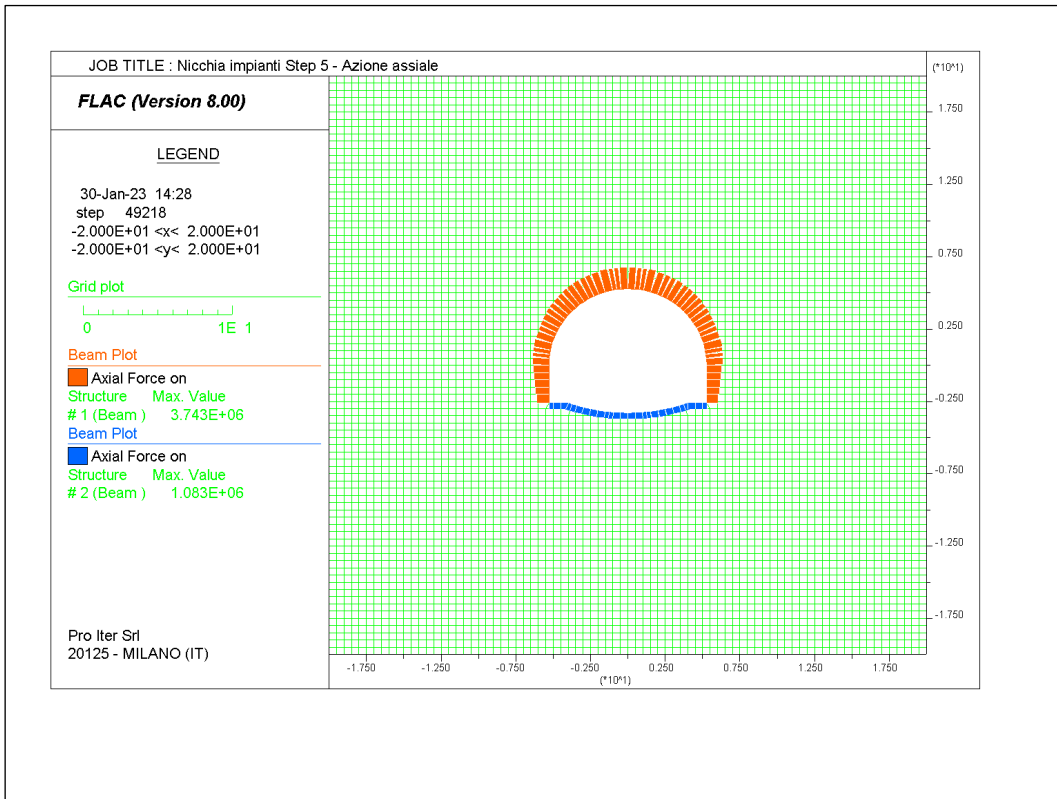
- **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



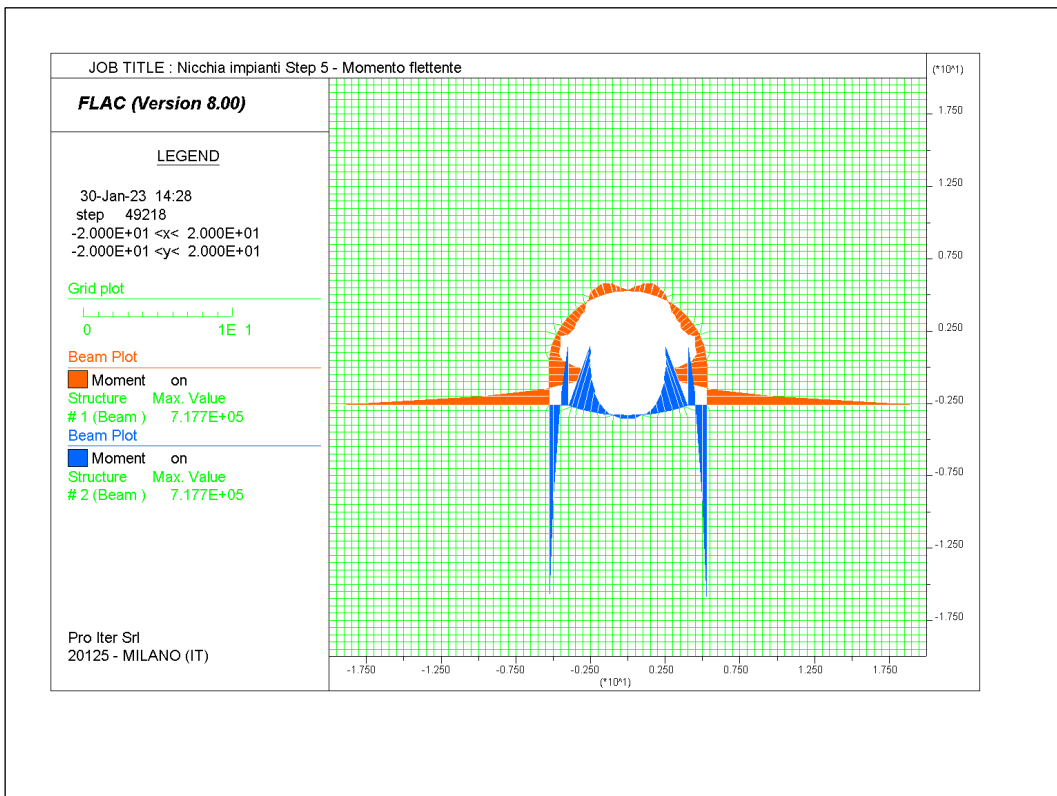
- **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 4 (Installazione rivestimento definitivo - FFS nulle)**



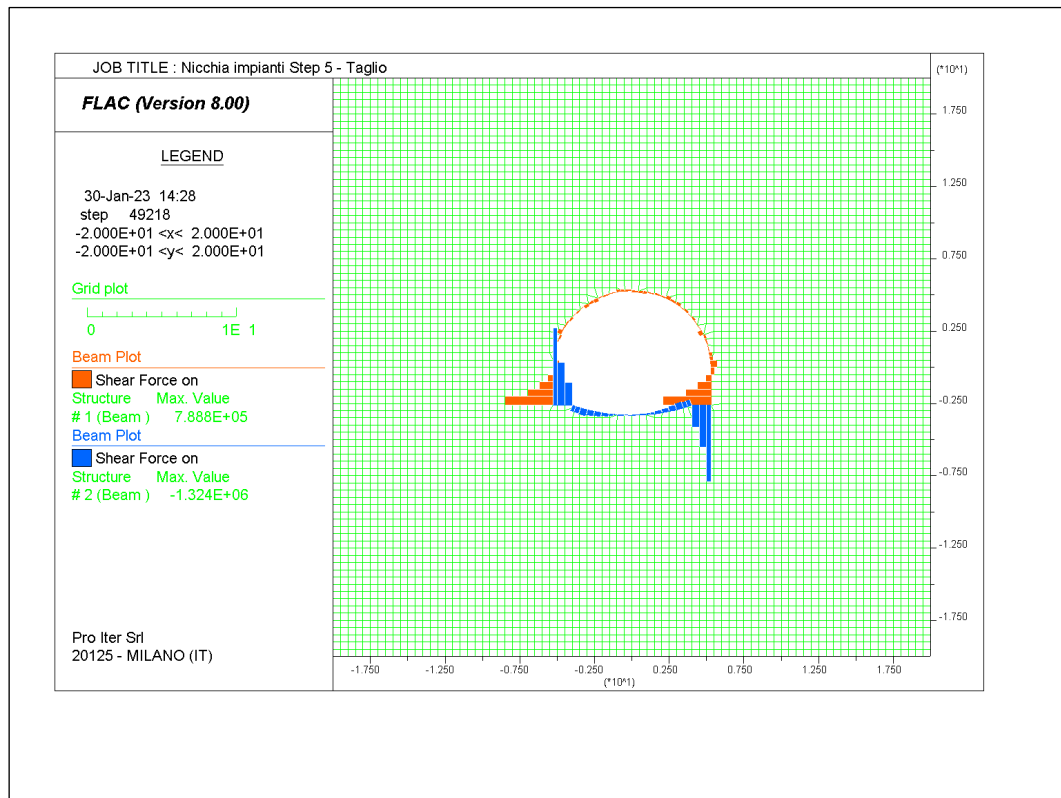
• **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



• **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 5 (Applicazione del carico di falda)**



13 ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLA SEZIONE TIPO

13.1 Rivestimento di prima fase

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento di prima fase con betoncino a piena maturazione. Le verifiche a pressoflessione sono effettuate considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore del betoncino proiettato (esclusi i 5 cm di betoncino di regolarizzazione) e un'armatura pari all'area delle ali delle centine [15]. 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.

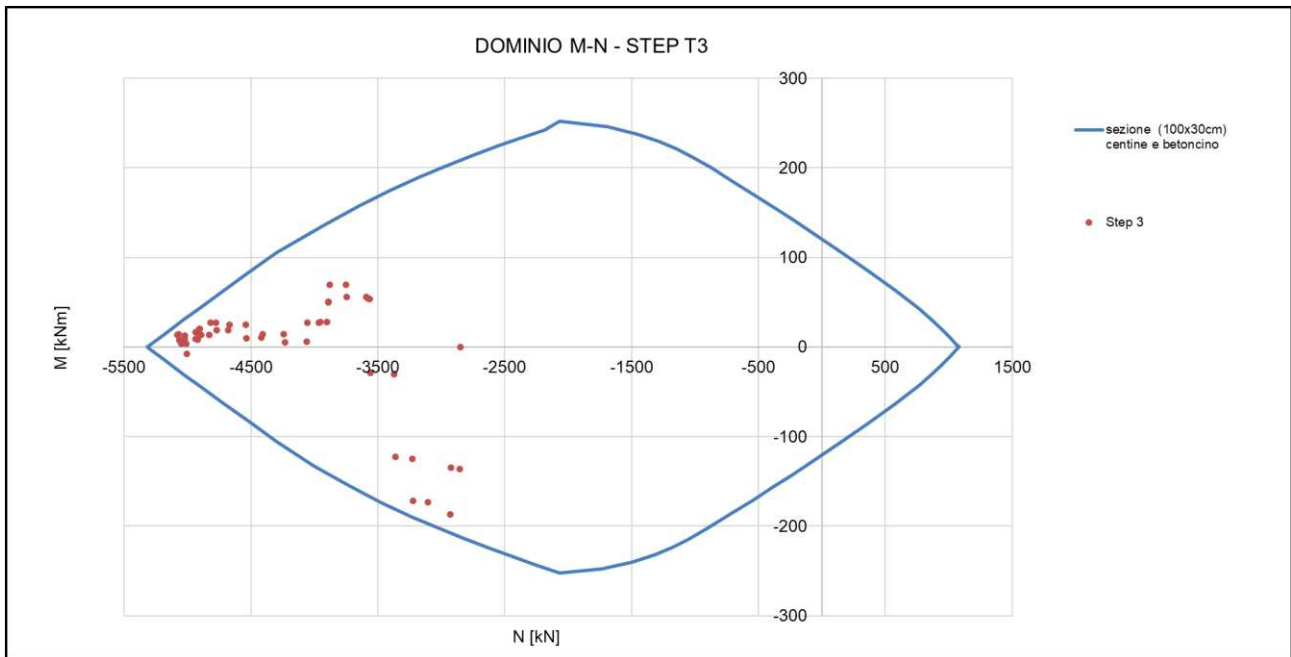
Rivestimento di prima fase – stato di fatto	
Spessore betoncino [cm]	20
Classe di resistenza cls	C25/30
Area centine (solo ali) [cm ²]	20.34
Area centine (solo anima) [cm ²]	13.30
Interasse [m]	-1.20
Classe di resistenza acciaio	S275

13.1.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Di seguito si riportano le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento di prima fase nella seguente condizione:

- Step 3 – Carico del terreno sulle centine, FFS = 2% per simulare condizioni a 12 m dal fronte.

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:

$$V_{Ed} = 216 \text{ kN} < 235.9 \text{ kN} = V_{Rd}$$

13.2 Rivestimento definitivo

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. Si segnala nuovamente che, come indicato in Figura 4, questi non corrispondono perfettamente ai valori di Progetto Esecutivo, ma vengono ritenuti ammissibili in quanto cautelativi.

Rivestimento definitivo calotta e piedritti	
Spessore cls [cm]	65
Classe di resistenza cls	C32/40
Armatura trasversale simmetrica	–
Armatura a taglio	–
Ripartitori	–

Rivestimento definitivo arco rovescio	
Spessore cls [cm]	60
Classe di resistenza cls	C32/40
Armatura trasversale simmetrica	–
Armatura a taglio	–
Ripartitori	–

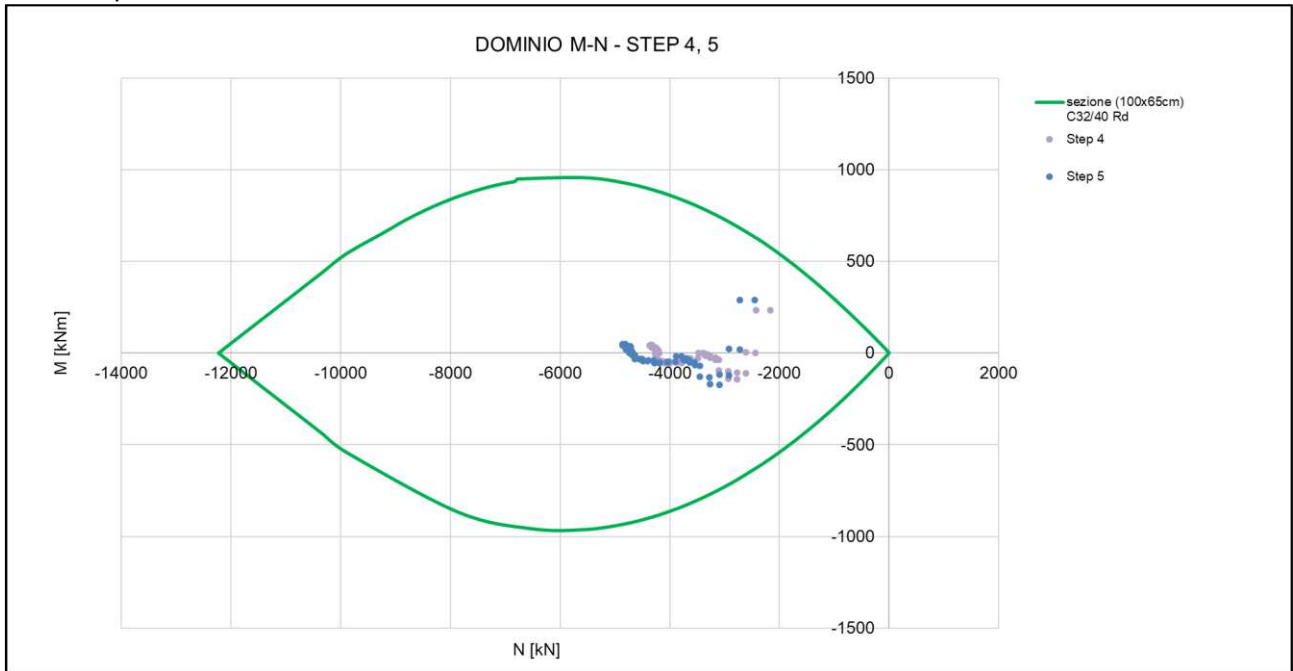
13.2.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

Di seguito si riportano le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo nella seguente condizione:

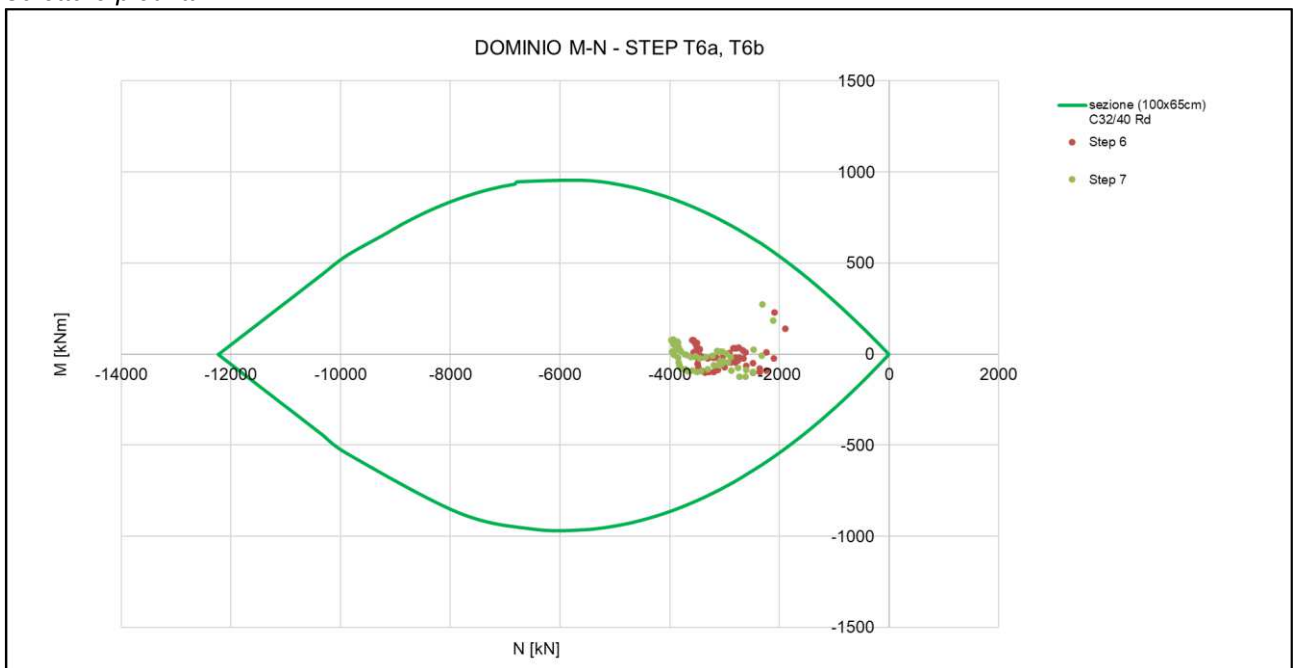
- Step 4 – Carico del terreno a lungo termine, FFS nulle;
- Step 5 - Carico del terreno + carico idraulico;
- Step 7 - Condizioni presenti allo step 5 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 8 - Condizioni presenti allo step 6 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica.

13.2.1.1 Verifiche a pressoflessione

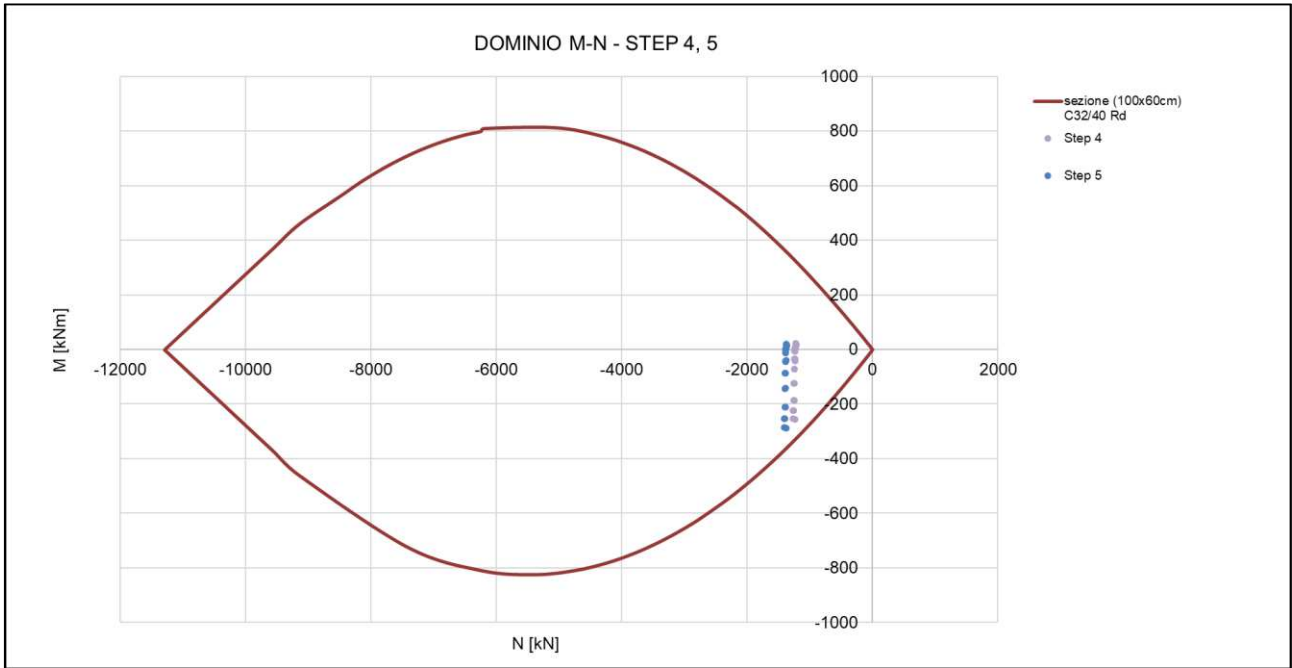
Calotta e piedritti



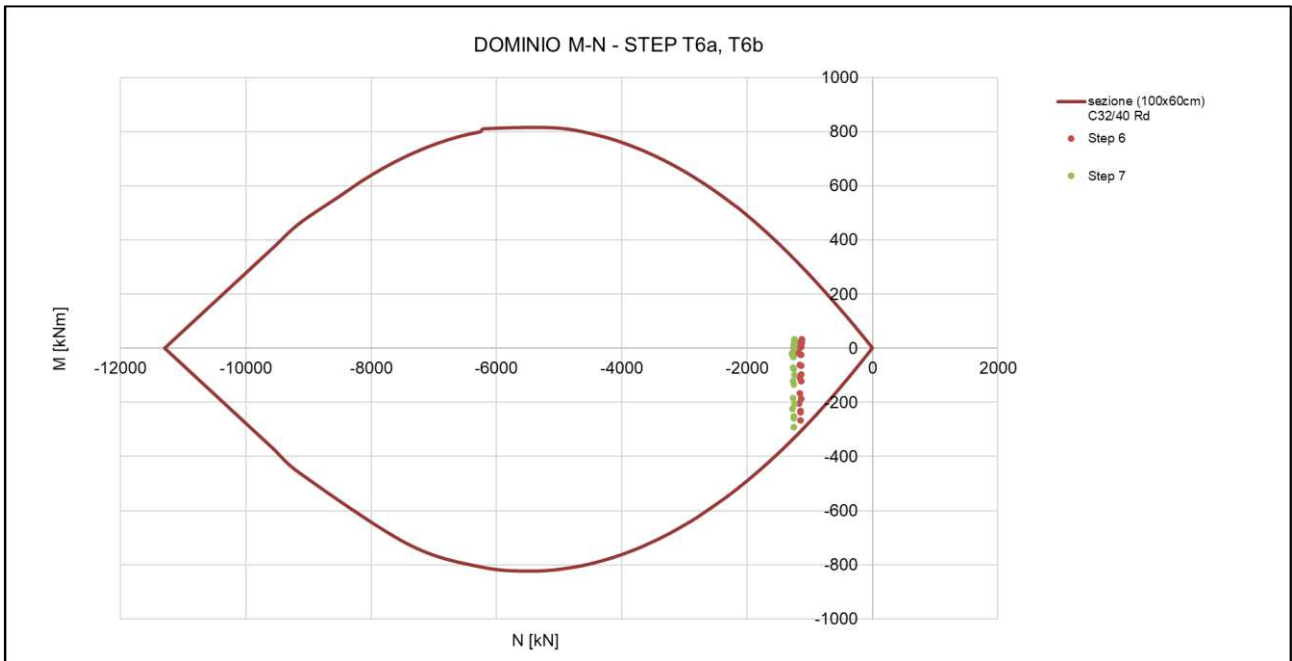
Calotta e piedritti



Arco Rovescio



Arco rovescio

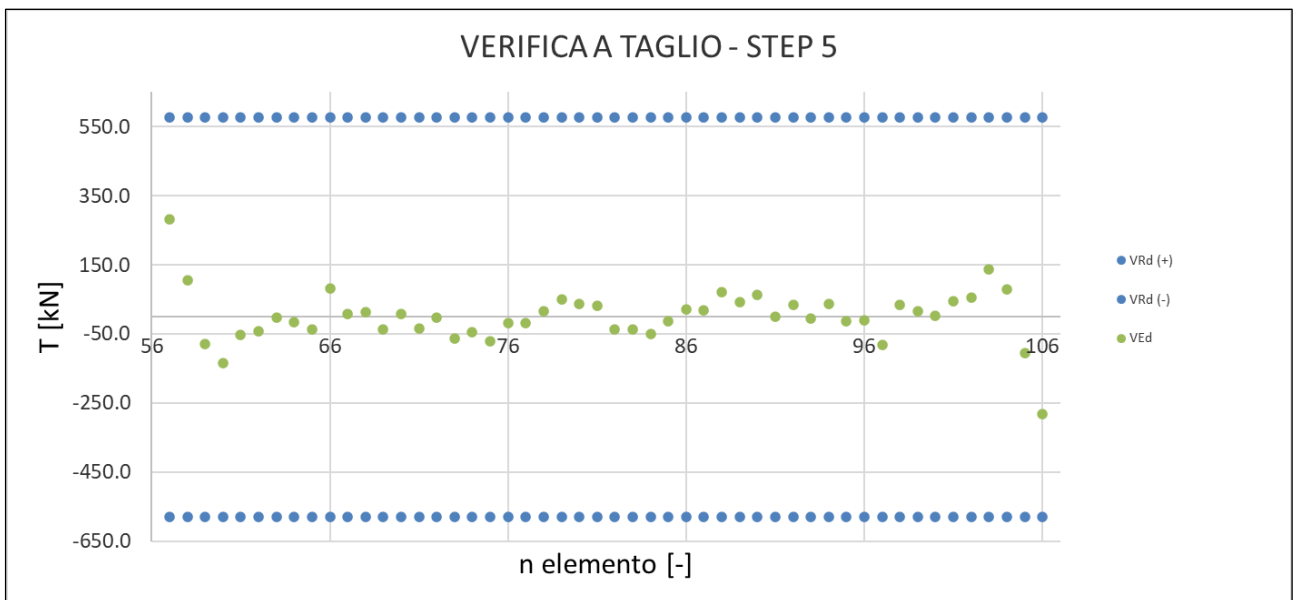
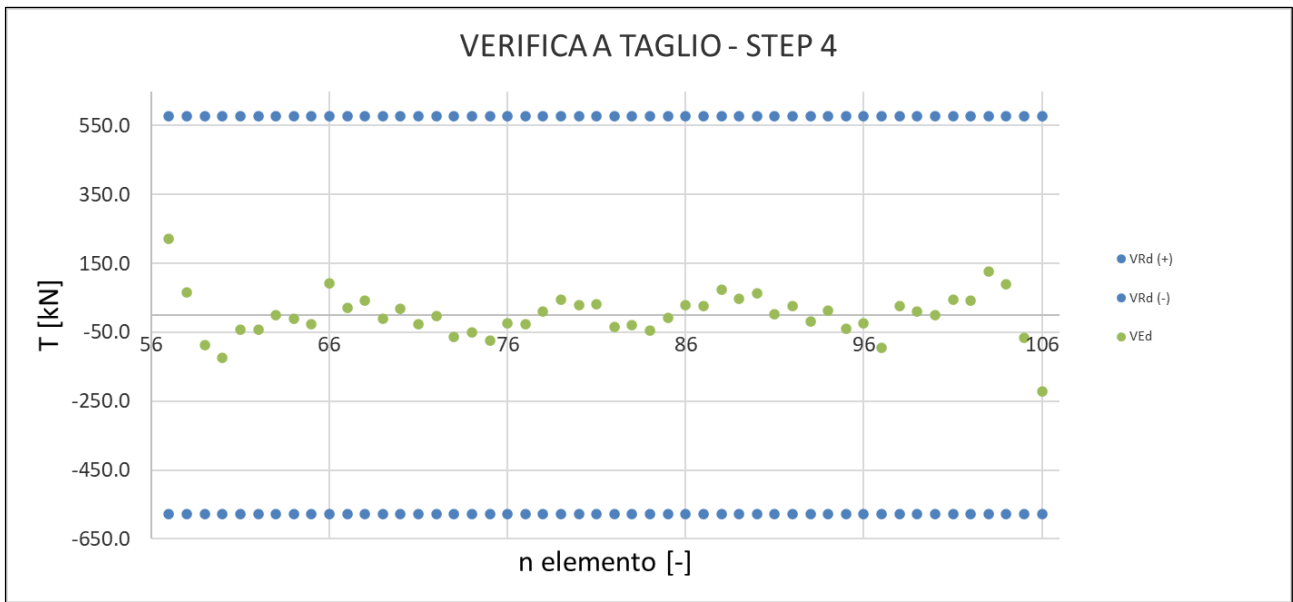


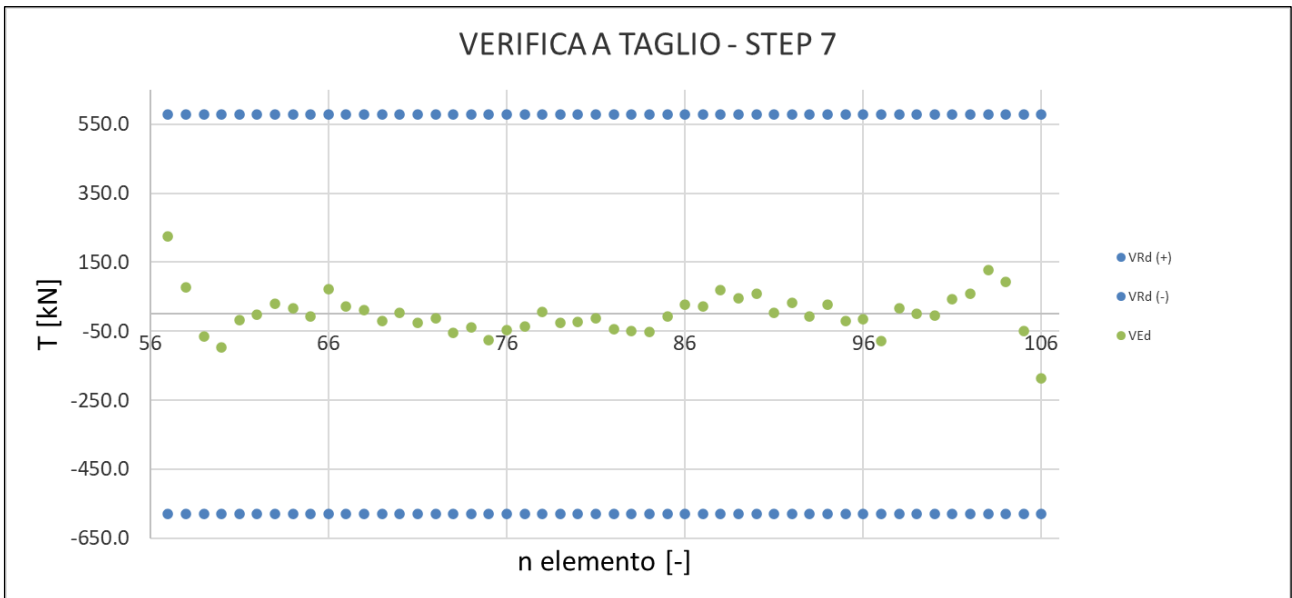
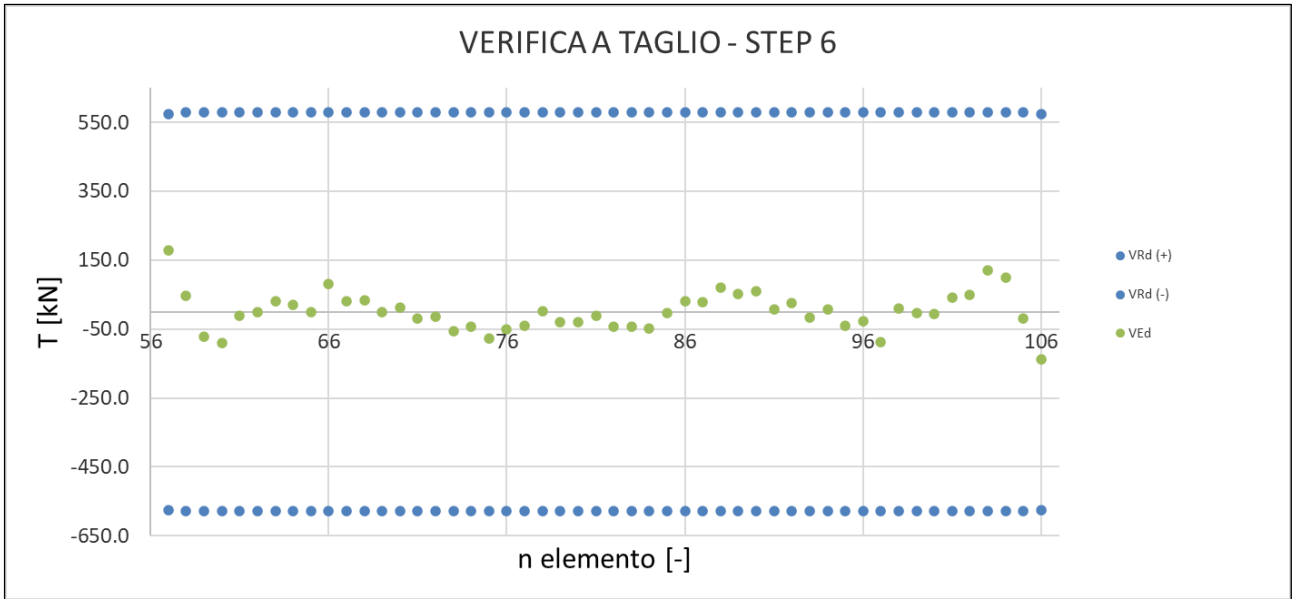
13.2.1.2 Verifiche a taglio

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.

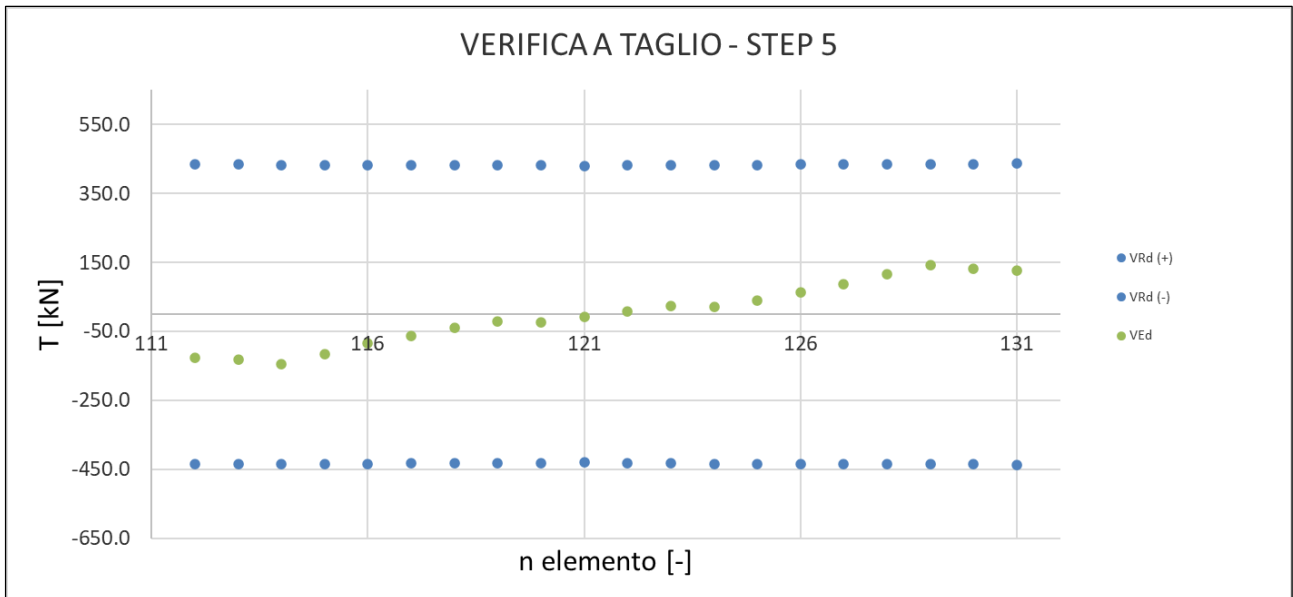
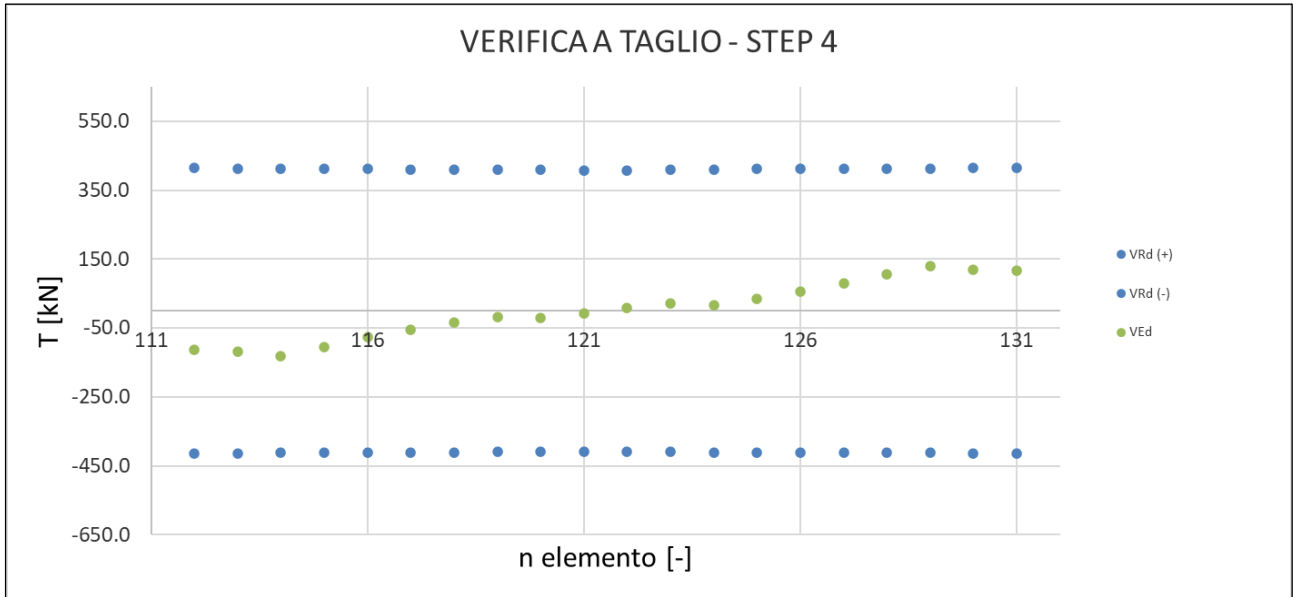
Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a taglio del rivestimento definitivo di calotta e arco rovescio. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate, il relativo valore di taglio.

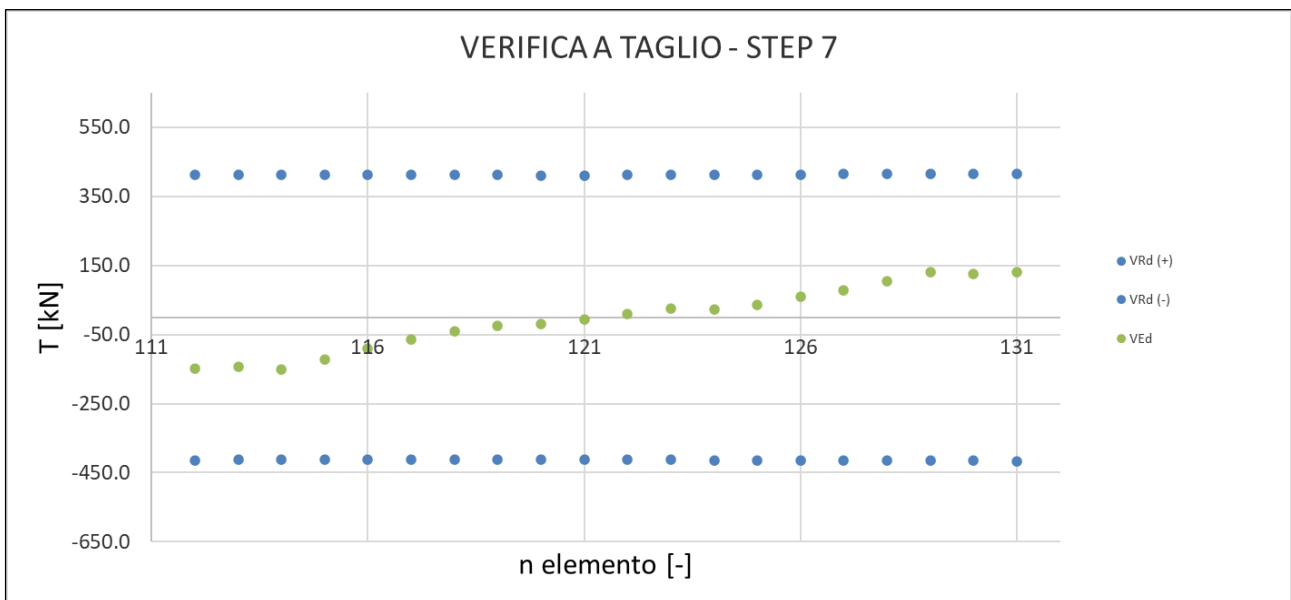
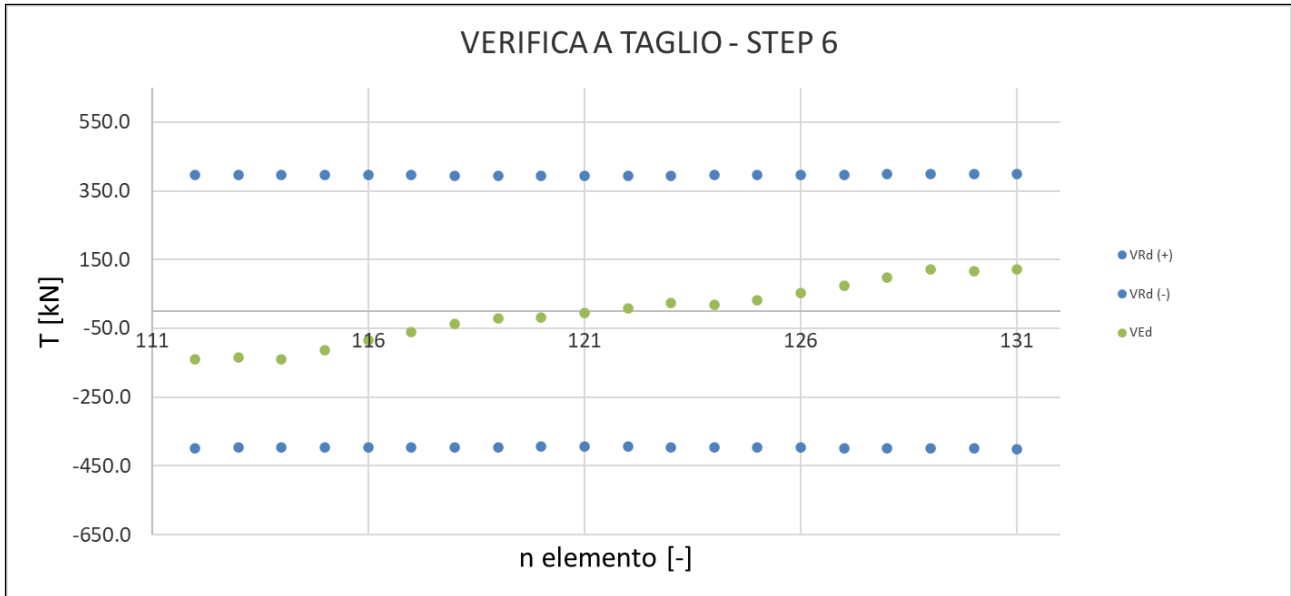
Calotta e piedritti





Arco rovescio





13.2.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 5 – Carico del terreno a lungo termine, FFS nulle
- Step 6 - Carico del terreno + carico idraulico.

13.2.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle tensioni nel calcestruzzo 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

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

Relazione di calcolo – Nicchia impianti alla progr. 2+777.59 m

49

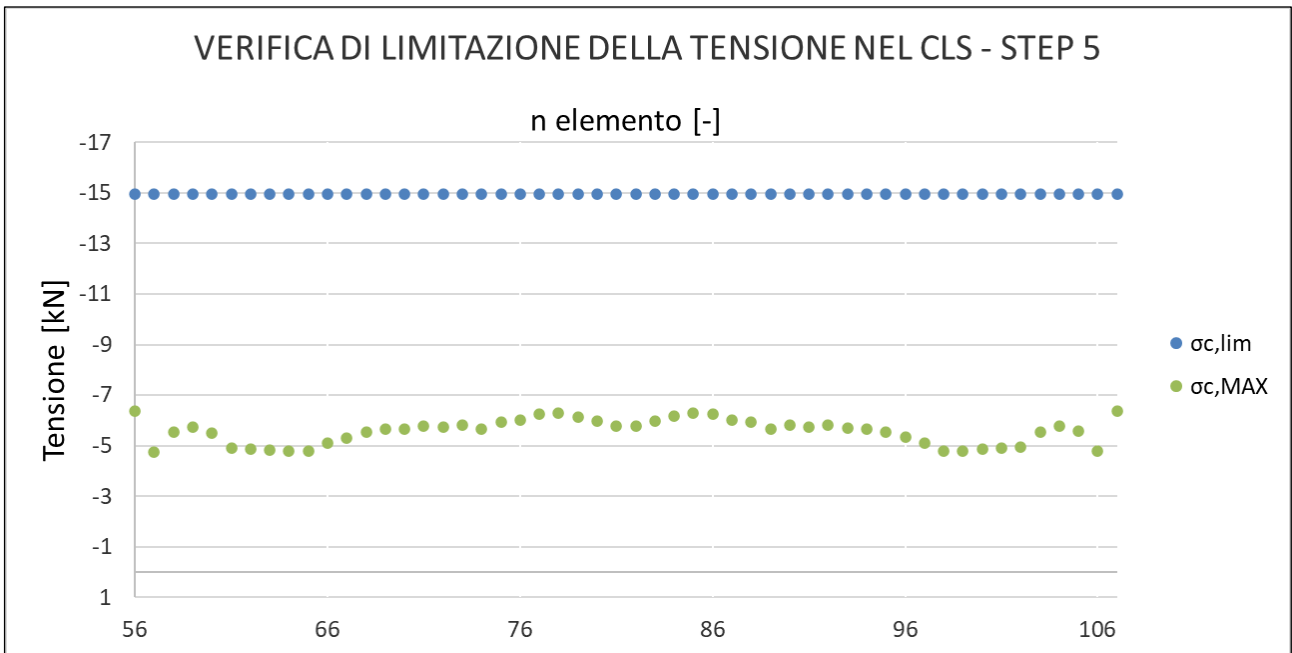
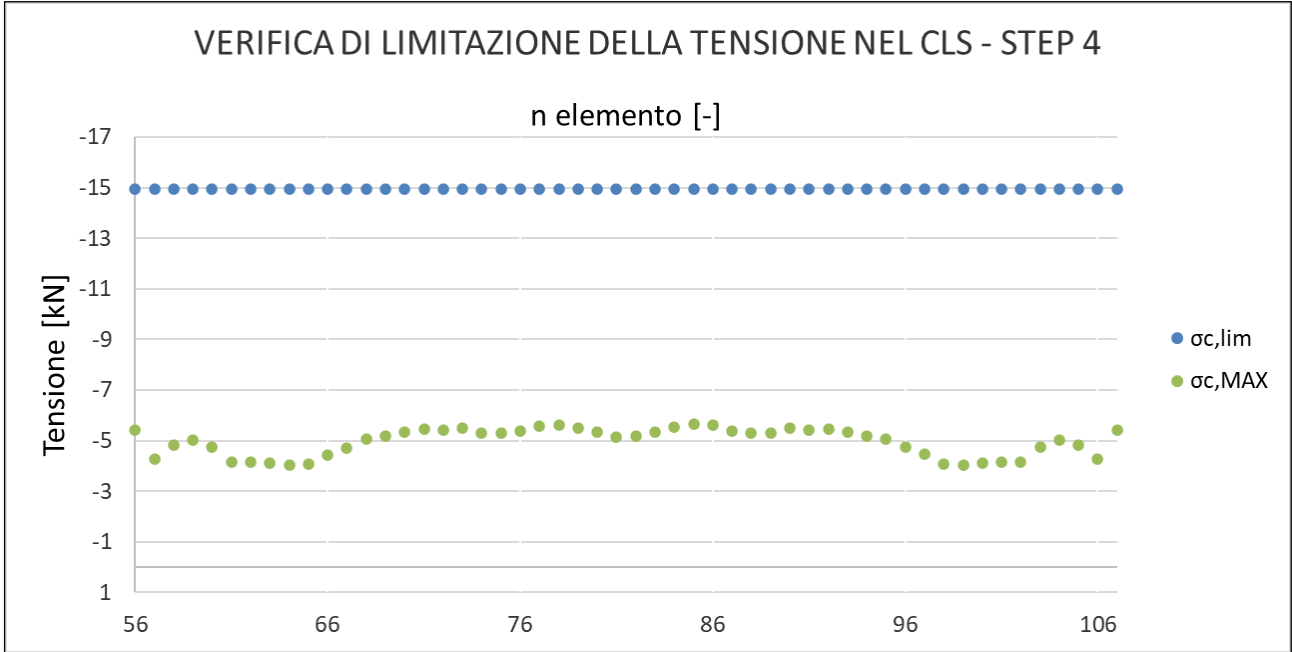
Dove $u = h/2 - e$ corrisponde alla lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia della sezione parzializzata mentre b allo spessore della sezione (1 m).

Affinchè la verifica di limitazione delle tensioni risulti soddisfatta, devono essere valida la seguente disequazione:

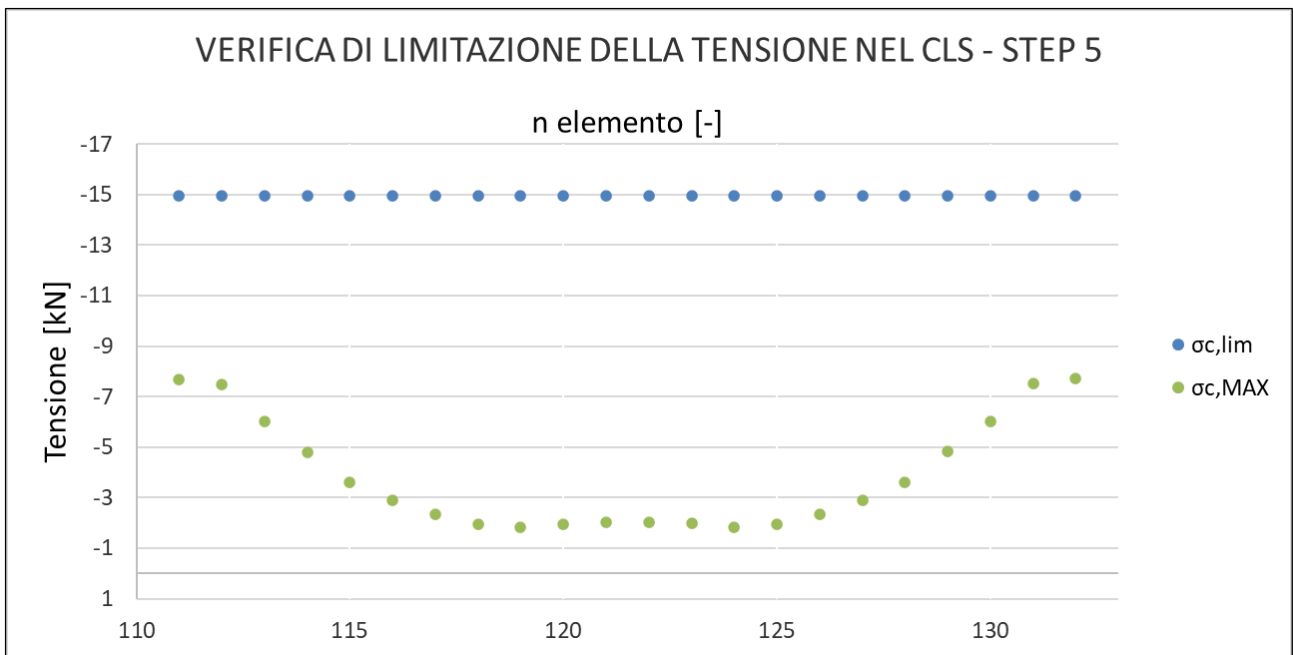
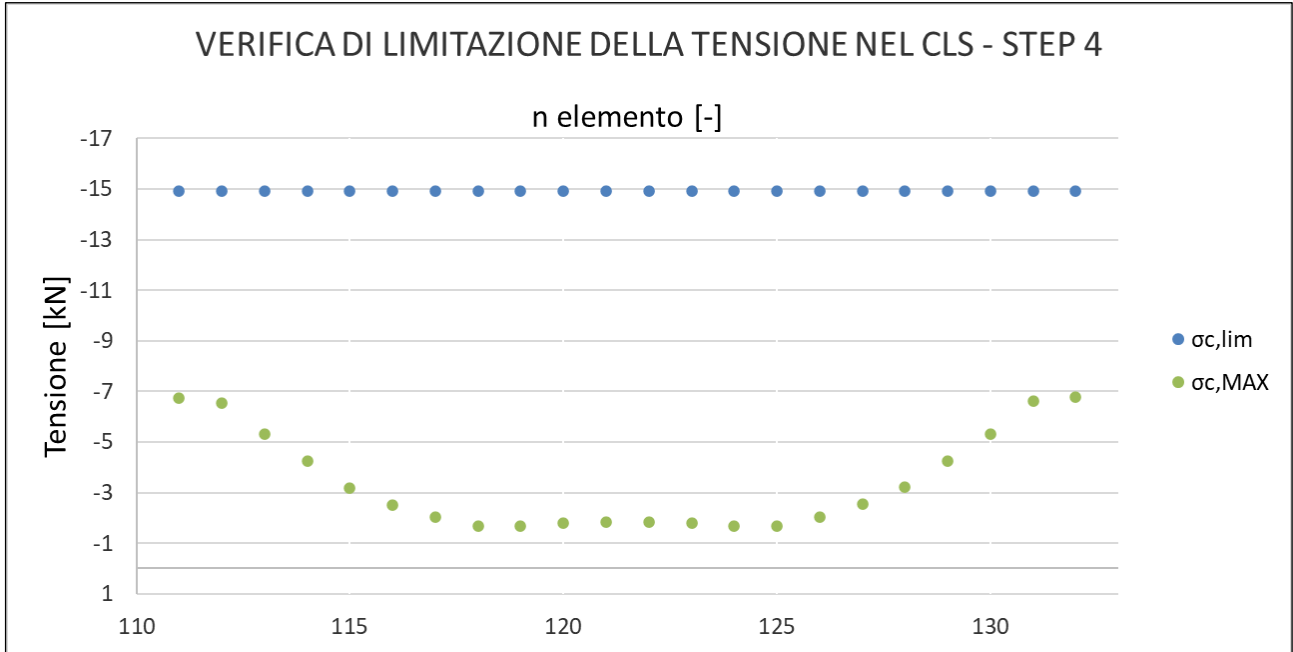
- $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 0.45 \cdot 0.83 \cdot 40 \text{ MPa} = 14.9 \text{ MPa}$
- $\sigma_{s,max} \leq 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 \text{ MPa} = 360 \text{ MPa}$

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.

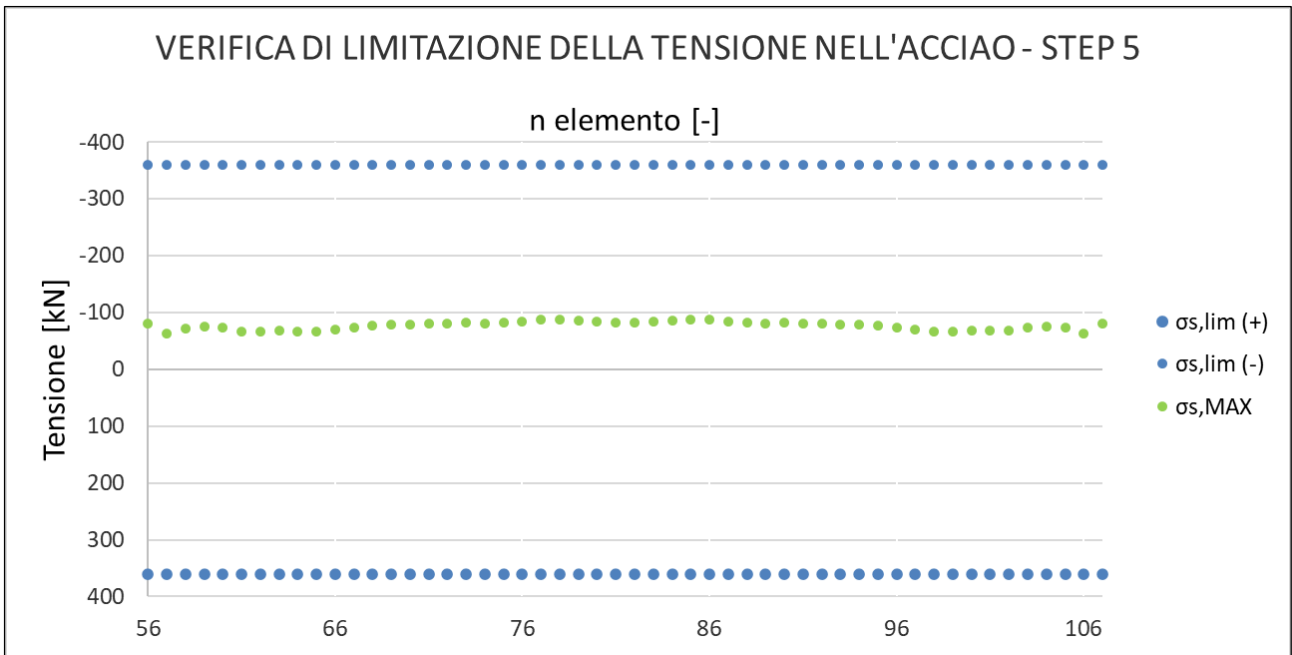
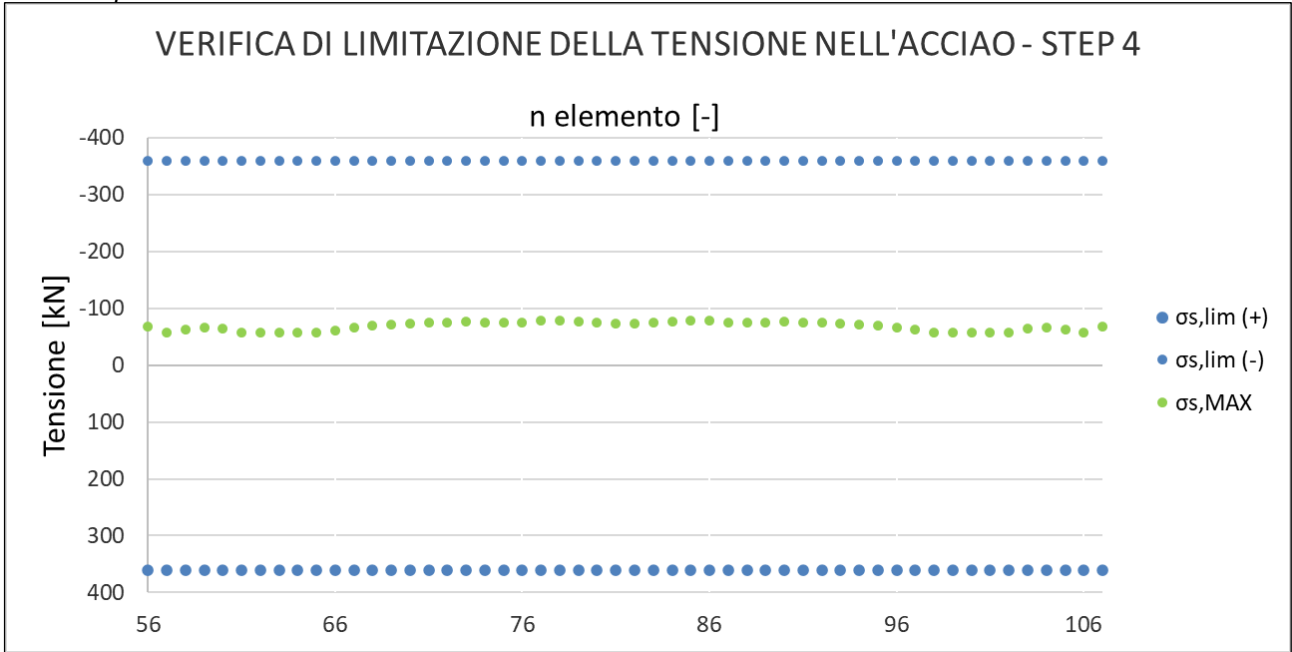
Calotta e piedritti



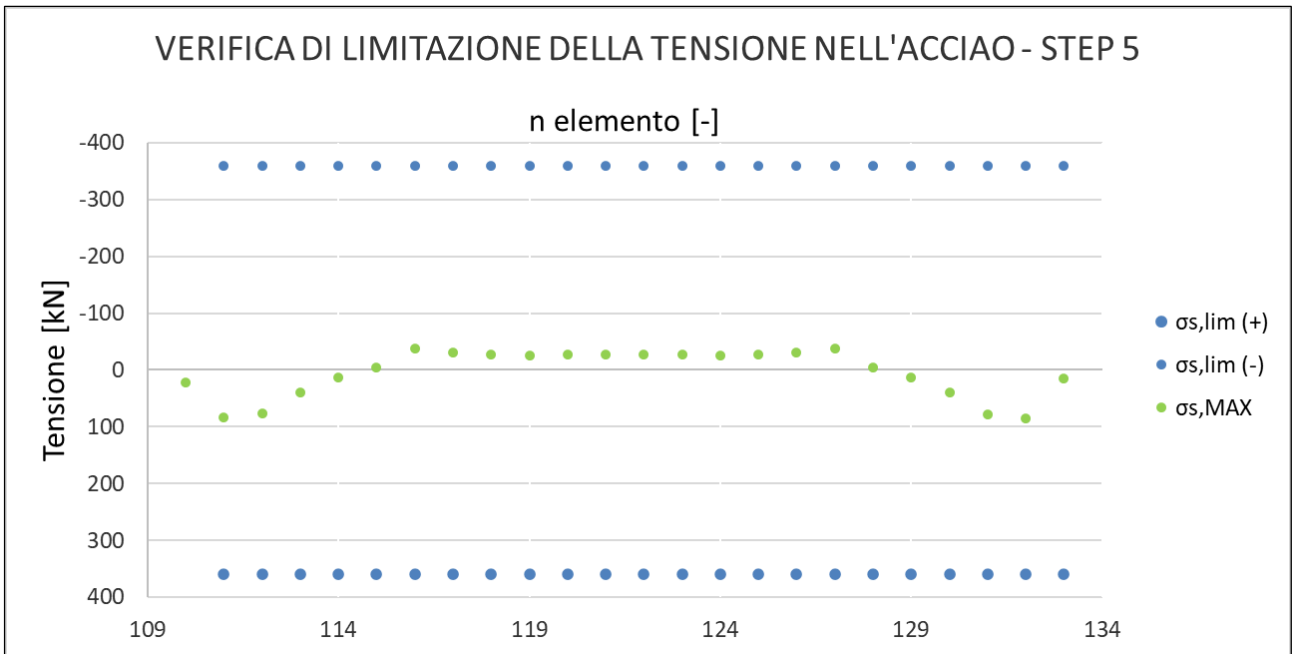
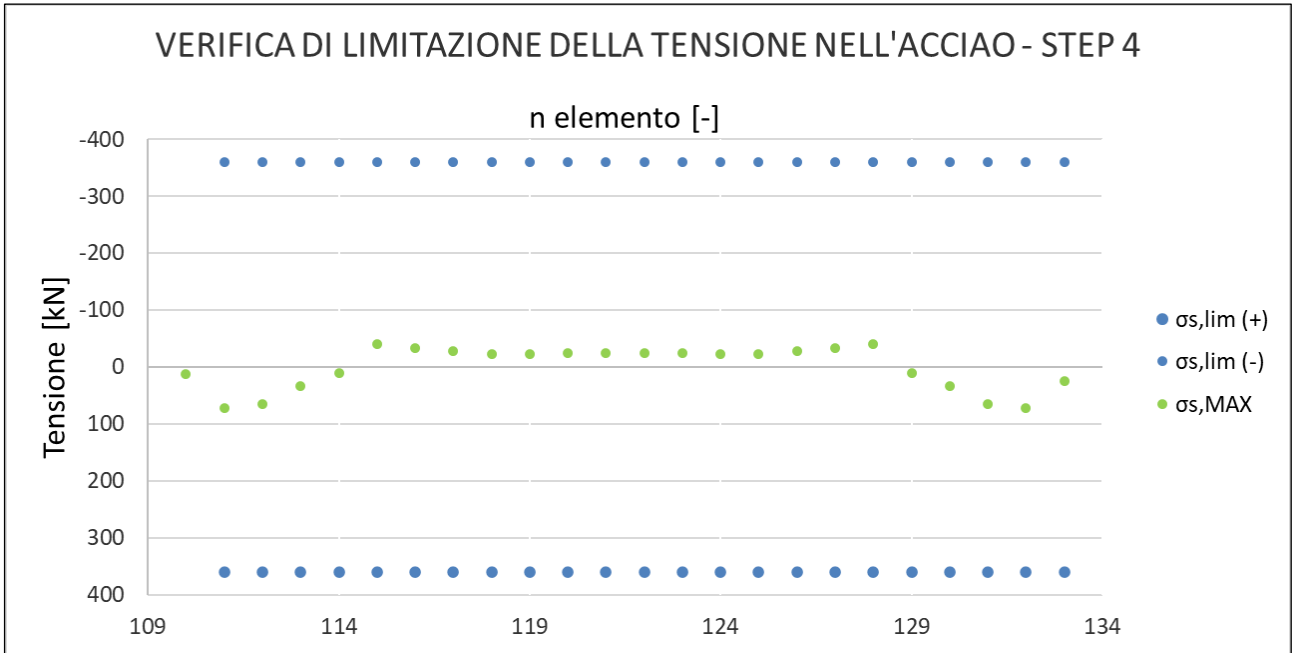
Arco rovescio



Calotta e piedritti



Arco rovescio

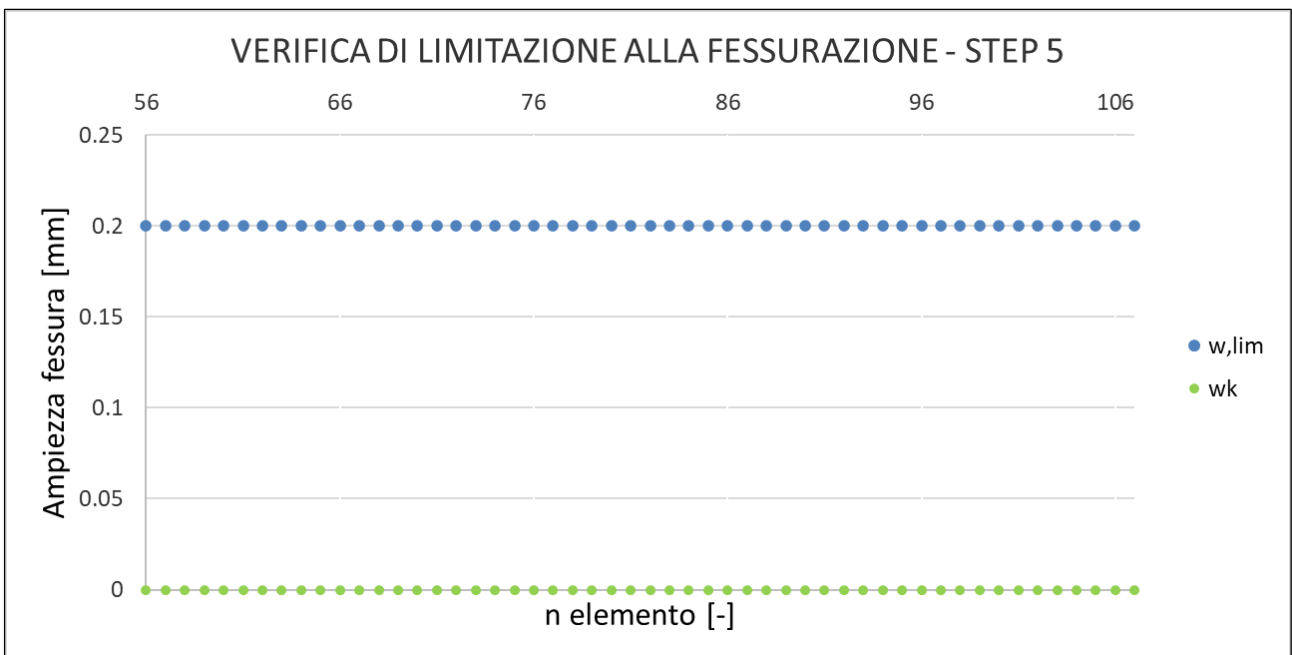
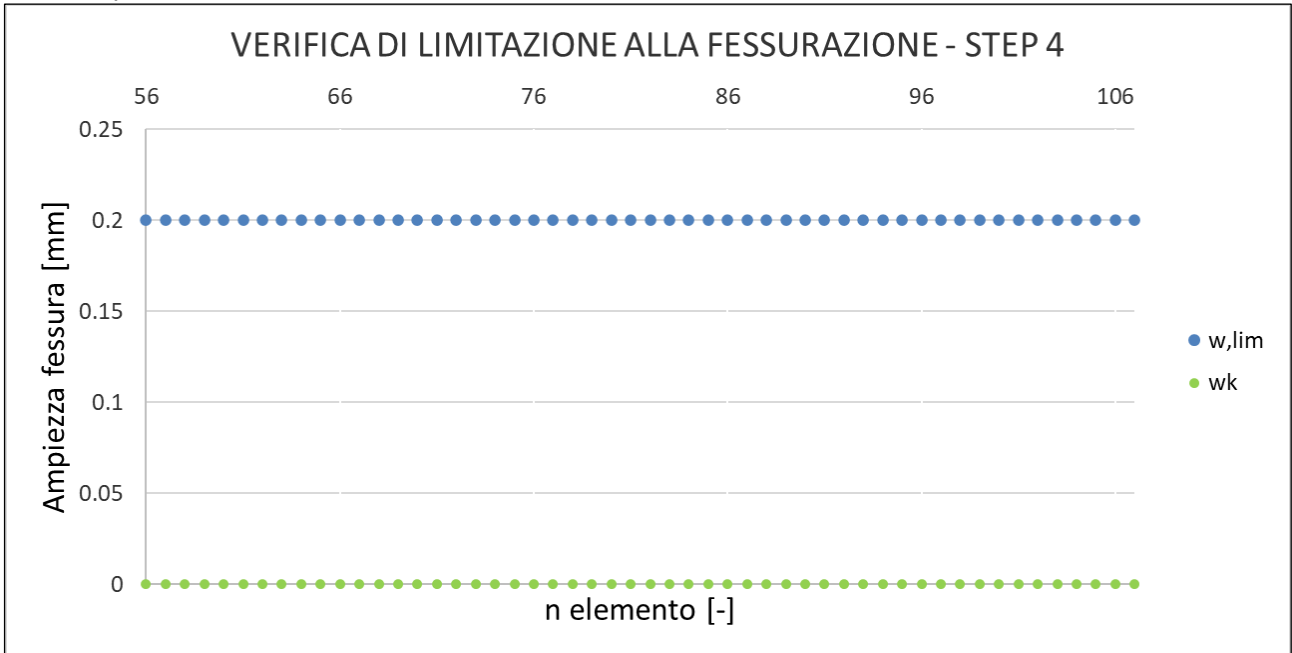


13.2.2.2 Verifica dello stato limite di fessurazione

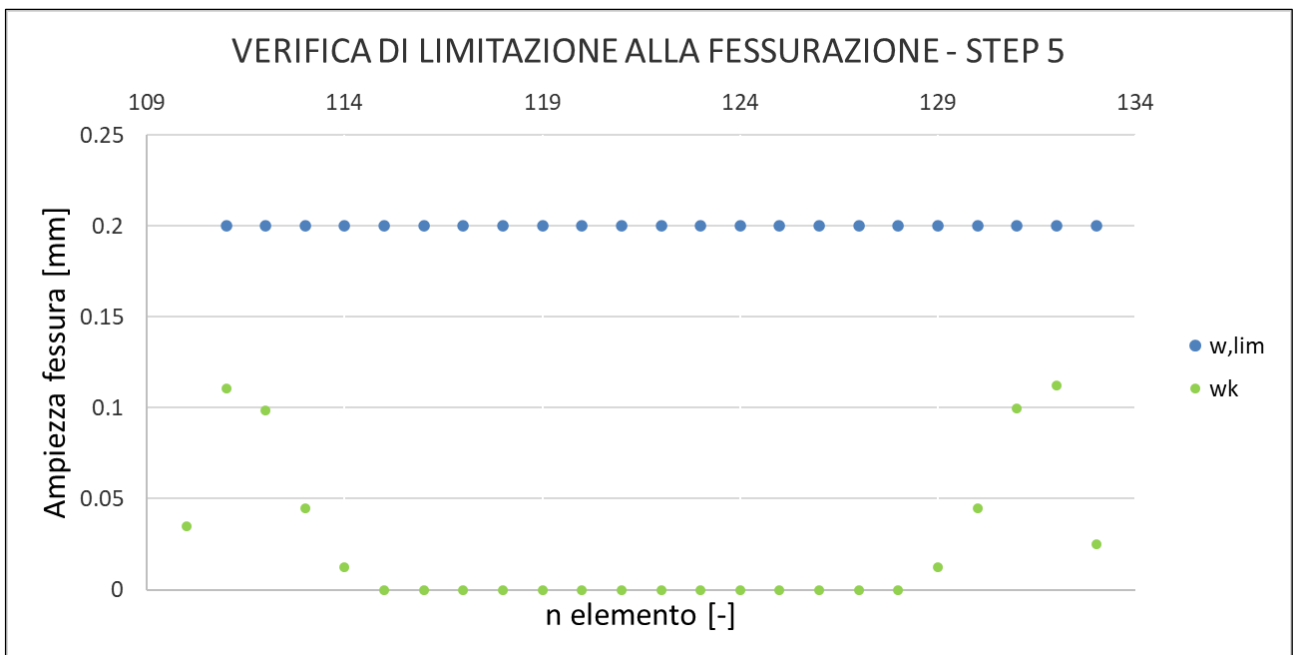
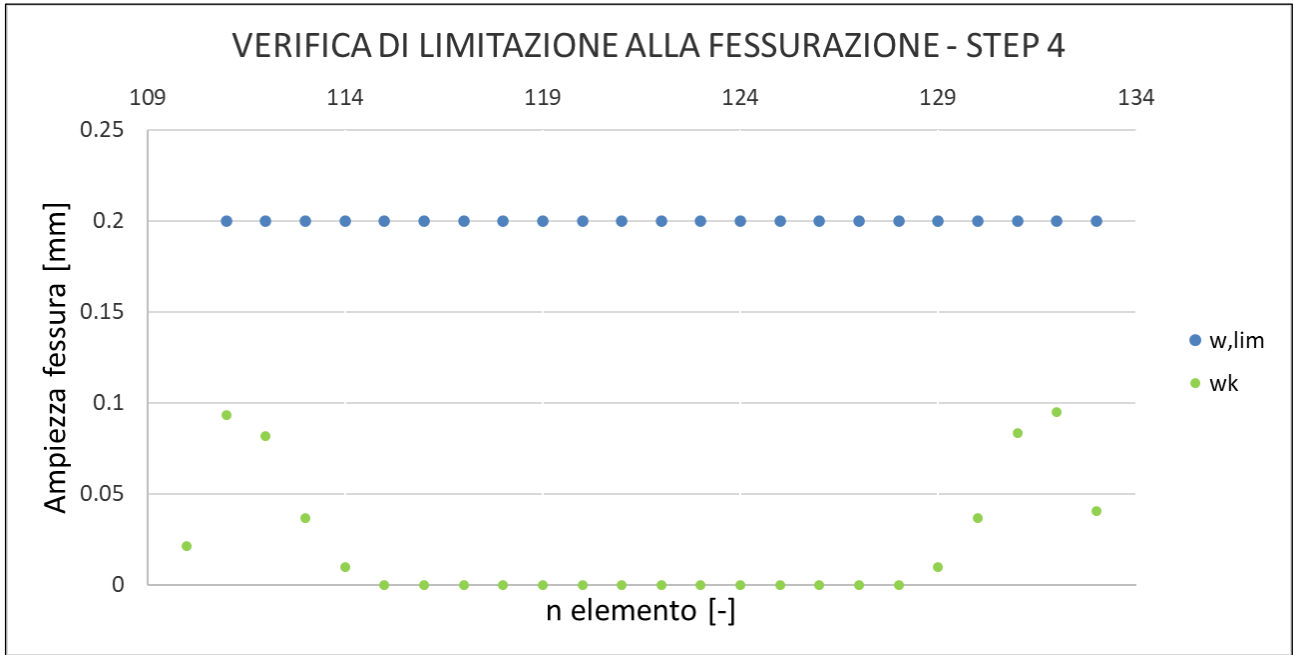
Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle fessure nel rivestimento definitivo della galleria secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.4.5 delle NTC 2018. In particolare, tale verifica è stata effettuata considerando condizioni ambientali aggressive (secondo 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.

Calotta e piedritti



Arco rovescio



RTP di progettazione:



Mandanti:



sinergo