

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 Mezzanatica – Società Pro Iter Srl  
 Albo Geol. Lombardia n. A762

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Massimo Mangini – Società Erre.Vi.A 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**

06.06 - GN.04 - GALLERIA S. ANTONIO

06.06.01 - BY-PASS PEDONALE ALLA PROGR. 7+775

Relazione di calcolo

| CODICE PROGETTO |             |          | NOME FILE           |           | REVISIONE  | SCALA      |
|-----------------|-------------|----------|---------------------|-----------|------------|------------|
| PROGETTO        | LIV. PROG.  | N. PROG. | T00GN05OSTRE01A.pdf |           |            |            |
| L0702M          | E           | 2101     | T00GN05OSTRE01      |           | 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 autoperforanti .....           | 5  |
| 3.4   | Acciaio per cemento armato tipo B450C .....                 | 5  |
| 3.5   | Acciaio per centine S275 .....                              | 5  |
| 3.6   | Autoperforanti R38N .....                                   | 5  |
| 4     | CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA .....                        | 6  |
| 5     | CARATTERIZZAZIONE SISMICA .....                             | 7  |
| 6     | FASI ESECUTIVE E DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO .....       | 8  |
| 6.1.1 | <i>Fasi esecutive</i> .....                                 | 8  |
| 6.1.2 | <i>Fase 1</i> .....   | 8  |
| 6.1.3 | <i>Fase 2</i> .....   | 8  |
| 6.1.4 | <i>Fase 3</i> .....   | 8  |
| 6.1.5 | <i>Fase 4</i> .....   | 8  |
| 6.1.6 | <i>Fase 5</i> .....   | 8  |
| 6.1.7 | <i>Fase 6</i> .....   | 8  |
| 6.2   | Sezione tipo della galleria naturale – stato di fatto ..... | 8  |
| 6.3   | Sezione tipo del Bypass .....                               | 9  |
| 7     | DESCRIZIONE DELL'ANALISI .....                              | 10 |
| 7.1   | Modello di calcolo .....                                    | 10 |
| 7.1.1 | <i>Geometria</i> .....                                      | 10 |
| 7.1.2 | <i>Legame costitutivo dell'ammasso</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 .....   | 18 |

Relazione di calcolo - By-pass pedonale alla progr. 7+775 m

RTP di progettazione:

Mandataria:



Mandanti:



|          |   |    |
|----------|---|----|
| 8        | VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....   | 19 |
| 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      | Gallerie Naturali - Rivestimento definitivo .....   | 21 |
| 8.2.1    | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 21 |
| 8.2.2    | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 21 |
| 8.2.3    | Risultati .....   | 22 |
| 8.3      | Bypass - Rivestimento di prima fase.....  | 23 |
| 8.3.1    | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 23 |
| 8.3.2    | Risultati .....   | 23 |
| 8.4      | Bypass - Rivestimento definitivo.....   | 24 |
| 8.4.1    | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 24 |
| 8.4.2    | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 24 |
| 8.4.3    | Risultati .....   | 24 |
| 9        | VERIFICA DEGLI INNESTI CON LA GALLERIA PRINCIPALE .....   | 25 |
| 9.1      | Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo - Fasi di lavorazione ..... | 27 |
| 9.1.1    | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 27 |
| 9.1.2    | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 27 |
| 9.1.3    | Risultati .....   | 27 |
| 9.2      | Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo.....                        | 28 |
| 9.2.1    | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 28 |
| 9.2.2    | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 28 |
| 9.2.3    | Risultati .....   | 28 |
| 9.3      | Dimensionamento dell'architrave.....  | 29 |
| 10       | CONCLUSIONI .....   | 31 |
| 11       | ELENCO ALLEGATI.....  | 32 |
| 12       | ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE .....  | 33 |
| 13       | ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL'ANALISI .....  | 35 |
| 14       | ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....  | 69 |
| 14.1     | Gallerie Naturali - Rivestimento definitivo .....   | 69 |
| 14.1.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 69 |
| 14.1.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 70 |
| 14.1.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 72 |
| 14.1.2   | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 80 |

Relazione di calcolo - By-pass pedonale alla progr. 7+775 m

RTP di progettazione:

Mandataria:



Mandanti:



|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 14.1.2.1 | Verifica di limitazione delle tensioni .....  | 80  |
| 14.2     | Bypass - Rivestimento di prima fase.....  | 83  |
| 14.2.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 83  |
| 14.2.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 83  |
| 14.2.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 84  |
| 14.3     | Bypass - Rivestimento definitivo .....  | 85  |
| 14.3.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 85  |
| 14.3.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 86  |
| 14.3.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 88  |
| 14.3.2   | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 94  |
| 14.3.2.1 | Verifica di limitazione delle tensioni .....  | 94  |
| 14.3.2.2 | Verifica dello stato limite di fessurazione .....   | 96  |
| 15       | ALLEGATO 4 – VERIFICA DEGLI INNESTI CON LA GALLERIA PRINCIPALE .....                            | 98  |
| 15.1     | Sezione d’innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo - Fasi di lavorazione ..... | 98  |
| 15.1.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 98  |
| 15.1.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 99  |
| 15.1.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 99  |
| 15.1.2   | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 102 |
| 15.2     | Sezione d’innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo.....                        | 103 |
| 15.2.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 103 |
| 15.2.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 103 |
| 15.2.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 104 |
| 15.2.2   | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 107 |
| 15.2.2.1 | Verifica di limitazione delle tensioni .....  | 107 |
| 15.3     | Dimensionamento dell’architrave.....  | 110 |
| 15.3.1   | Verifiche a Stato Limite Ultimo .....   | 111 |
| 15.3.1.1 | Verifiche a pressoflessione.....  | 111 |
| 15.3.1.2 | Verifiche a taglio.....   | 113 |
| 15.3.2   | Verifiche a Stato Limite di Esercizio .....   | 114 |

## 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 e definitivi del bypass di collegamento tra le due canne della galleria S. Antonio e dei relativi innesti.

Il bypass si innesta nella canna di transito alla progressiva 7+772.83, prosegue in direzione Nord, parallelamente alle due gallerie, per circa 24 m e si ricollega con la galleria di servizio alla progressiva 7+796.39, superando un dislivello tra i marciapiedi delle due canne di 1.3 m. La geometria del cunicolo, riportato in pianta in Figura 1, garantisce una pendenza media del tracciato inferiore all'8% ed uno sviluppo lineare delle rampe inferiore a 6.25m, in ottemperanza alla normativa antincendio sulla via di esodo per persone disabili. La sezione tipo ospita una piattaforma pedonale di larghezza pari a 2.65 m e una altezza massima di 3.15 m.

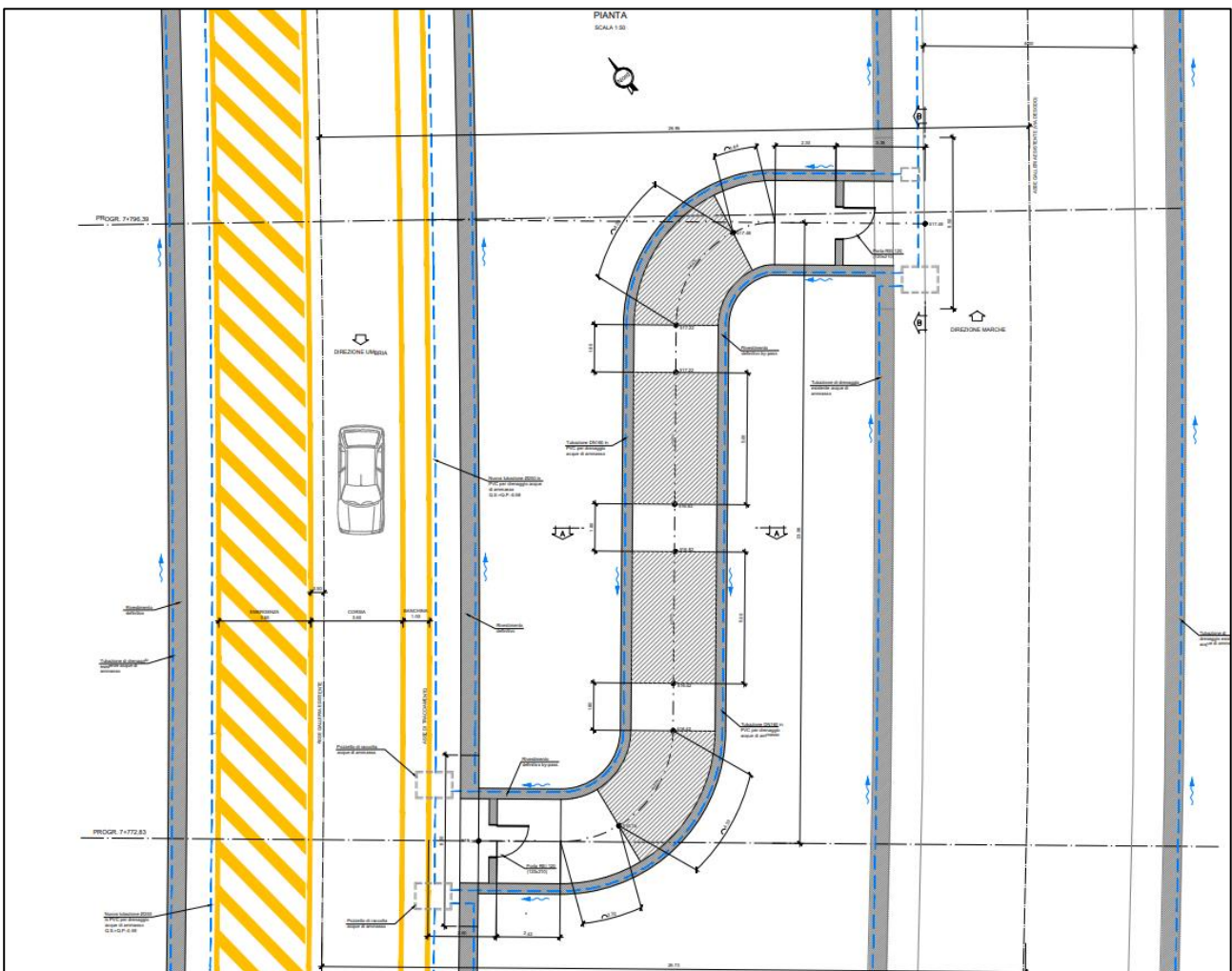


Figura 1 – Planimetria del tracciato del bypass [6]

Le fasi esecutive prevedono la demolizione del rivestimento definitivo esistente nelle gallerie naturali in corrispondenza degli innesti e la messa in sicurezza dell'ammasso non supportato mediante chiodature. I primi sfondi sono eseguiti da entrambe gli innesti, successivamente lo scavo procede in una sola direzione, a seconda delle esigenze di lavorazione. Una volta terminato il getto del rivestimento definitivo nel bypass, viene realizzata la struttura d'innesto in c.a. agli innesti.

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 dei rivestimenti del bypass (Paragrafo 8) prevede inizialmente una back-analysis della galleria S. Antonio, a partire dallo scavo delle due canne 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.

A partire dallo stato di fatto viene dimensionato il rivestimento di prima fase, costituito da centine e betoncino spruzzato, il portale in calcestruzzo armato agli innesti e il rivestimento definitivo del cunicolo.

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.

## 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]. T00GN03OSTRE01B – Galleria S. Antonio - Bypass - Relazione di calcolo
- [4]. T00GN01OSTRE04B - Galleria Guinza - Relazione geomeccanica
- [5]. T00GE00GETRE02B - Geotecnica – Relazione sismica

### 2.3 Documenti del Progetto Esecutivo

- [6]. T00GN05OSTST01A – Galleria S. Antonio – Bypass pedonale alla prog. 7+775 - Architettonico - Tav. 1/2
- [7]. T00GN05OSTSE01A – Galleria S. Antonio – Bypass pedonale alla prog. 7+775 – Fasi esecutive
- [8]. T00SG05GENRE01A - Indagini 2022 - Relazione sulle indagini strutturali
- [9]. T00GN00OSTRE02A – Relazione geomeccanica
- [10]. T00SG03GENRE03A - As built e documentazione storica – Galleria S. Antonio
- [11]. T00GN05OSTST03A – Galleria S. Antonio – Bypass pedonale alla prog. 7+775 - Scavo e consolidamento
- [12]. T00GN01OSTRE01A – Galleria Guinza - Relazione di calcolo - Intervento Tipo A - Sezione corrente
- [13]. T00GN01OSTRE03A – Galleria Guinza - Relazione di calcolo - Nicchia impianti alla progr. 2777.59 m
- [14]. T00GN05OSTCP02A – Galleria S. Antonio – Bypass pedonale alla prog. 7+775 – Carpenteria
- [15]. T00GN05OSTAR01A – Galleria S. Antonio – Bypass pedonale alla prog. 7+775 – Armatura

### 2.4 Bibliografia

- [16]. Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006) Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203-215.
- [17]. Itasca Consulting Group, Inc. (2019) FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.1. User's Manual. Minneapolis: Itasca.
- [18]. 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.
- [19]. 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                                     | $E_c = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3}$ | = 33642.8 | 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 fibrorinforzato

|                                  |                      |
|----------------------------------|----------------------|
| Classe di resistenza             | C20/25               |
| a 48h                            | >13MPa               |
| a 28gg                           | >25MPa               |
| Rapporto massimo acqua / cemento | <0.50                |
| Dosaggio in fibre                | ≥30kg/m <sup>3</sup> |

|   |  |           |                   |
|---|--|-----------|-------------------|
| Resistenza caratteristica a compressione cubica     | $R_{ck} =$                             | <b>25</b> | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistenza caratteristica a compressione cilindrica | $f_{ck} = 0.83 \times R_{ck}$          | = 20.75   | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistenza media a compressione cilindrica          | $f_{cm} = f_{ck} + 8$                  | = 28.75   | N/mm <sup>2</sup> |
| Modulo elastico                                     | $E_c = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3}$ | = 30200   | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistenza a trazione semplice                      | $f_{ctm} = 0.30 \times f_{ck}^{2/3}$   | = 2.27    | N/mm <sup>2</sup> |



|   |   |   |                         |
|---|---|---|-------------------------|
| Resistenza a trazione caratteristica (frattile 5%)    | $f_{ctk} = 0.70 \times f_{ctm}$                 | = | 1.59 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b>Stato Limite Ultimo</b>                            |   |   |                         |
| Coefficiente parziale di sicurezza                    | $\gamma_C =$                                    |   | 1.5 --                  |
| Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata | $\alpha_{cc} =$                                 |   | 0.85 --                 |
| Resistenza a compressione di calcolo                  | $f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_C$ | = | 11.76 N/mm <sup>2</sup> |
| Resistenza a trazione di calcolo                      | $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C$                  | = | 1.06 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b>Stato Limite di Esercizio</b>                      |   |   |                         |
| Tensione max di compressione - Comb. rara             | $\sigma_c < 0.60 \times f_{ck}$                 | = | 12.45 N/mm <sup>2</sup> |
| Tensione max di compressione - Comb. quasi permanente | $\sigma_c < 0.45 \times f_{ck}$                 | = | 9.34 N/mm <sup>2</sup>  |

### 3.3 Malta per la cementazione di autoporforanti

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

### 3.4 Acciaio per cemento armato tipo B450C

|  |                                 |          |                   |
|--|---------------------------------|----------|-------------------|
| Tensione caratteristica di rottura (frattile 5%)     | $f_{tk} =$                      | 540.00   | N/mm <sup>2</sup> |
| Tensione caratteristica di snervamento (frattile 5%) | $f_{yk} =$                      | 450.00   | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Stato Limite Ultimo</b>                           |                                 |          |                   |
| Coefficiente parziale di sicurezza                   | $\gamma_S =$                    | 1.15     | -                 |
| Resistenza a trazione di calcolo                     | $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$    | = 391.30 | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Stato Limite di Esercizio</b>                     |                                 |          |                   |
| Tensione max di trazione                             | $\sigma_s < 0.80 \times f_{yk}$ | = 360.00 | N/mm <sup>2</sup> |

### 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> |
| <b>Stato Limite Ultimo</b>             |                              |         |                   |
| 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 Autoporforanti R38N

|                      |            |        |    |
|----------------------|------------|--------|----|
| Carico a rottura     | $N_{tk} >$ | 500.00 | kN |
| Carico a snervamento | $N_{yk} >$ | 400.00 | kN |

## 4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

La galleria si sviluppa interamente nella formazione flyshoide Marnoso Arenacea, caratterizzata da alternanze di arenarie e marne più o meno argillitiche. I parametri geomeccanici dell'ammasso impiegati nell'analisi sono definiti sulla base dei risultati della campagna geognostica 2022 eseguita nella Galleria S. Antonio, in corrispondenza dell'innesto con il bypass [6][9].

Al fine di massimizzare i carichi agenti sui rivestimenti di prima fase e definitivi il volume di terreno al di sopra della calotta è stato interamente modellato con i parametri dell'ammasso roccioso.

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:  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
- Resistenza a compressione monoassiale di matrice:  $\sigma_{ci} = 20 \text{ MPa}$
- Parametro dell'involuppo di rottura:  $m_i = 10$
- Modulo di deformazione della roccia intatta:  $E_i = 12 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson:  $\nu = 0.25$
- Fattore di disturbo:  $D = 0.2$

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 Hoek e Diederichs (2006) [16].

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 30 m:

| Formazione | GSI | $\gamma \text{ [kN/m}^3\text{]}$ | $\phi'$ | $\phi'_{res}$ | $c' \text{ [kPa]}$ | $c'_{res} \text{ [kPa]}$ | $\nu \text{ [-]}$ | $E_r \text{ [MPa]}$ | $K_0$ |
|------------|-----|----------------------------------|---------|---------------|--------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|-------|
| FMA5       | 50  | 25                               | 49.5    | 40.8          | 205                | 100                      | 0.25              | 2780                | 1     |

**Tabella 4.1 : Parametri geomeccanici**

Analogamente al Progetto Definitivo, viene cautelativamente considerata una quota di falda pari a 6 m sopra la chiave calotta per modellare l'interferenza fra la falda acquifera e il bypass.

## 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 | $T_R$<br>[anni] | $a_g$<br>[g] | $F_0$<br>[-] | $T_c^*$<br>[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 B e una categoria topografica T1.

- $S_s = 1.2$ ;
- $S_T = 1$ .

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

$$a_{max} = a_g S_s S_T = 0.346 \text{ g.}$$

## 6 FASI ESECUTIVE E DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO

### 6.1.1 Fasi esecutive

Lo scavo del bypass prevede la demolizione dei tratti di galleria Naturale interessati dall'innesto del cunicolo, seguito dallo scavo a piena sezione dello stesso. La cavità è supportata mediante un rivestimento di prima fase costituito da betoncino fibrorinforzato e centine e mediante un rivestimento definitivo in calcestruzzo armato. Nella tratta di innesto con le Gallerie Naturali è prevista la realizzazione di un portale in c.a..

Sono di seguito riportate le fasi esecutive dell'intervento [7].

### 6.1.2 Fase 1

- Chiodatura delle gallerie esistenti nel tratto dove andrà eseguito lo scavo del bypass.

### 6.1.3 Fase 2

- Rimozione parziale del rivestimento definitivo e del rivestimento di prima fase delle gallerie naturali nel tratto di interferenza con lo scavo del bypass per una lunghezza pari alla larghezza del bypass (4.5 m), estesa di 1 m a monte e a valle del cunicolo, preservando l'impermeabilizzazione in modo da consentirne la successiva ripresa.
- Taglio delle centine

### 6.1.4 Fase 3

- Scavo innesti per i primi 3 sfondi su entrambe le gallerie (lo scavo potrà essere eseguito da entrambe le gallerie)

### 6.1.5 Fase 4

- Scavo a piena sezione del bypass per sfondi max pari a 1.2 m 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 20 cm;
- Esecuzione di uno strato di betoncino proiettato di regolarizzazione di spessore 5 cm

### 6.1.6 Fase 5

- Scavo ed esecuzione del rivestimento definitivo in arco rovescio (c.a. – spessore 45 cm)
- Posa in opera del sistema di impermeabilizzazione in calotta
- Esecuzione del rivestimento definitivo in calotta (c.a. – spessore 40 cm)

### 6.1.7 Fase 6

- Esecuzione del rivestimento definitivo della galleria naturale in corrispondenza degli innesti
- Taglio delle teste dei chiodi eseguiti precedentemente (vedi FASE 1)

## 6.2 Sezione tipo della galleria naturale – stato di fatto

Le caratteristiche del rivestimento di prima fase e del rivestimento definitivo sono definite sulla base della documentazione di Progetto Esecutivo (1997) e sulle tavole as-built a disposizione [6].

Lo scavo è stato realizzato a piena sezione con sfondi di profondità massima 1.6 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 IPN 160 in acciaio S275 a passo 1.2 m più 5 cm di betoncino proiettato di regolarizzazione C20/25;

- Getto dell'arco rovescio, spessore 50 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 tipo del Bypass

Lo scavo viene realizzato a piena sezione con sfondi di profondità massima 1.2 m. La sezione prevede i seguenti interventi:

- Rivestimento di prima fase composto da 5+20 cm di betoncino proiettato C25/30 fibrorinforzato mediante fibre metalliche (30 kg/m<sup>3</sup>) armato con centine HEB 120 in acciaio S275 a passo 1.2 m più 5 cm di betoncino proiettato di regolarizzazione C25/30;
- Getto dell'arco rovescio, spessore 45 cm (C32/40), ad una distanza dal fronte non vincolata, sezione armata;
- Impermeabilizzazione della calotta costituita da manto in PVC protetto con uno strato di tessuto non tessuto;
- Rivestimento definitivo in calotta, spessore 40 cm (C32/40), gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata, sezione armata

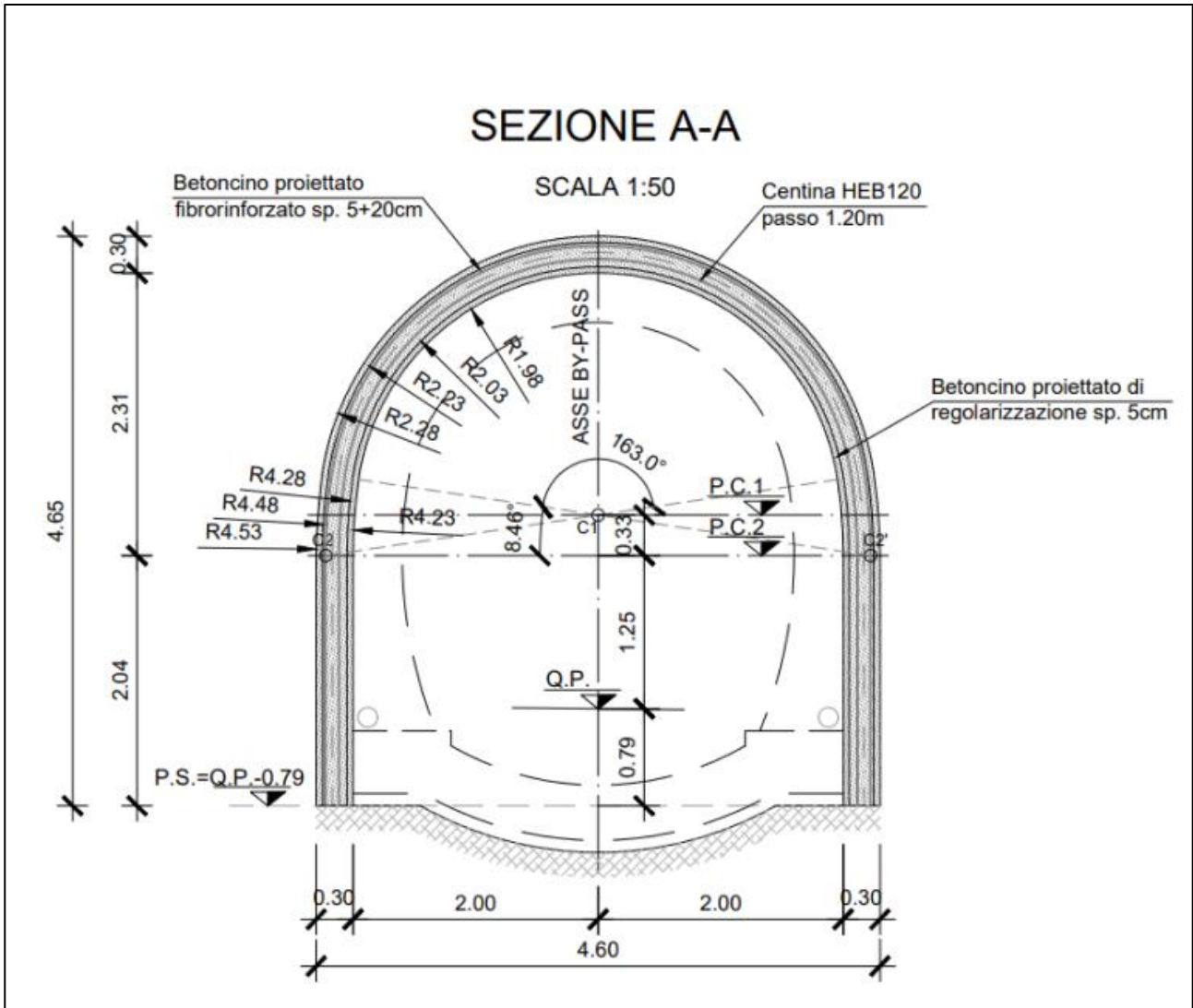


Figura 2 - Sezione di scavo del Bypass [11]

## 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 Modello di calcolo

#### 7.1.1 Geometria

Come già osservato nell'introduzione, la massima distanza tra la calotta del bypass e il piano campagna è pari a 30 m.

Per le analisi FDM 2D è stato utilizzato un modello quadrato di larghezza 200 m e altezza 80 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.

Nel modello sono riportati il bypass e le due canne delle gallerie naturali, equidistanti dal piano dei centri del cunicolo. Al netto delle inevitabili approssimazioni dovute allo studio bidimensionale del problema, la modellazione delle tre cavità permette di esaminare la mutua interazione tra le strutture nelle fasi di lavorazione.

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:

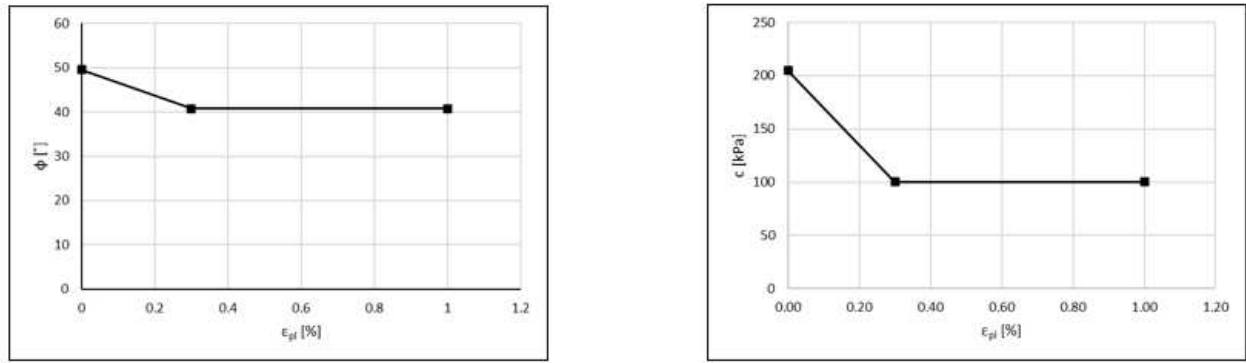
z = distanza del generico elemento dal piano campagna;

k0 = coefficiente di spinta orizzontale.

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

#### 7.1.2 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  $\psi < \text{angolo di resistenza al taglio } \phi$ ), 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**

### 7.1.3 Elementi strutturali

Il rivestimento di prima fase delle Gallerie Naturali e del Bypass 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 delle tre gallerie è costituito 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 ( $c_{int}=c/2$ ,  $\varphi_{int}=\varphi/2$ ). All'interfaccia in arco rovescio è assegnata coesione nulla ( $c_{int}=0$ ,  $\varphi_{int}=\varphi/2$ ), in accordo con la modellazione proposta per la Galleria Guinza nelle relazioni di calcolo dell'intervento tipo A [11] e della nicchia impianti [13].

Nelle analisi è stato utilizzato il valore di rigidità 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 [17].

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

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.

• **Gallerie Naturali – Stato di Fatto**

| Rivestimento di prima fase – Gallerie Naturali       |         |
|--|---------|
| Densità betoncino [kg/m <sup>3</sup> ]               | 2500    |
| Modulo elastico betoncino [GPa]                      | 31.5    |
| A rivestimento 1° fase equivalente [m <sup>2</sup> ] | 0.219   |
| J rivestimento 1° fase equivalente [m <sup>4</sup> ] | 0.00076 |
| h rivestimento 1° fase equivalente [m]               | 0.219   |
| v betoncino  | 0.2     |

| Rivestimento definitivo – Gallerie Naturali |        |
|---|--------|
| Densità cls [kg/m <sup>3</sup> ]            | 2500   |
| Modulo elastico cls [GPa]                   | 32.8   |
| A rivestimento definitivo [m <sup>2</sup> ] | 0.5    |
| J rivestimento definitivo [m <sup>4</sup> ] | 0.0104 |
| h rivestimento definitivo [m]               | 0.5    |
| v betoncino                                 | 0.2    |



• **Sezione del Bypass – Configurazione di progetto**

| Rivestimento di prima fase - Bypass                  |         |
|--|---------|
| Densità betoncino [kg/m <sup>3</sup> ]               | 2500    |
| Modulo elastico betoncino [GPa]                      | 31.5    |
| A rivestimento 1° fase equivalente [m <sup>2</sup> ] | 0.269   |
| J rivestimento 1° fase equivalente [m <sup>4</sup> ] | 0.00135 |
| h rivestimento 1° fase equivalente [m]               | 0.269   |
| v betoncino  | 0.2     |

| Rivestimento definitivo in calotta – Bypass |        |
|---|--------|
| Densità cls [kg/m <sup>3</sup> ]            | 2500   |
| Modulo elastico cls [GPa]                   | 35.0   |
| A rivestimento definitivo [m <sup>2</sup> ] | 0.4    |
| J rivestimento definitivo [m <sup>4</sup> ] | 0.0053 |
| h rivestimento definitivo [m]               | 0.4    |
| v betoncino                                 | 0.2    |

| Rivestimento definitivo in arco rovescio – Bypass |         |
|---|---------|
| Densità cls [kg/m <sup>3</sup> ]                  | 2500    |
| Modulo elastico cls [GPa]                         | 35      |
| A rivestimento definitivo [m <sup>2</sup> ]       | 0.45    |
| J rivestimento definitivo [m <sup>4</sup> ]       | 0.00759 |
| h rivestimento definitivo [m]                     | 0.45    |
| 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 a piena sezione delle Gallerie Naturali e riduzione attraverso step delle Forze Fittizie di Scavo (FFS) fino a 64%.
2. Riduzione delle FFS a 28% per simulare le condizioni antecedenti all'installazione del rivestimento di prima fase (a una distanza dal fronte pari a 1.6 m circa)
3. Installazione del rivestimento di prima fase (betoncino armato con doppie centine IPN 160 a passo 1.6 m) e riduzione delle FFS a 5%.
4. Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio e riduzione delle FFS a 0%.
5. Rimozione del rivestimento di prima fase e installazione del rivestimento definitivo in calotta.
6. Scavo a piena sezione del bypass e riduzione attraverso step delle FFS sul contorno a 70%.
7. Riduzione delle FFS a 36% per simulare le condizioni antecedenti all'installazione del rivestimento di prima fase (a una distanza dal fronte pari a 1.2 m circa)
8. Installazione del rivestimento di prima fase (betoncino armato con centine HEB 120 a passo 1.2 m) e riduzione delle FFS a 5%.
9. Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio e riduzione delle FFS a 0%.
10. Rimozione del rivestimento di prima fase e installazione del rivestimento definitivo in calotta.
11. Applicazione del carico idraulico dovuto alla falda
12. Applicazione dei carichi di cui al punto 10 con l'aggiunta dell'azione sismica
13. Applicazione dei carichi di cui al punto 11 con l'aggiunta dell'azione sismica

Le curve di andamento delle FFS, le linee caratteristiche e le convergenze attese con ipotesi di nessun rivestimento sono riportate nell'ALLEGATO 1 (Paragrafo 12)

Per la definizione e il calcolo dei carichi di cui ai punti 11, 12 e 13. 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 6 m rispetto alla calotta del bypass (circa -22 m rispetto al piano campagna). Gli elaborati a disposizione della sezione corrente della Galleria Naturale indicano la presenza di dreni laterali in prossimità delle murette [6]. La medesima configurazione è prevista per la sezione del bypass [14]. Per questo motivo il carico idraulico è stato modellato nelle tre gallerie 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 4).

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

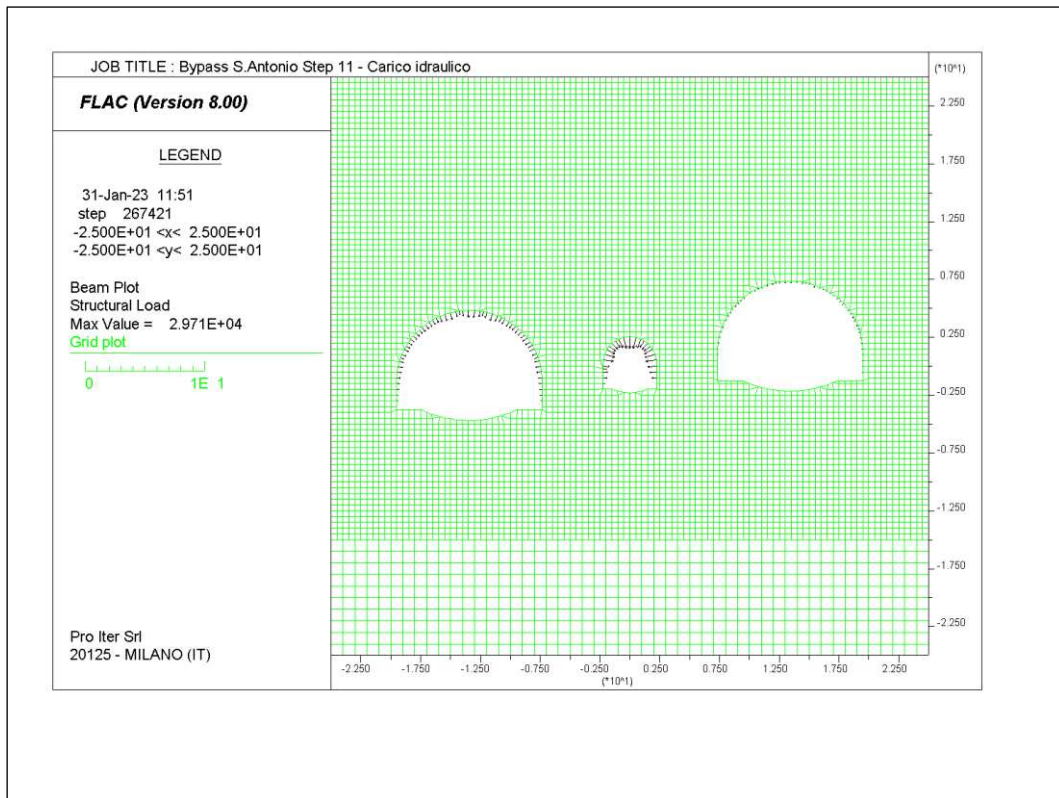


Figura 4 - Applicazione del carico idraulico in presenza di dreni

#### 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) [18].

A partire dalla peak ground acceleration (PGA) pari a 0.346g, definita al Paragrafo 5, l'accelerazione alla profondità del tunnel è valutata mediante la seguente relazione [18].

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

Con il coefficiente correttivo cautelativamente posto  $C=0.8$  come riportato in Tabella 7.1.

| Tunnel depth (m) | Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface |
|------------------|--|
| $\leq 6$         | 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. Il suo valore è stato calcolato mediante l'equazione della velocità di propagazione delle onde secondarie, a partire dai parametri geomeccanici riportati al Paragrafo 4.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Da cui  $V_s = 670$  m/s in accordo con la categoria di sottosuolo B assegnata nel Progetto Definitivo [5]. Nell'equazione  $k$  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 Naturale S. Antonio si è cautelativamente scelto il valore di  $k$  pari a 94, corrispondente ad una roccia tenera con momento magnitudo di 6.5 e distanza epicentrale di 0-20 km.

| Moment magnitude<br>( $M_w$ ) | Ratio of peak ground velocity (cm/s)<br>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).**

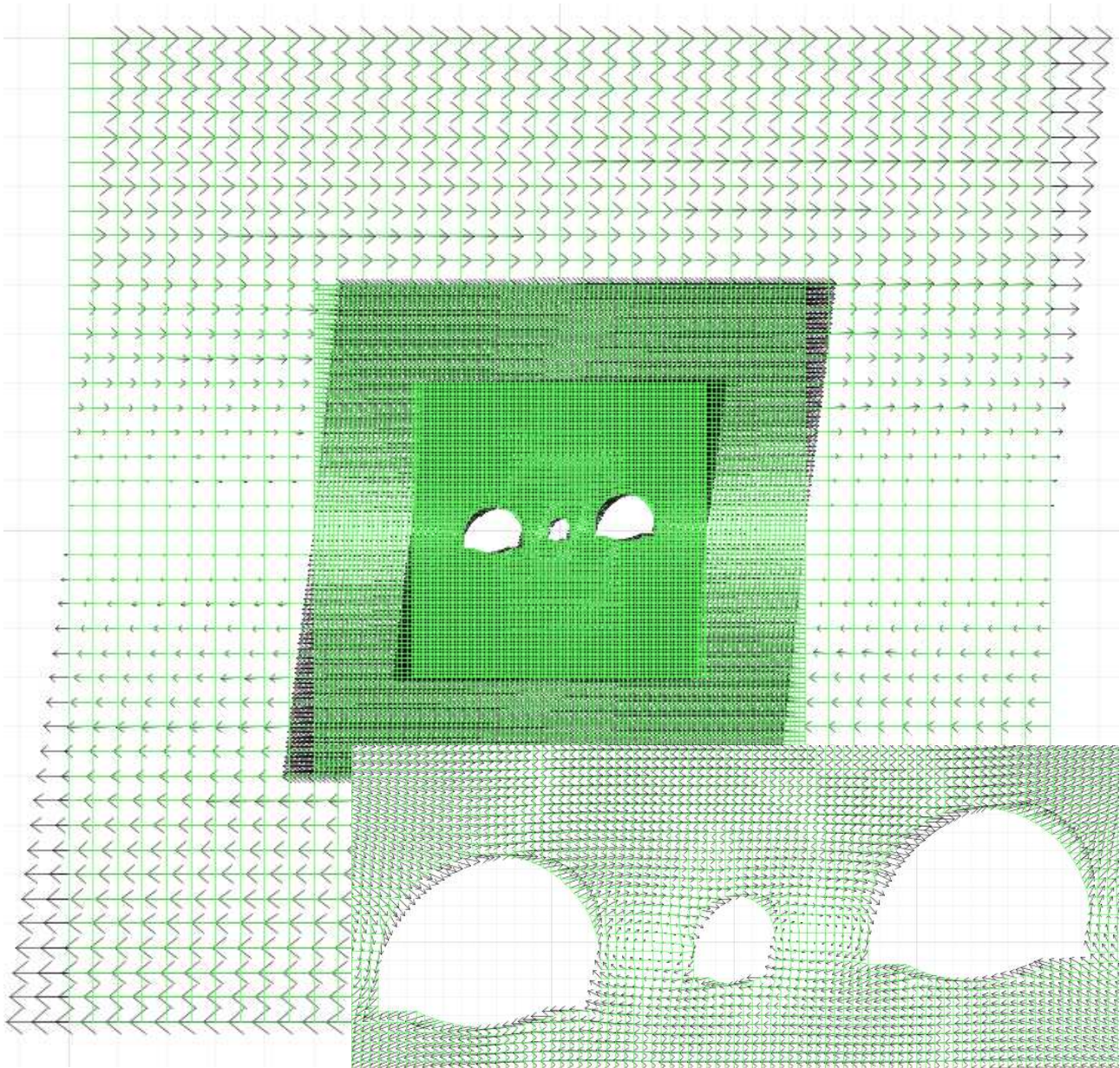
In definitiva risulta:

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

La deformazione tangenziale massima viene applicata mediante uno spostamento a farfalla  $\Delta x_{max}$  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 dettaglio nell'Appendice 2 (Paragrafo 13), confermano sostanzialmente i risultati delle Linee Caratteristiche. Le convergenze al fronte e assoluta sono pari rispettivamente a 0.1 cm e 0.2 cm, in accordo con quanto previsto con i metodi analitici, di conseguenza la convergenza relativa in calotta si attesta su circa 0.1 cm.

## 8 VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO

Nel seguito del presente paragrafo si riportano le verifiche relative al rivestimento di prima fase e al rivestimento definitivo delle gallerie naturali e del Bypass.

Nelle analisi delle gallerie naturali è effettuata la verifica del rivestimento definitivo in calotta e sui piedritti, in quanto ritenuti la porzione maggiormente sollecitata dallo scavo del cunicolo. Il dimensionamento del rivestimento di prima fase e definitivo nel bypass comprende tutta la sezione (calotta, piedritti 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:

$$Ed \leq Rd$$

dove:

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

Le verifiche sono state effettuate a partire dallo Step 6, corrispondente alla fase di modifica dello stato di fatto mediante lo scavo del Bypass.

#### 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 del Bypass e delle gallerie naturali negli Step 10 e 11, 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 nelle gallerie naturali, 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 nel bypass, realizzato in c.a., affinché la verifica di limitazione delle tensioni risulti soddisfatta, devono essere valida la seguente disequazione:

Relazione di calcolo - By-pass pedonale alla progr. 7+775 m

19

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

### 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 Gallerie Naturali - Rivestimento definitivo

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali.

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

| Rivestimento definitivo arco rovescio – stato di fatto |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                                      | 50     |
| Classe di resistenza cls                               | C25/30 |
| Armatura trasversale simmetrica                        | -      |
| Armatura a taglio                                      | -      |
| Ripartitori  | -      |

### 8.2.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

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

- Step 6 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, scavo del Bypass;
- Step 7 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, avanzamento dello scavo del Bypass)
- Step 8 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento di prima fase nel Bypass;
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio nel Bypass
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

### 8.2.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Le verifiche a Stato Limite di Esercizio del rivestimento definitivo delle gallerie Naturali sono eseguite nelle seguenti condizioni:

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

### 8.2.3 Risultati

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 3, risultano soddisfatte sia per il rivestimento di definitivo non armato in calotta.

### 8.3 Bypass - 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. 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 [19]. 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 – Bypass          |        |
|--|--------|
| Spessore betoncino [cm]                      | 25     |
| Classe di resistenza cls                     | C25/30 |
| Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]   | 13.20  |
| Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ] | 6.37   |
| Interasse [m]                                | -1.2   |
| Classe di resistenza acciaio                 | S275   |

#### 8.3.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

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

- Step 8 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase (senza rivestimento definitivo in arco rovescio);
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase (con rivestimento definitivo in arco rovescio)

#### 8.3.2 Risultati

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

## 8.4 Bypass - Rivestimento definitivo

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

| Rivestimento definitivo calotta e piedritti – Bypass |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                                    | 40     |
| Classe di resistenza cls                             | C32/40 |
| Armatura trasversale simmetrica                      | Φ16/25 |
| Armatura a taglio                                    | -      |
| Ripartitori  | Φ8/30  |

| Rivestimento definitivo arco rovescio – Bypass |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                              | 45     |
| Classe di resistenza cls                       | C32/40 |
| Armatura trasversale simmetrica                | Φ16/25 |
| Armatura a taglio                              | -      |
| Ripartitori                                    | Φ8/30  |

### 8.4.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

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

- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass (solo arco rovescio)
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

### 8.4.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

### 8.4.3 Risultati

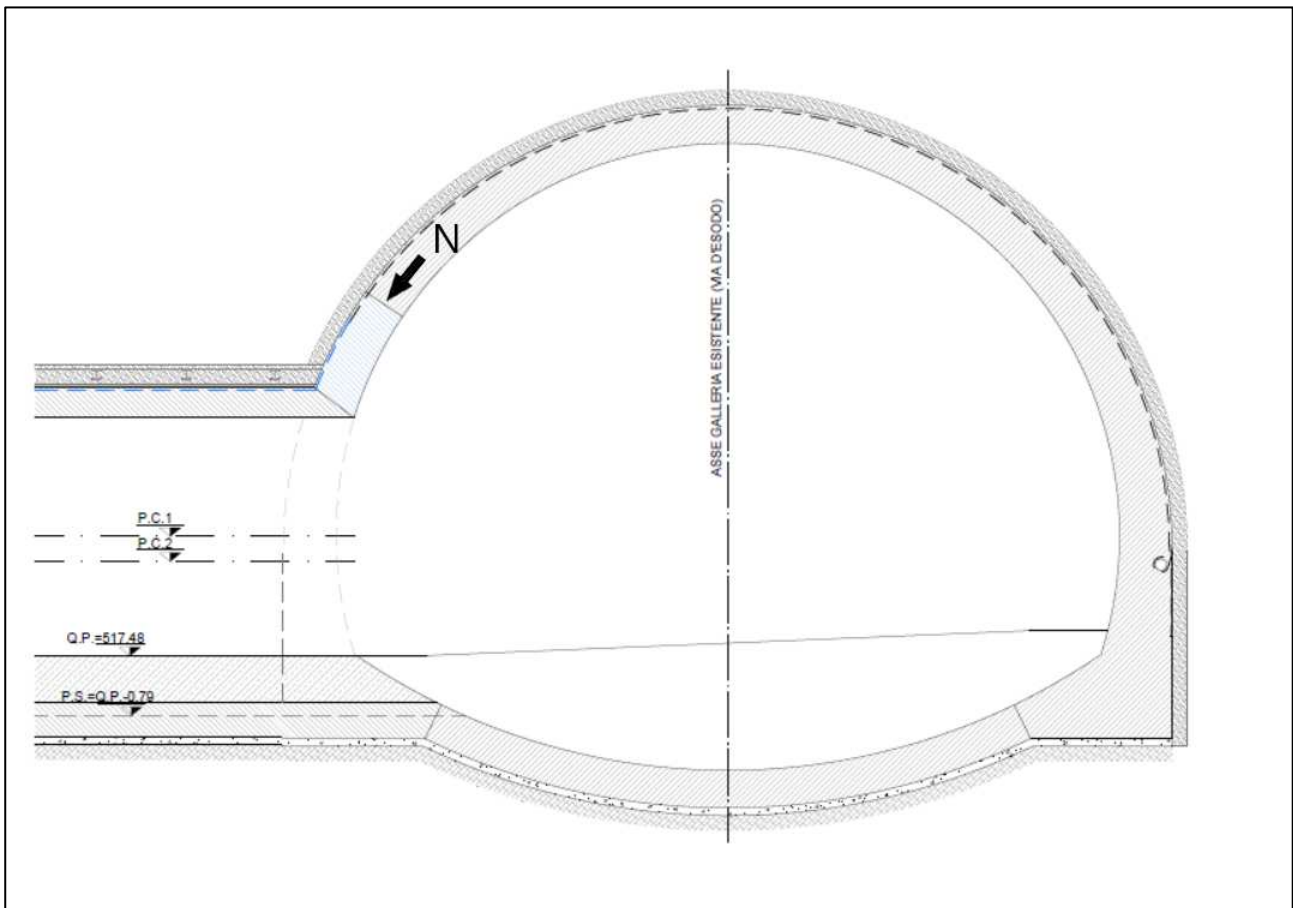
Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 3, risultano soddisfatte sia per il rivestimento definitivo armato simmetricamente con ferri longitudinali φ16/25

## 9 VERIFICA DEGLI INNESTI CON LA GALLERIA PRINCIPALE

Il dimensionamento dei rivestimenti definitivi in corrispondenza dell'innesto del bypass nelle Gallerie Naturali si compone di due fasi.

In primo luogo, viene indagato lo stato di sollecitazione nella fascia di rivestimento definitivo integro della Galleria Naturale, adiacente alla porzione di calotta e piedritti demoliti per permettere lo scavo del bypass (di lunghezza pari a 6.5 m). Il dimensionamento garantisce che durante le fasi di lavorazione (Fase 1-4 al Paragrafo 6.1.1) il rivestimento definitivo della Galleria Naturale sia in grado di sostenere il carico dell'ammasso non supportato.

In seconda fase, simulando il comportamento a lungo termine, si ipotizza che la totalità del carico venga trasferito al rivestimento della galleria completo del getto del rivestimento del cunicolo trasversale. La schematizzazione utilizzata per le gallerie di linea prevede un architrave incastrata alle estremità, in corrispondenza della sezione di galleria principale tagliata dal cunicolo trasversale, e sostenuta dai due ritzi, posti lateralmente al cunicolo trasversale e costituiti dalle parti di galleria principale integra. Tale modello comporta uno stato di sollecitazione flessionale nell'architrave, conseguente al carico costituito dal valore dell'azione normale presente nel rivestimento definitivo integro della galleria principale, in corrispondenza della posizione dell'architrave. Viene pertanto eseguita la verifica dei rivestimenti della galleria a sezione integra adiacente al cunicolo trasversale e il dimensionamento dell'architrave.



Nelle fasi finali di progettazione si è deciso di armare i piedritti delle gallerie in corrispondenza dell'innesto con ferri  $\Phi 16/25$  in direzione trasversale e longitudinale. Q stata recepita nella presente relazione di calcolo, dove le verifiche sono effettuate con una sezione di cls non armato.

Trattandosi di una modifica migliorativa in termini di risposta dei rivestimenti alle deformazioni dell'ammasso, si ritiene ammissibile mantenere le verifiche precedenti.

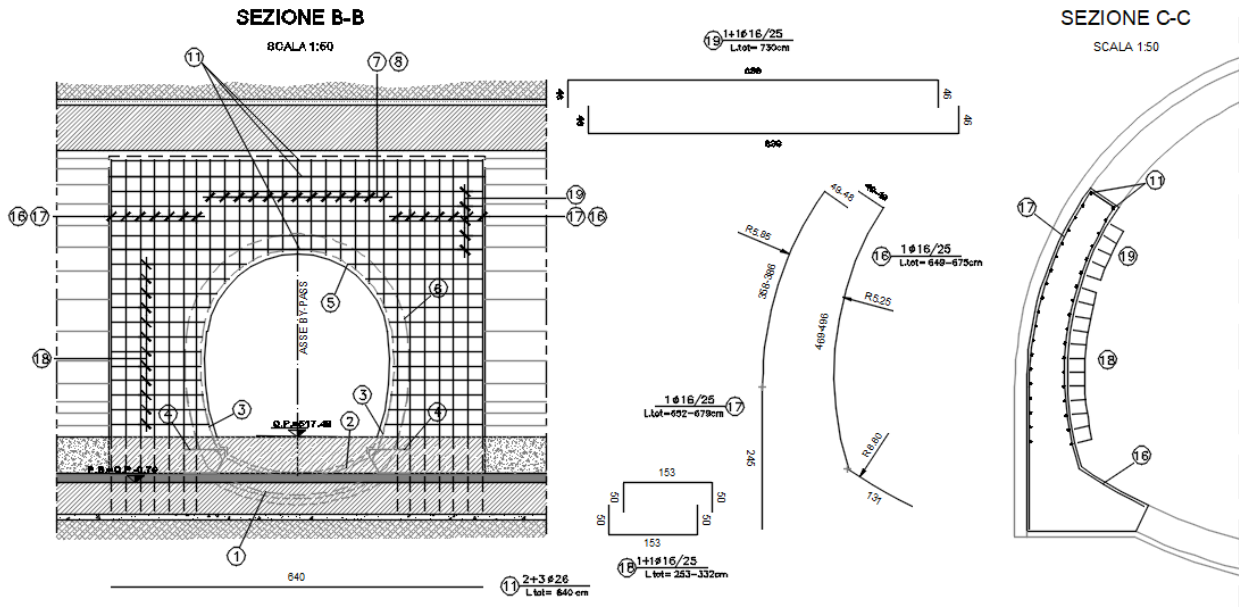


Figura 5 - Amatura prevista all'innesto del bypass con le gallerie naturali [15]

## 9.1 Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo - Fasi di lavorazione

Nelle fasi di lavorazione (Fase 1-4 al Paragrafo 6.1.1) i ritti laterali sono sollecitati da uno stato di pressoflessione amplificato alla porzione di ammasso non supportato. In particolare, le azioni nei ritti laterali sono calcolate amplificando quelle presenti nella sezione corrente per il coefficiente

$$R = 1 + \frac{b/2}{L}$$

Considerando la larghezza di porzione non supportata  $b$  pari a 6.5 m (pari alla larghezza del bypass di 4.5m, estesa di 1 m a monte e a valle dell'innesto), e la lunghezza della fascia di ripartizione del carico d'ammasso, cautelativamente ipotizzata pari a 1 m, il coefficiente di amplificazione dei carichi risulta uguale a

$$R = 4.25$$

Sono di seguito riportate le verifiche dei rivestimenti definitivi delle gallerie di linea in corrispondenza degli innesti.

### 9.1.1 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 6 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, scavo del Bypass;
- Step 7 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, avanzamento dello scavo del Bypass)
- Step 8 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento di prima fase nel Bypass;
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio nel Bypass
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass

### 9.1.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Considerata la natura temporanea delle fasi di lavorazione, in questo step il rivestimento definito delle gallerie naturali non viene verificato allo SLE.

### 9.1.3 Risultati

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 4, risultano soddisfatte per il rivestimento di definitivo non armato in calotta.

## 9.2 Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo

A lungo termine si ipotizza che ritti laterali siano sollecitati da uno stato di pressoflessione dovuto alla reazione normale d'appoggio dell'architrave oltre allo stato di sforzo (N, M) presente nel rivestimento integro.

Le azioni nei ritti laterali sono calcolate amplificando quelle presenti nella sezione corrente per il coefficiente

$$R = 1 + \frac{b/2}{L}$$

Considerando la larghezza di porzione non supportata  $b$  di 4.5 m (pari alla larghezza del bypass) e la lunghezza della zona rinforzata pari a 1 m, il coefficiente di amplificazione dei carichi risulta uguale a

$$R = 3.25$$

Sono di seguito riportate le verifiche dei rivestimenti definitivi delle gallerie di linea in corrispondenza degli innesti.

### 9.2.1 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 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

### 9.2.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

### 9.2.3 Risultati

Le verifiche svolte, riportate compiutamente nell'ALLEGATO 4, risultano soddisfatte per il rivestimento di definitivo non armato in calotta.



### 9.3 Dimensionamento dell'architrave

Il dimensionamento dell'architrave si esegue a partire dalle sollecitazioni assiali più gravose nel rivestimento definitivo in corrispondenza dell'innesto, riportate in tabella

|     | STEP | N [kN] |
|-----|------|--------|
| SLU | 11   | 963    |
| SLE | 13   | 499    |

considerando la luce dell'architrave, pari a  $L = 4.5$  m le sollecitazioni all'incastro e in mezzeria risultano pari a

$$\begin{cases} M_{inc} = \frac{N \cdot L^2}{12} \\ V_{inc} = \frac{N \cdot L}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{mezz} = \frac{N \cdot L^2}{24} \\ V_{mezz} = 0 \end{cases}$$

| Posizione | M [kN/m] | V [kN] |
|-----------|----------|--------|
| Incastro  | 1625     | 2167   |
| Mezzeria  | -813     | 0      |

Le sollecitazioni sono verificate con le seguenti dimensioni e armature dell'architrave

| Posizione | b x h  | Armatura         |                  |                     |
|-----------|--------|------------------|------------------|---------------------|
|           | [m]    | A <sub>sup</sub> | A <sub>inf</sub> | A <sub>taglio</sub> |
| Mezzeria  | 55x150 | 2φ26/20          | 3φ26/20          | 2φ12/25             |
| Incastro  | 55x350 | 2φ26/20          | 3φ26/20          | 2φ12/25             |

Si noti come l'altezza della trave doppiamente incastrata varia a seconda lo stato di sollecitazione venga esaminato in mezzeria o all'incastro. All'incastro, dove il momento è massimo, la sezione di cls reagente si estende dal piano dei centri del bypass fino alla porzione di rivestimento della galleria naturale non demolita. In mezzeria invece l'altezza dell'architrave è pari alla distanza tra la chiave di calotta del bypass e la porzione di rivestimento della galleria naturale non demolita (Figura 6).

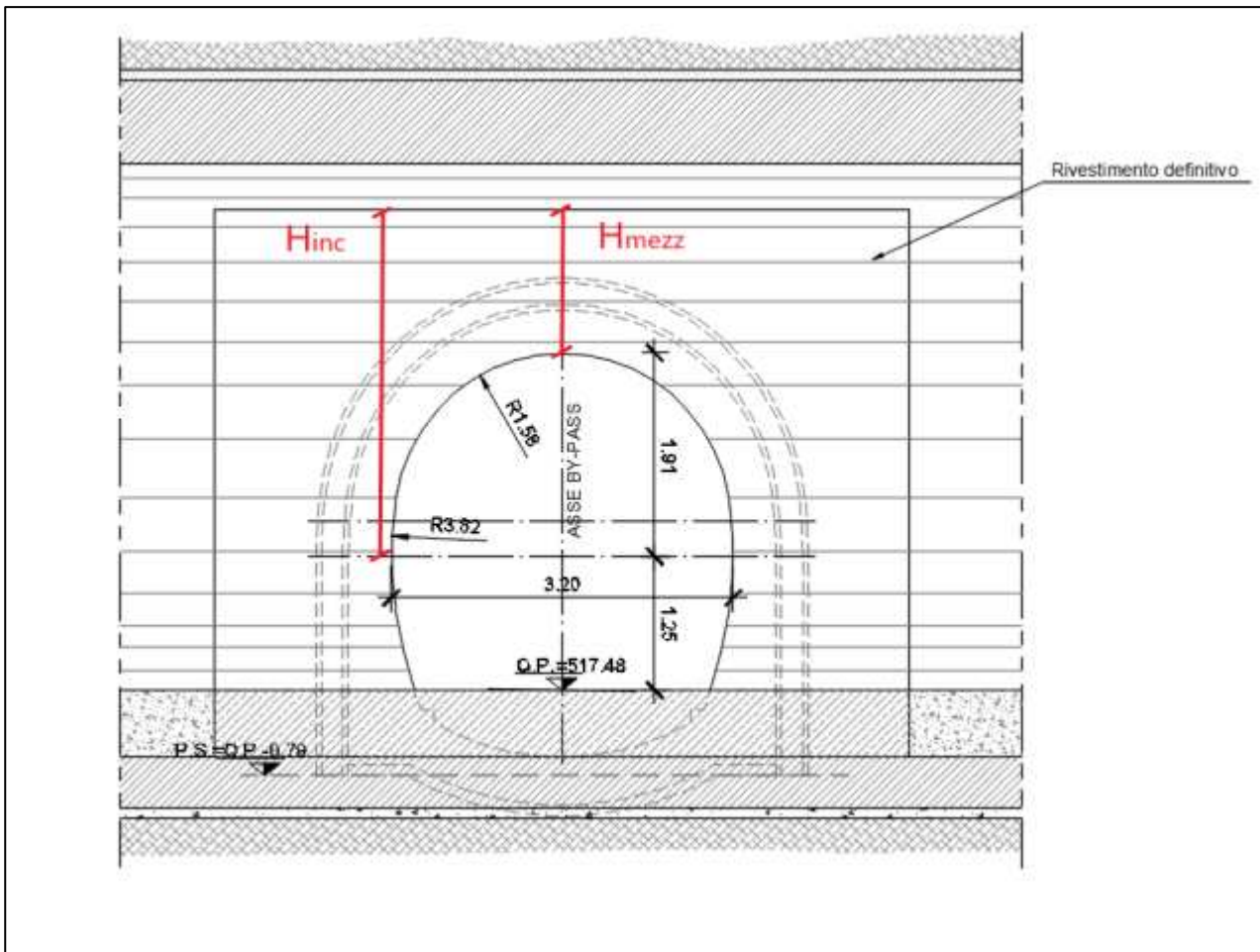


Figura 6 - Architettonico dell'innesto del bypass con le gallerie naturali

## 10 CONCLUSIONI

I risultati illustrati nella presente relazione confermano l'adeguatezza e l'efficacia degli interventi proposti per lo scavo del Bypass S. Antonio e la realizzazione degli innesti con le gallerie naturali. L'analisi conferma l'adeguatezza strutturale delle due gallerie naturali esistenti a seguito dello scavo del cunicolo

In particolare, le analisi FDM 2D svolte hanno confermato il corretto dimensionamento dei rivestimenti di prima fase e dei rivestimenti definitivi nel bypass e all'innesto con le gallerie naturali nelle seguenti configurazioni:

- carico idraulico con quota di falda posta a 6 m sopra la chiave calotta;
- effetto dell'azione sismica.

## 11 ELENCO ALLEGATI

- **ALLEGATO 1 – Linee Caratteristiche**
- **ALLEGATO 2 – Output dell’analisi**
- **ALLEGATO 3 – Verifica delle sezioni tipo**
- **ALLEGATO 4 – Verifica degli innesti con la galleria naturale**

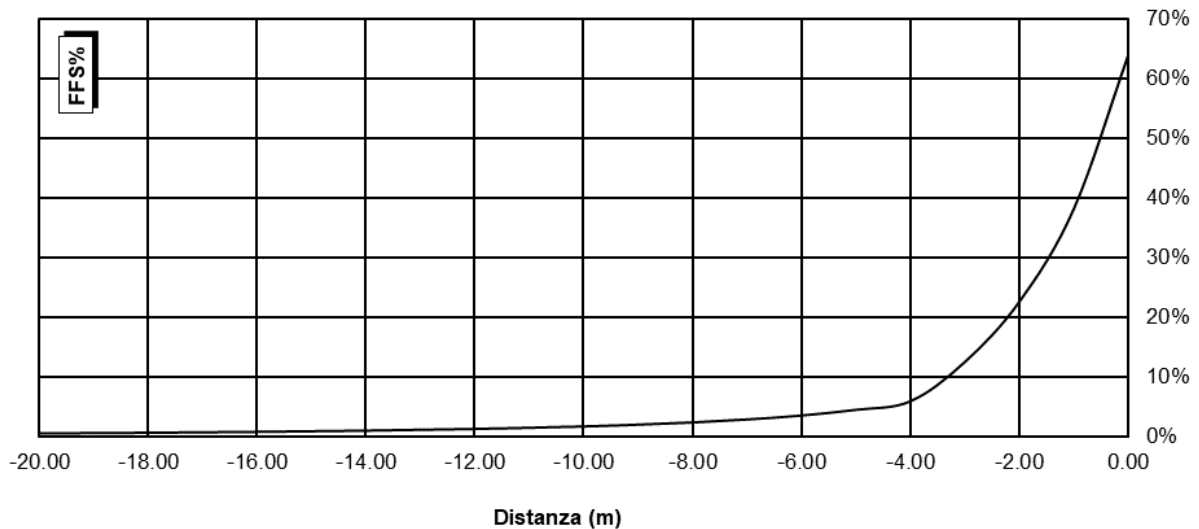
## 12 ALLEGATO 1 – LINEE CARATTERISTICHE

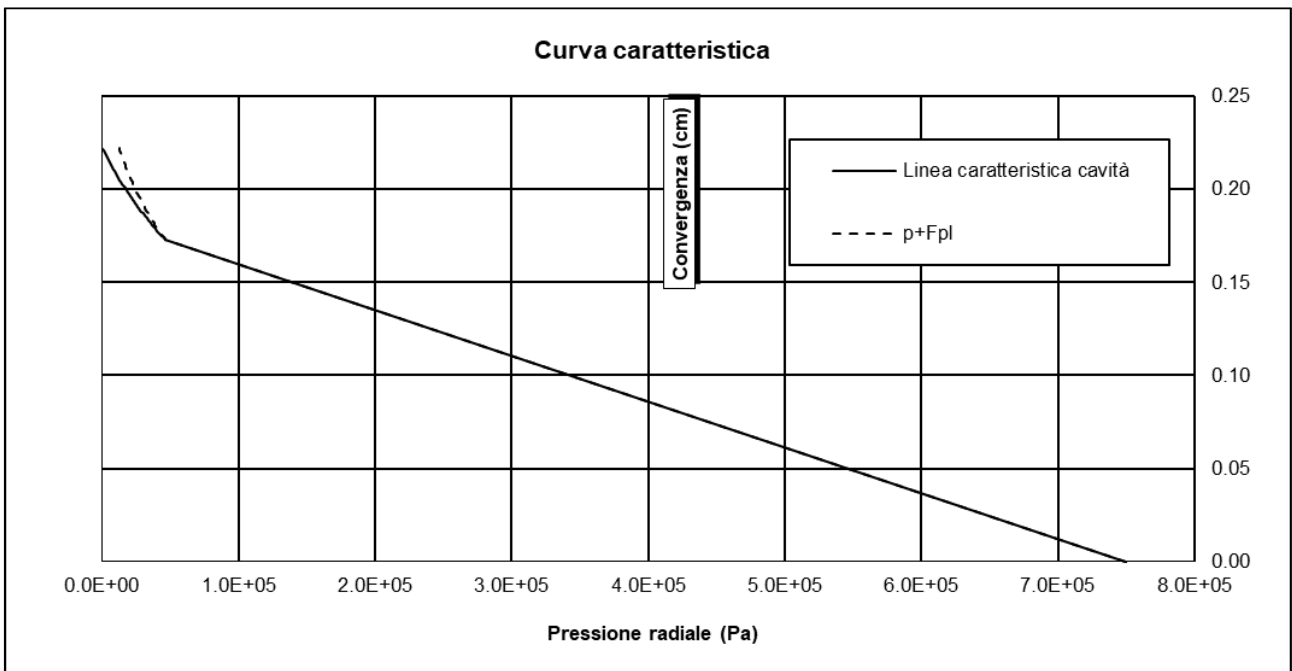
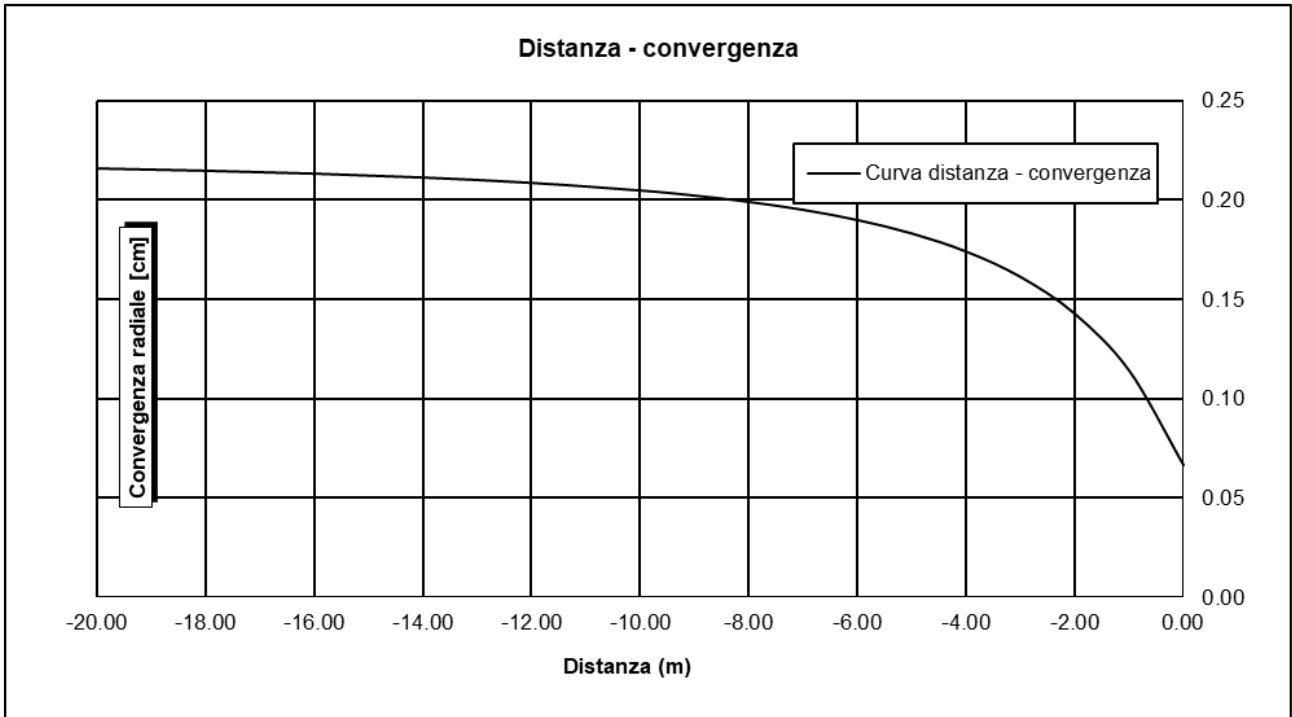
Di seguito vengono riportate le proprietà geotecniche e i grafici delle Linee Caratteristiche calcolate con approccio analitico (Ribacchi e Riccioni, 1977) dell'ammasso GA4 con la copertura massima (30 m).

### PROPOSTA\_GN - LC GSI = 50, H = 30m, C0 = 20Mpa, mi = 10, Ei = 12000GPa

| DATI DI INGRESSO              |          | RISULTATI                                |          |
|-------------------------------|----------|--|----------|
| peso di volume [N/mc]         | 25000    | <b>All'equilibrio naturale (da L.C.)</b> |          |
| copertura [m]                 | 30       | Convergenza assoluta [cm]                | 0.2      |
| raggio di scavo [m]           | 5.46     | Convergenza relativa [cm]                | 0.2      |
|                               |          | Estensione fascia plastica [m]           | 0.5      |
| angolo d'attrito di picco [°] | 49.54    | <b>Equilibrio al fronte</b>              |          |
| angolo d'attrito residuo [°]  | 40.80    | Convergenza assoluta [cm]                | 0.1      |
| coesione di picco [Pa]        | 205480   | FFS                                      | 63.9%    |
| coesione residua [Pa]         | 100392   |  |          |
| modulo elastico [Pa]          | 2.78E+09 | c(fronte) / Rscavo                       | 0.01 [%] |
| coefficiente di Poisson       | 0.25     | c(assoluta) / Rscavo                     | 0.04 [%] |
|                               |          | c(relativa) / Rscavo                     | 0.03 [%] |
| angolo di dilatazione [°]     | 6.19     | Fpl(fronte)/Rscavo                       | 0.0 [%]  |
|                               |          | Fpl(assoluta)/Rscavo                     | 9.2 [%]  |

Distanza - forze fittizie di scavo (%)

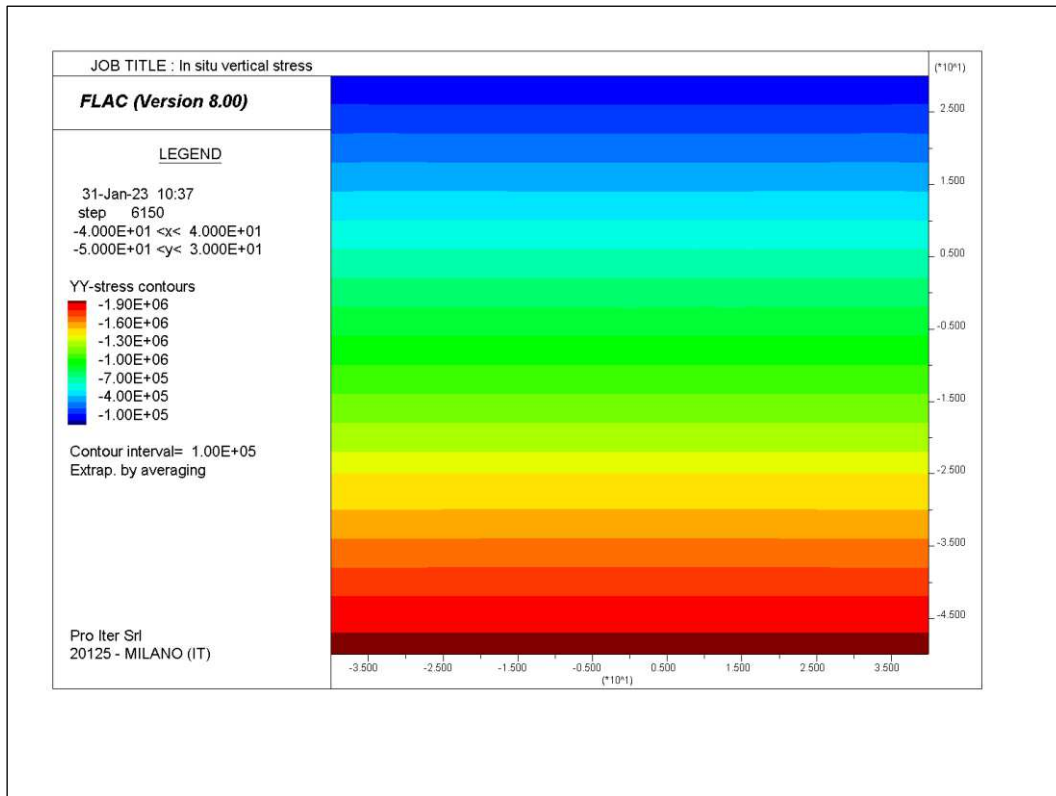




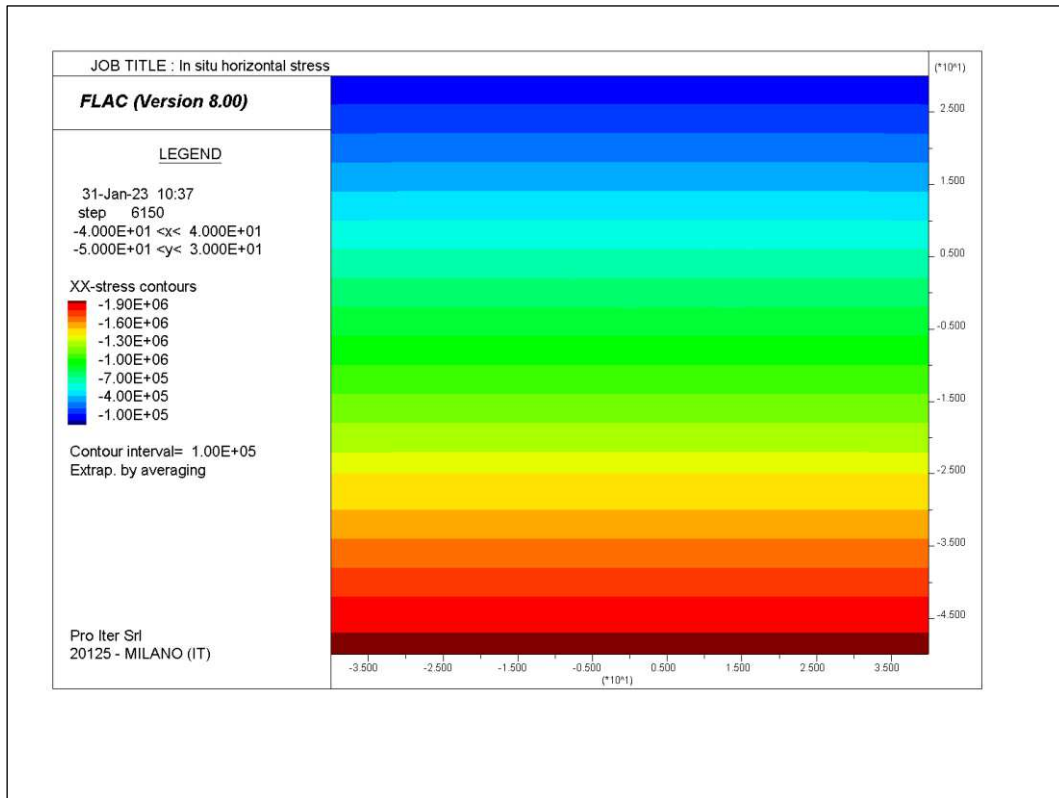
### 13 ALLEGATO 2 – OUTPUT DELL’ANALISI

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]**

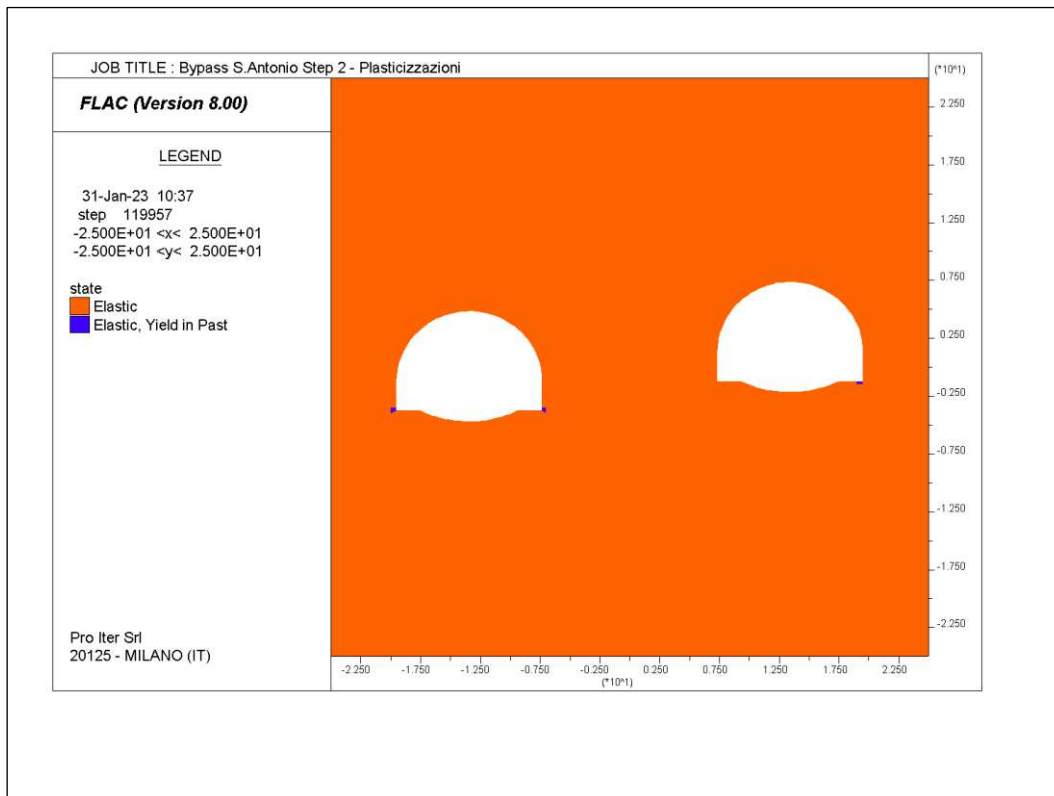


- **Plasticizzazioni nel modello – Step 1 (Scavo GN – FFS 64%)**

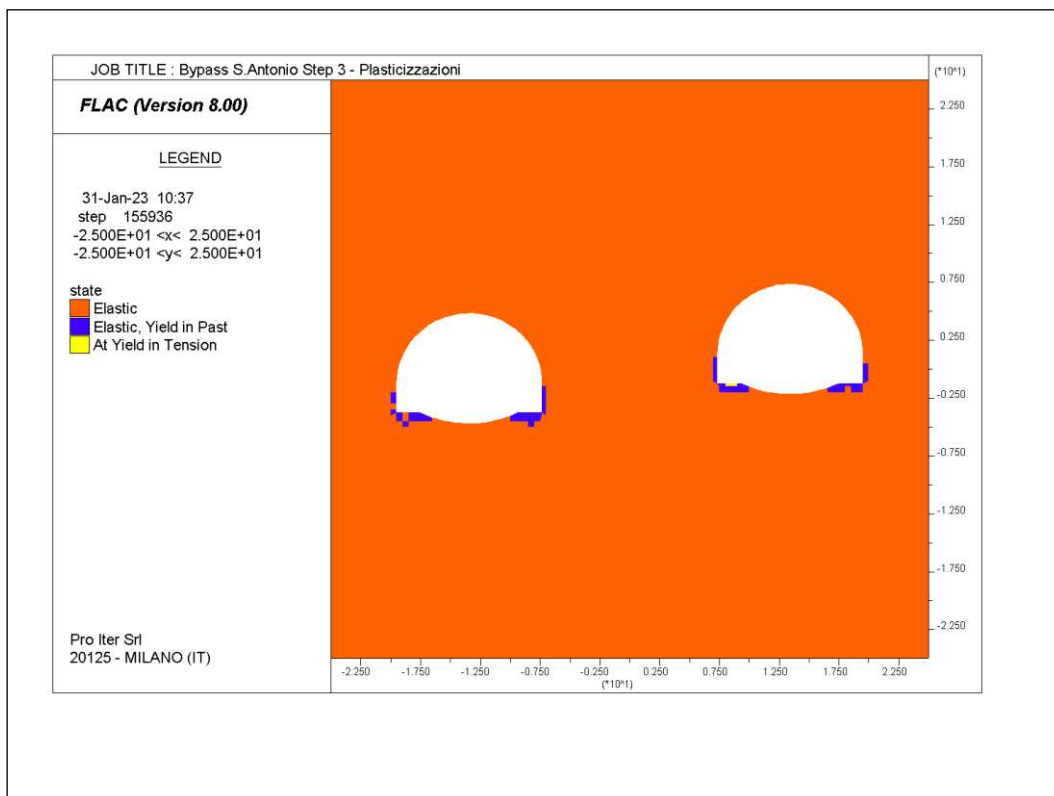




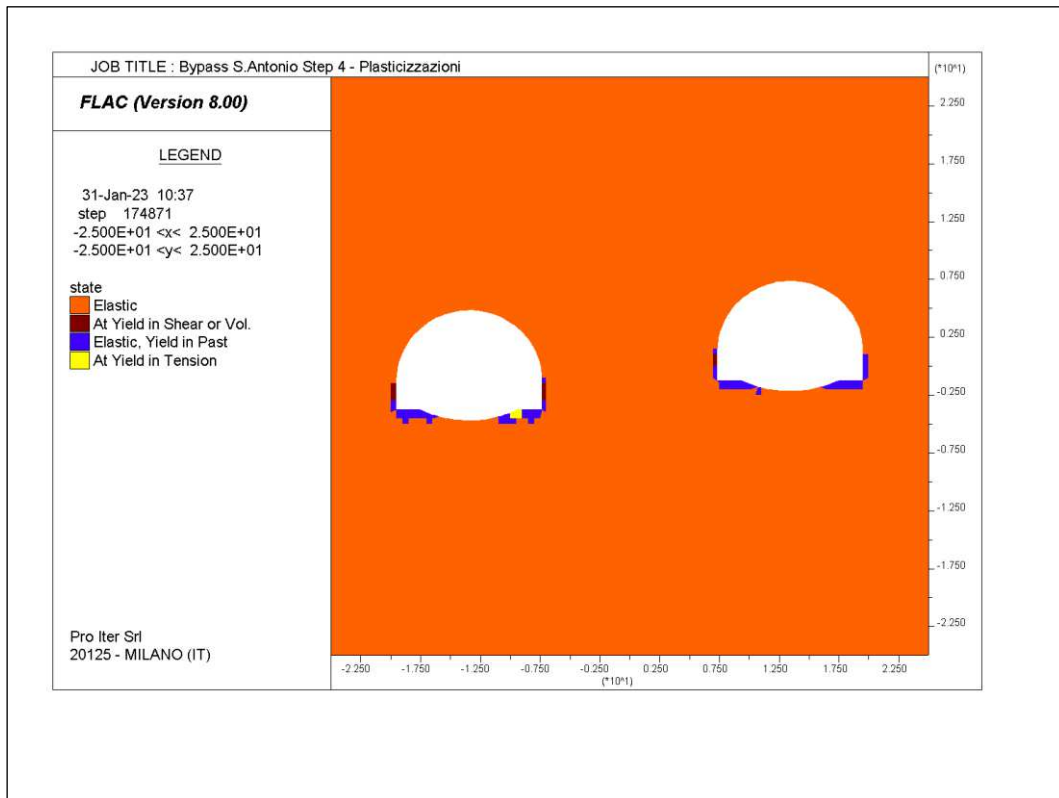
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 2 (Distanza 1.6 m dal fronte GN – FFS 28%)**



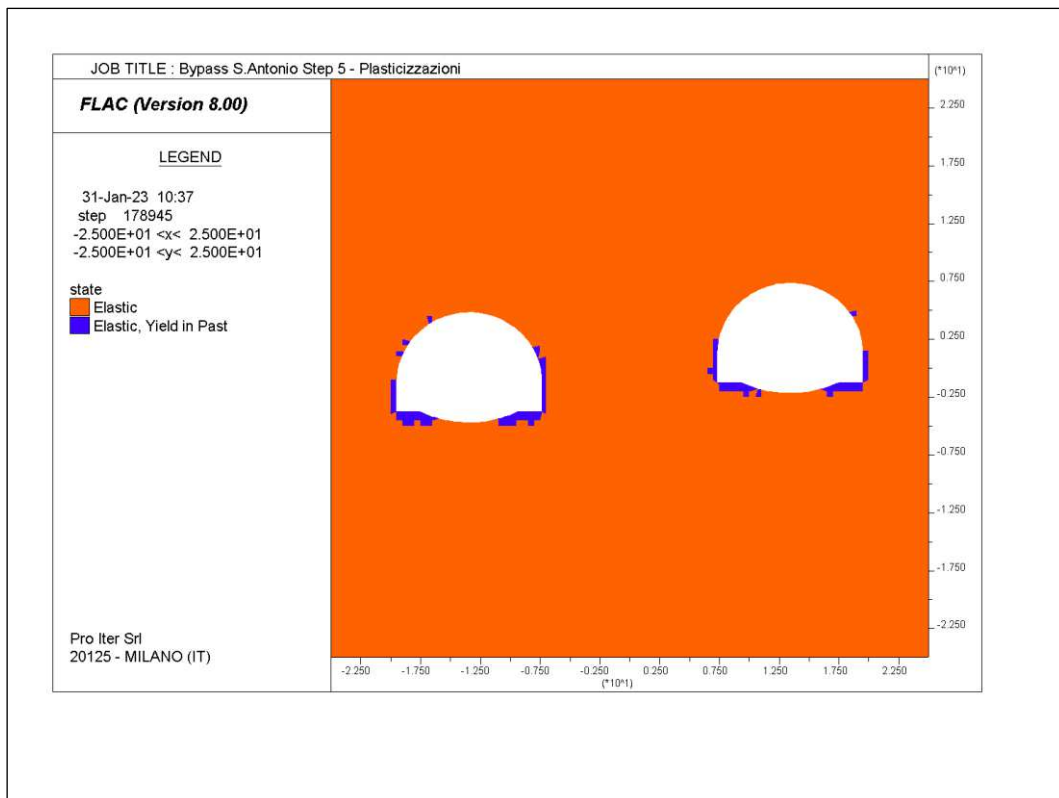
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



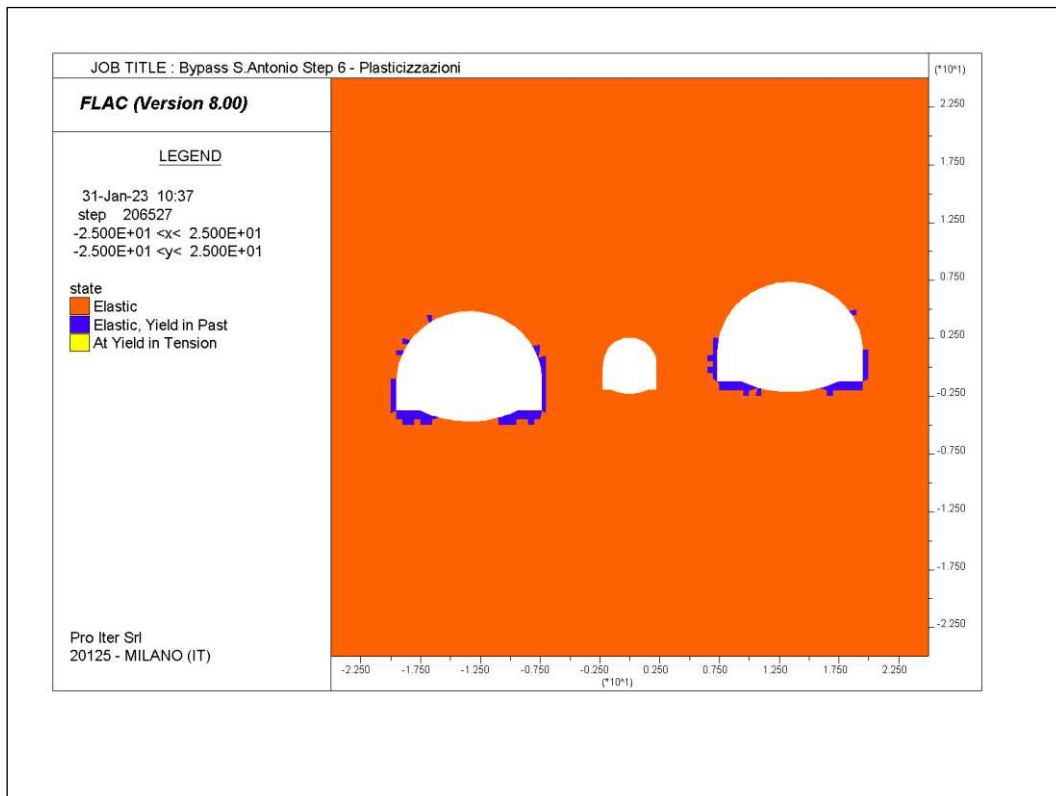
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



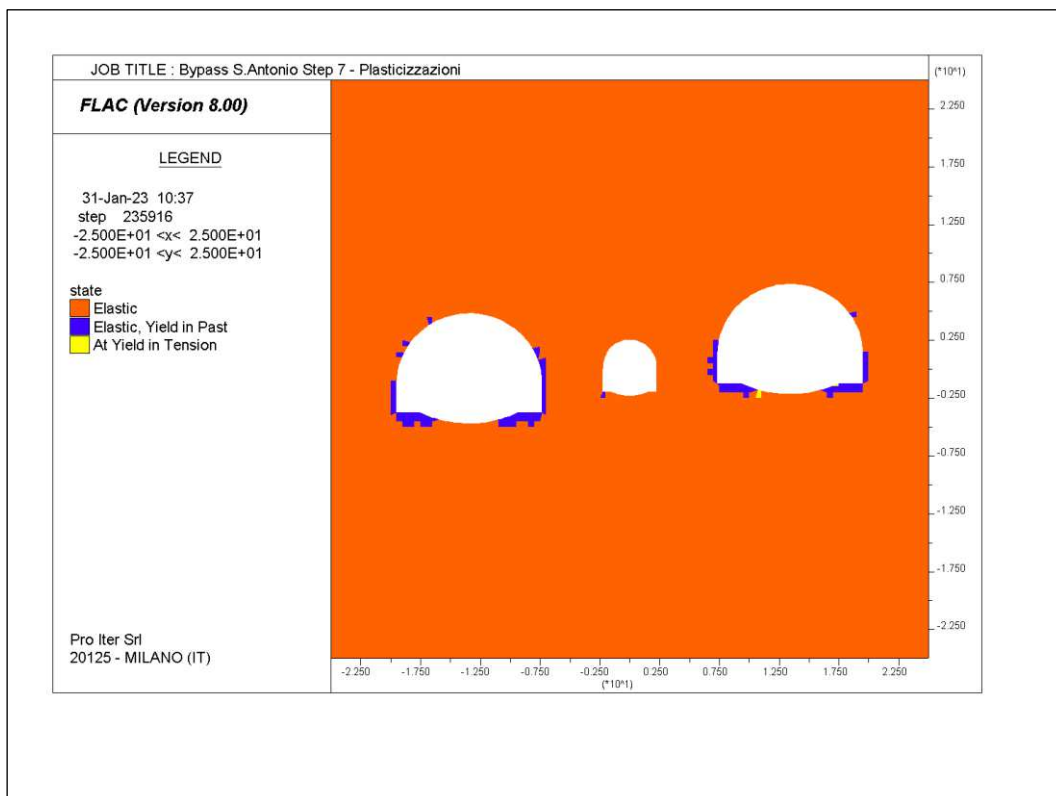
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**



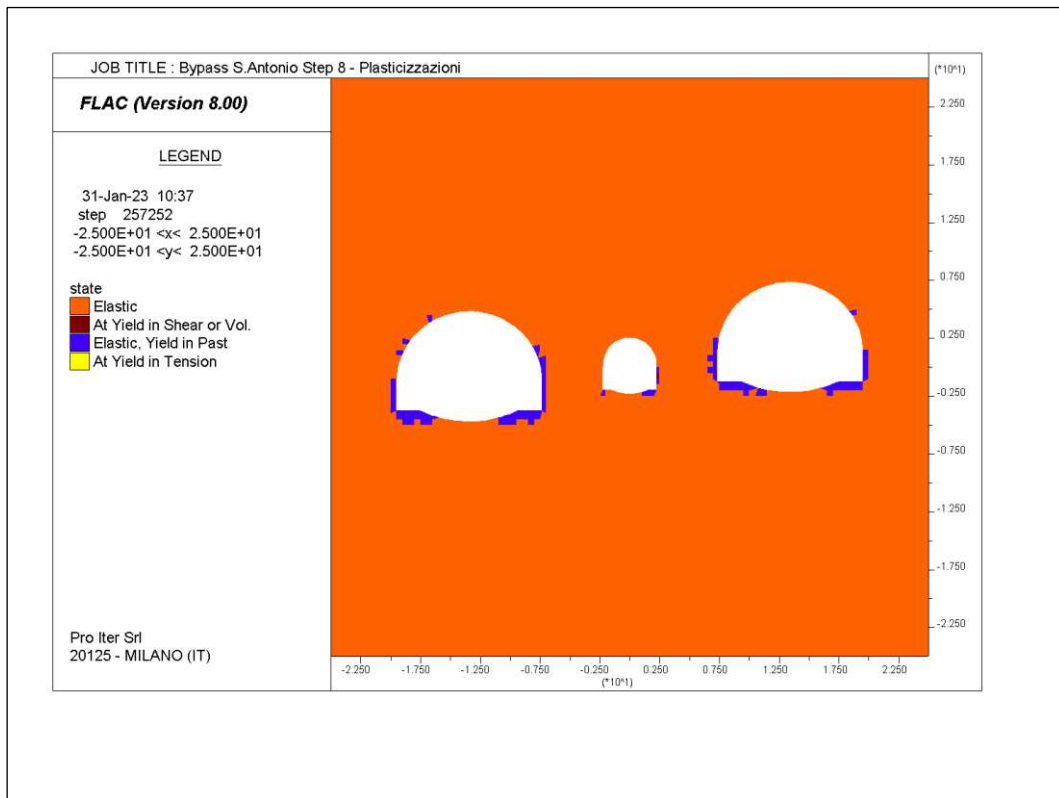
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**



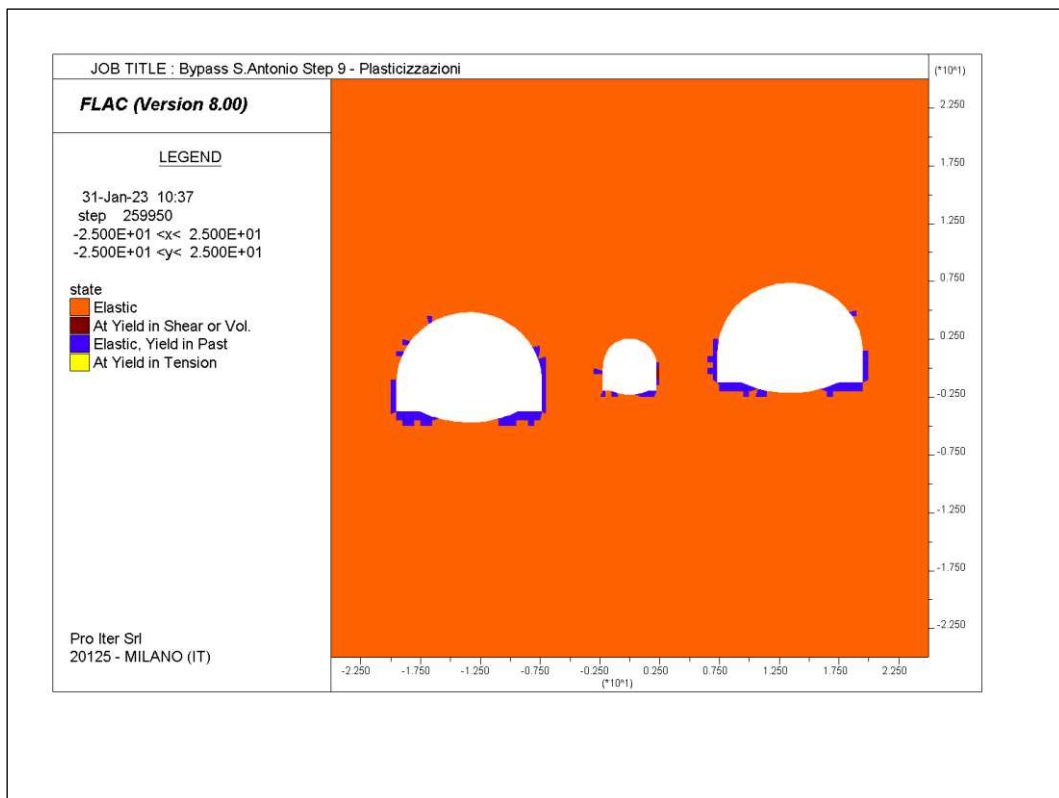
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)**



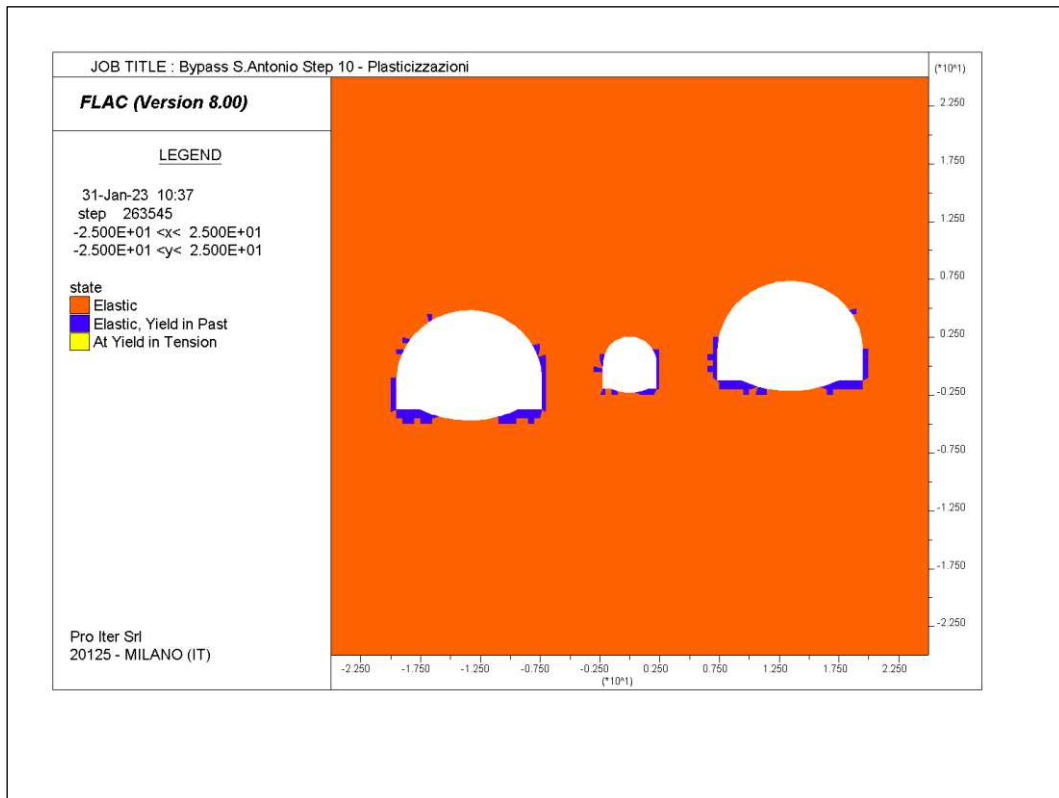
- Plasticizzazioni nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)



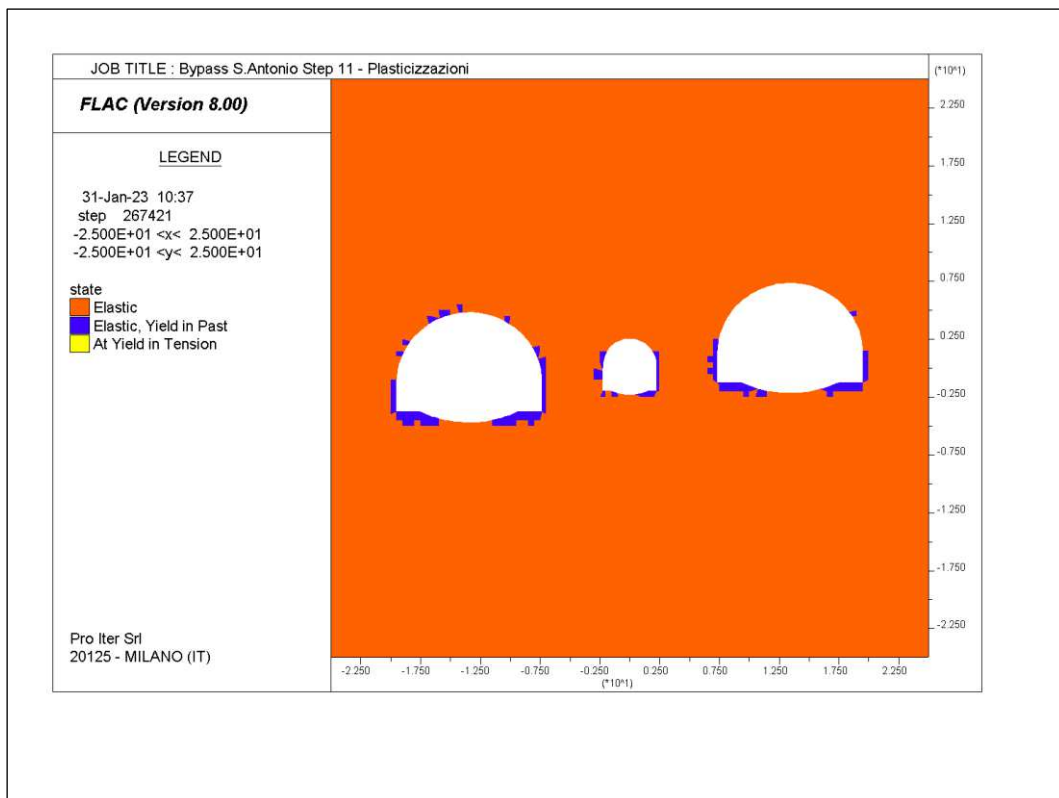
- Plasticizzazioni nel modello – Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)



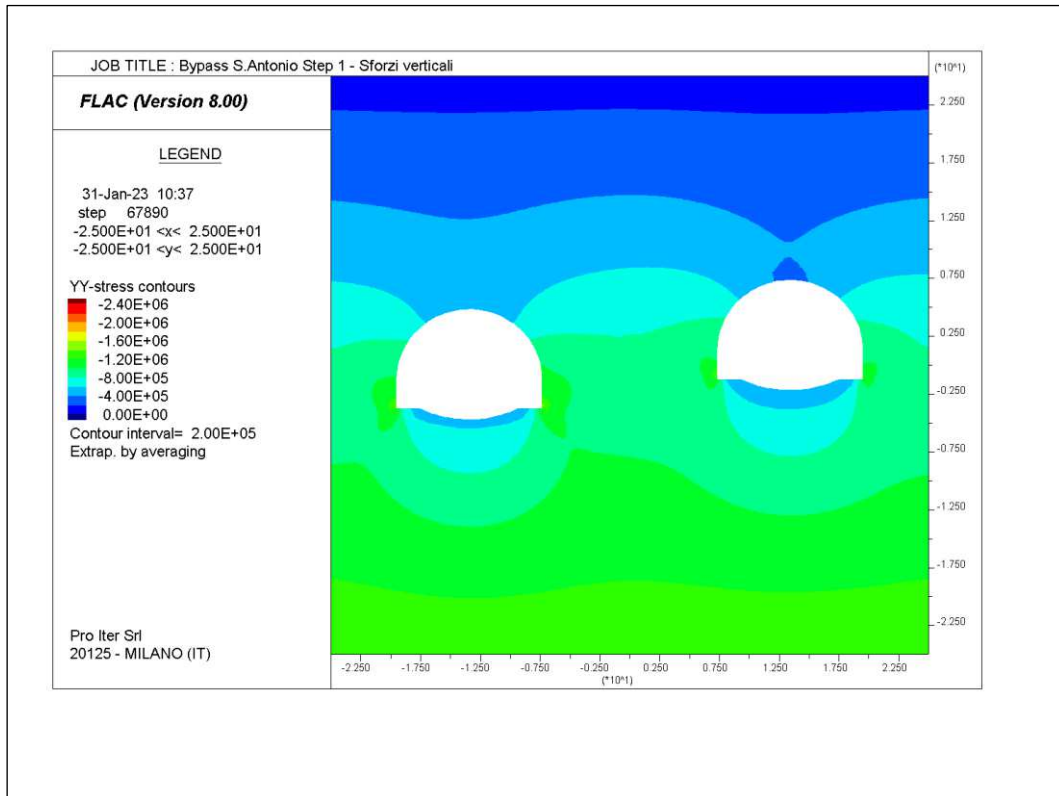
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**



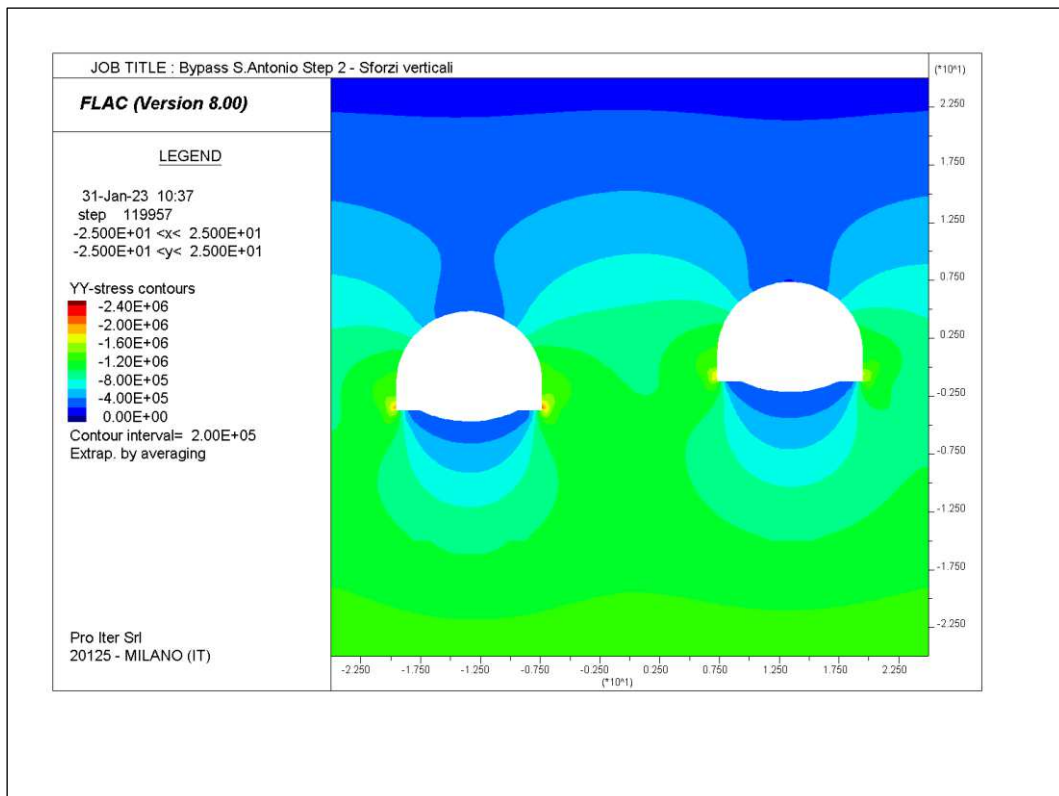
- **Plasticizzazioni nel modello – Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



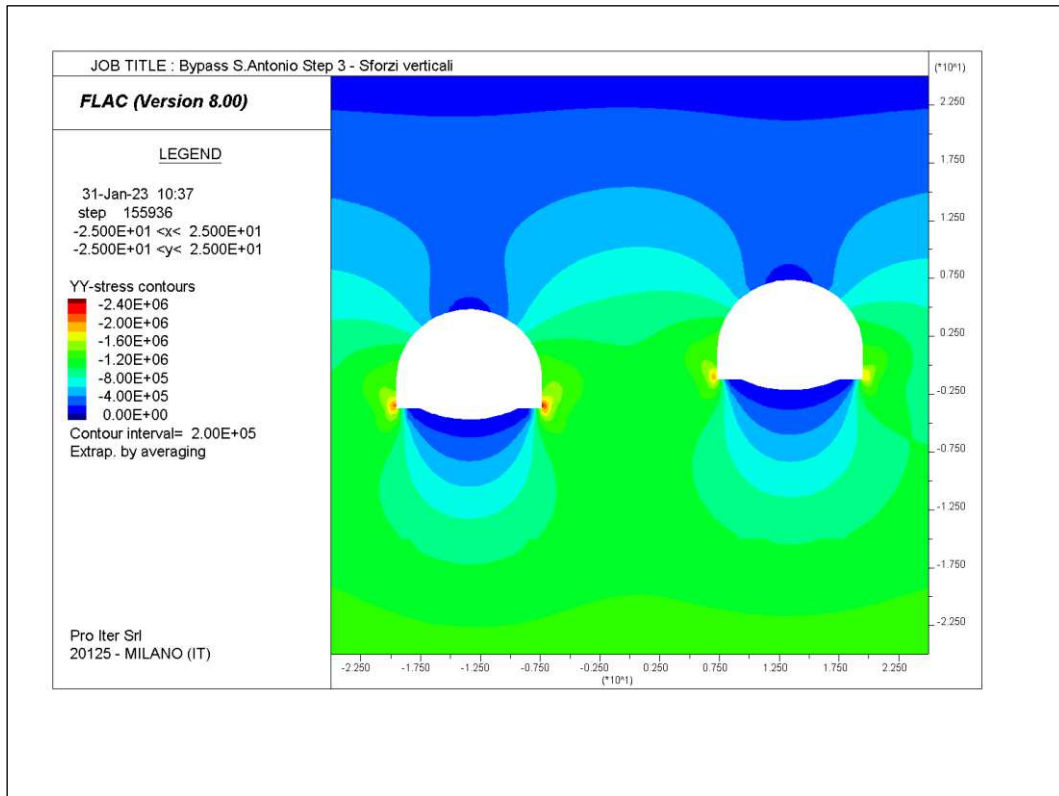
- Sforzi verticali nel modello – Step 1 (Scavo GN – FFS 64%)**



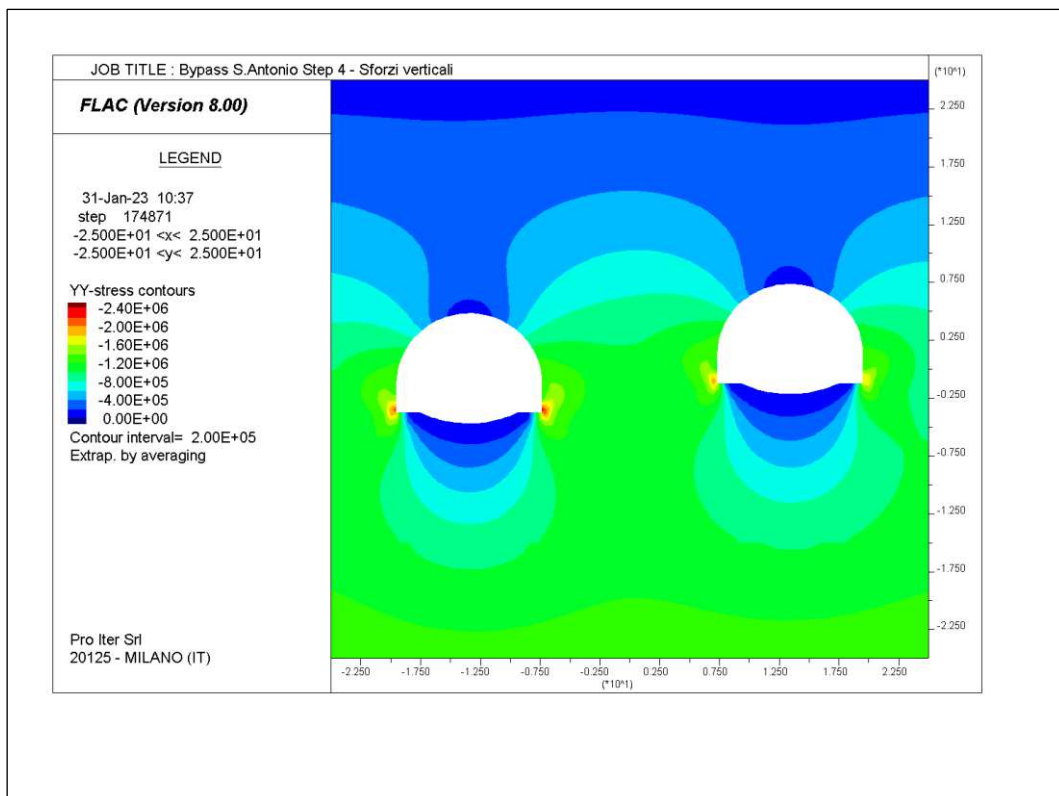
- Sforzi verticali nel modello – Step 2 (Distanza 1.6 m dal fronte GN – FFS 28%)**



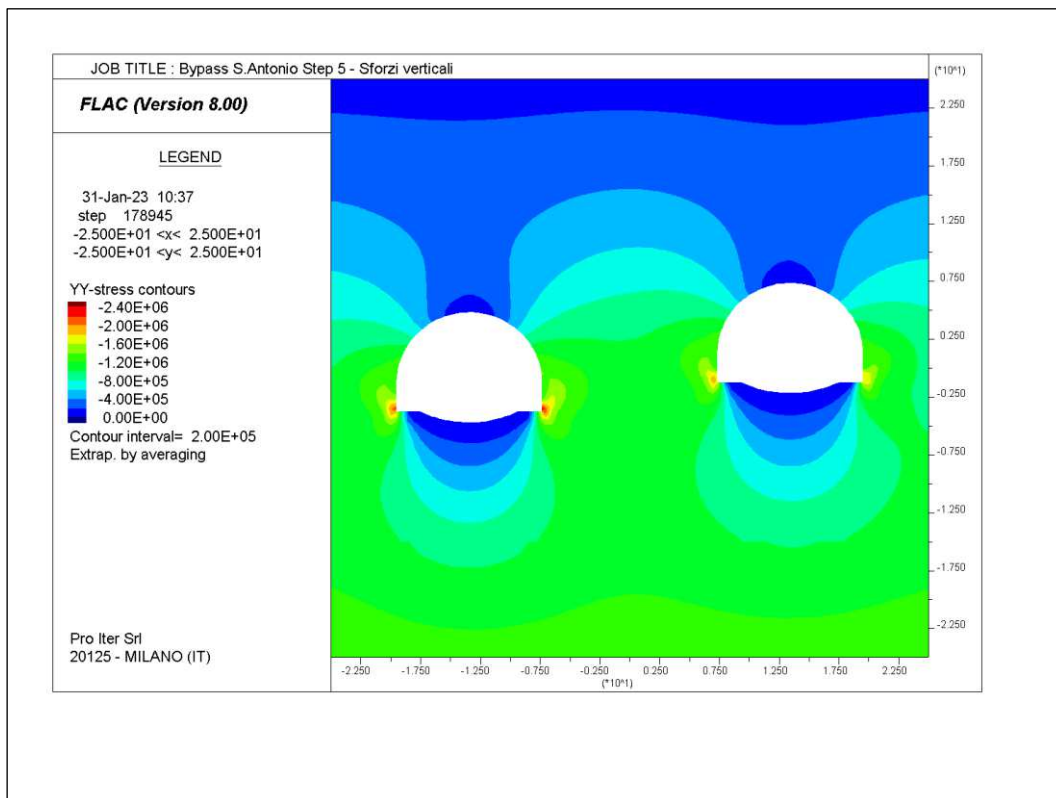
- **Sforzi verticali nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



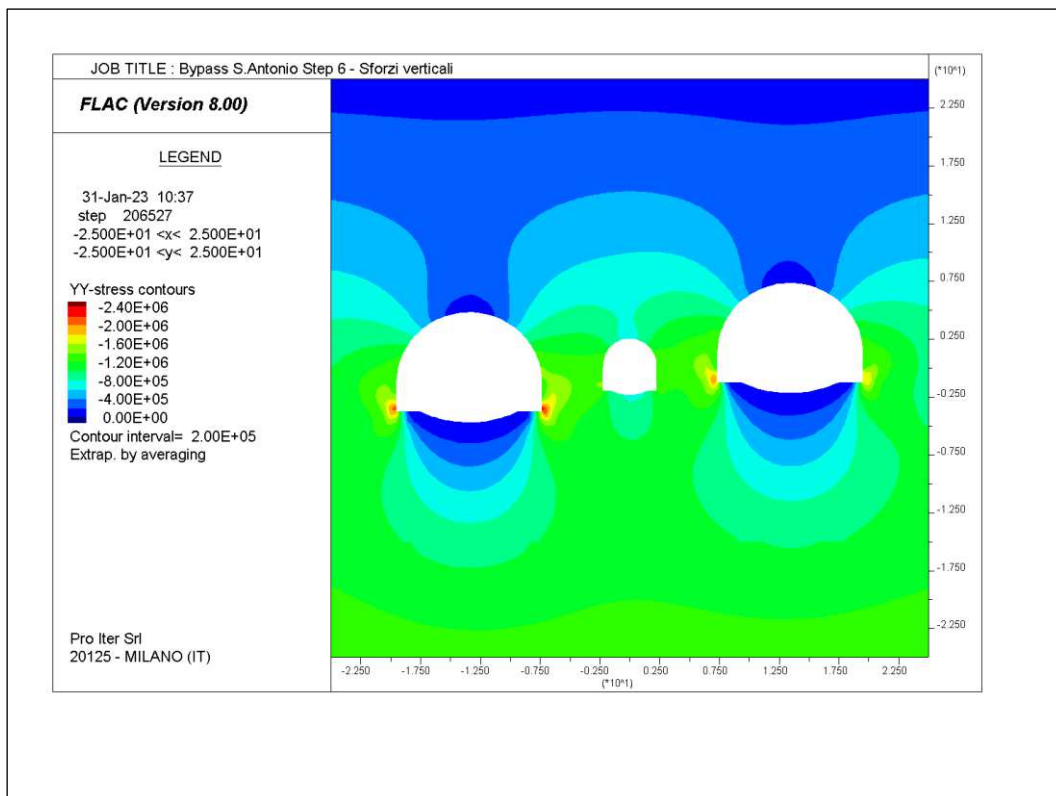
- **Sforzi verticali nel modello – Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



- **Sforzi verticali nel modello – Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**

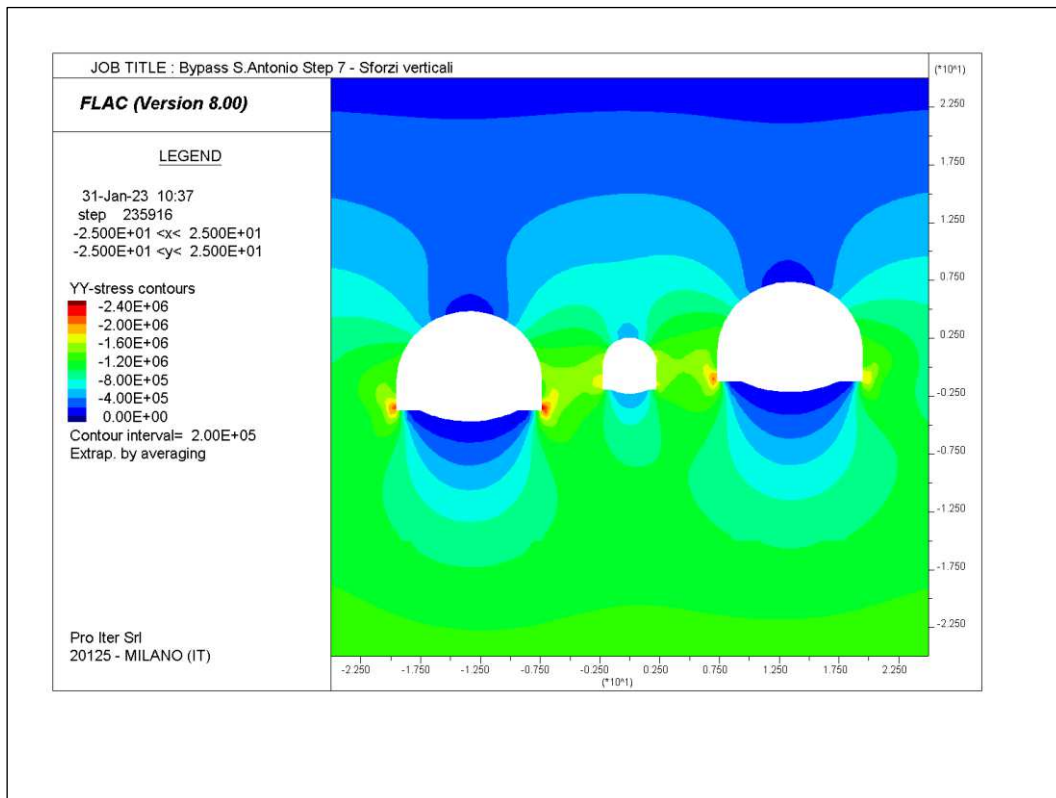


- **Sforzi verticali nel modello – Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**

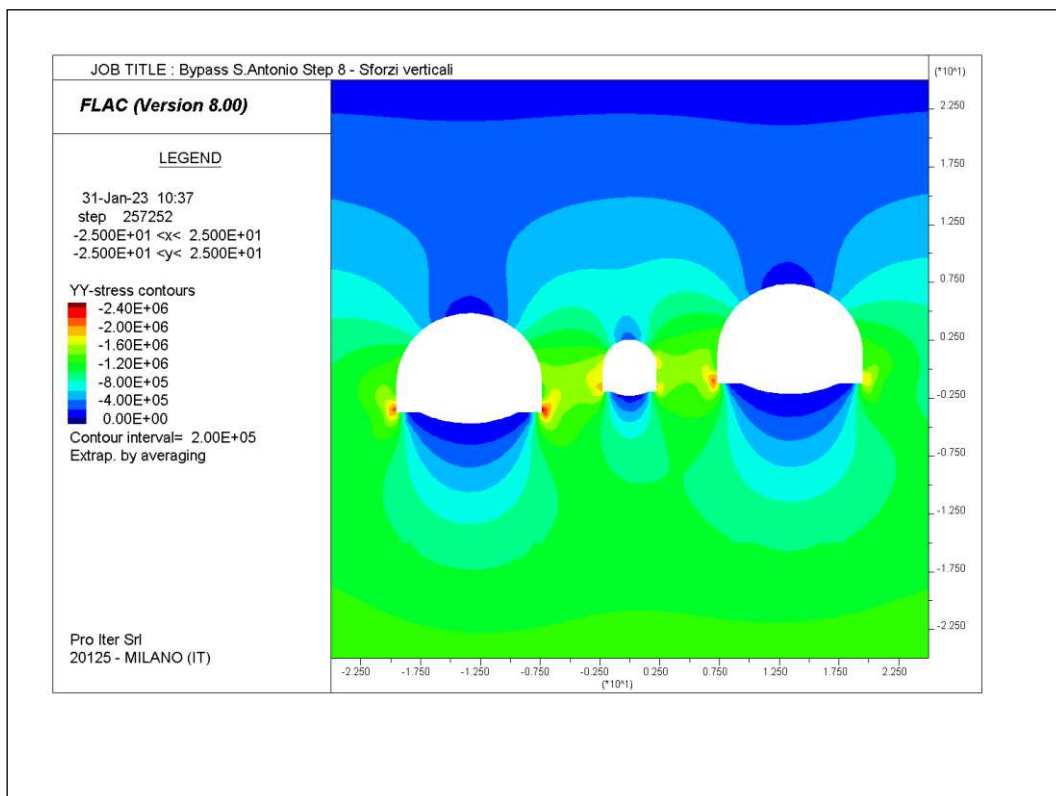




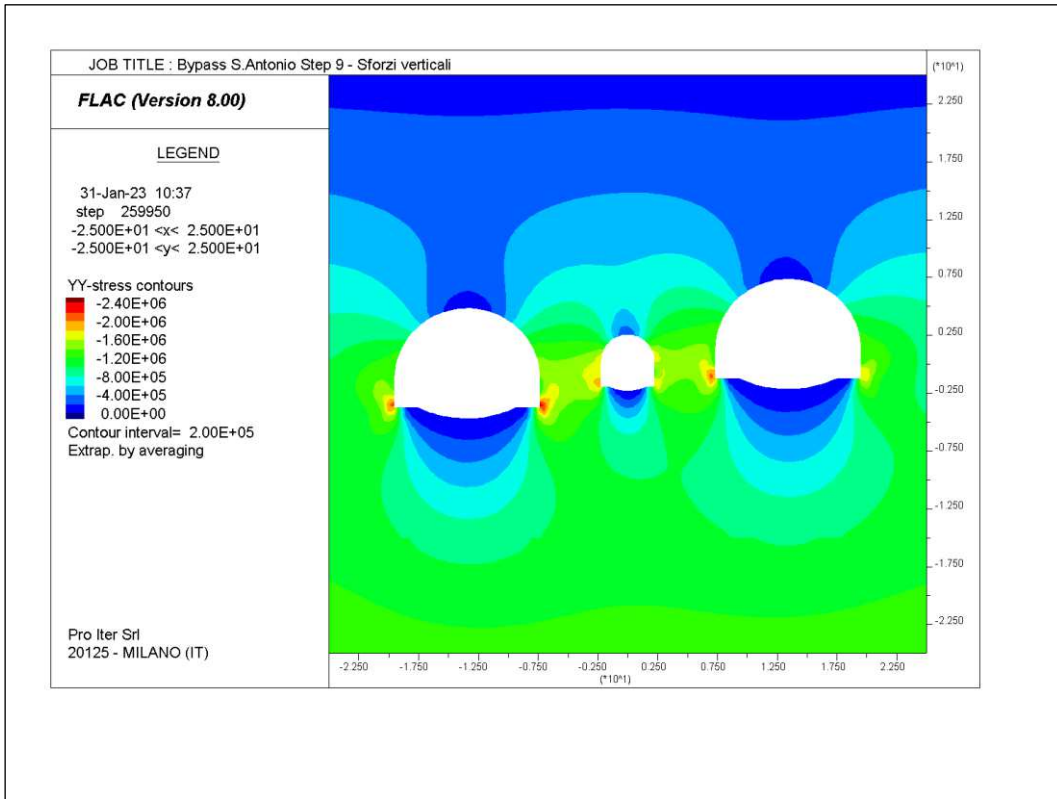
- Sforzi verticali nel modello – Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)



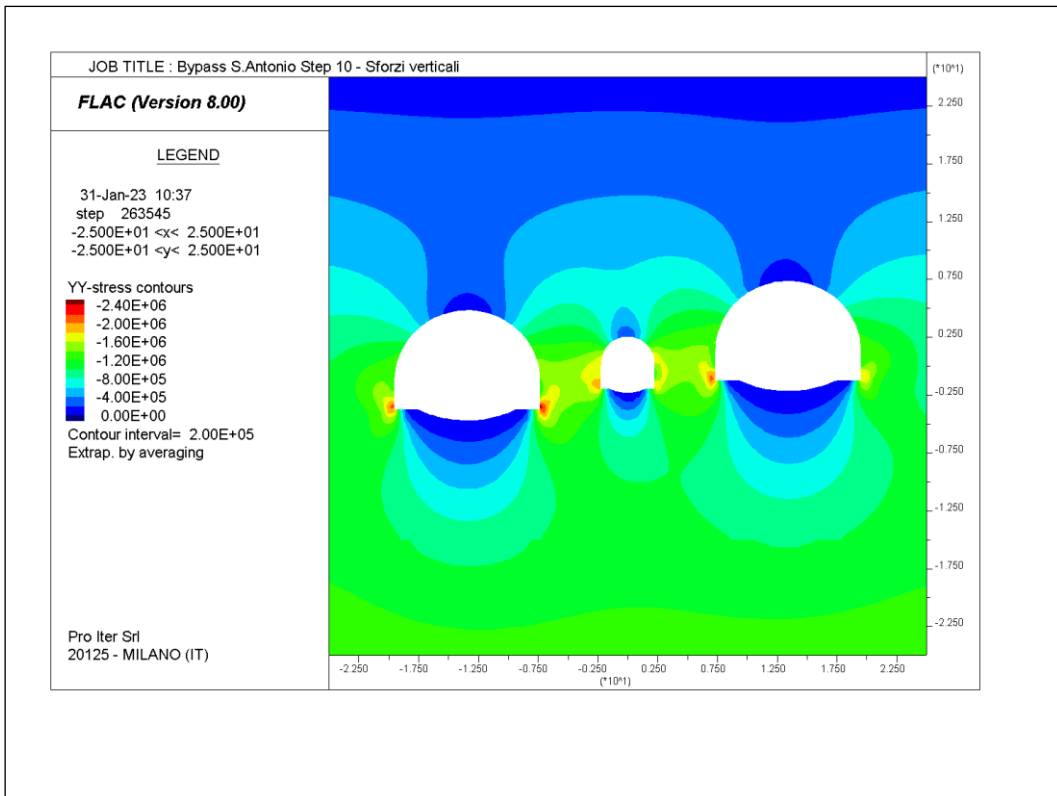
- Sforzi verticali nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)



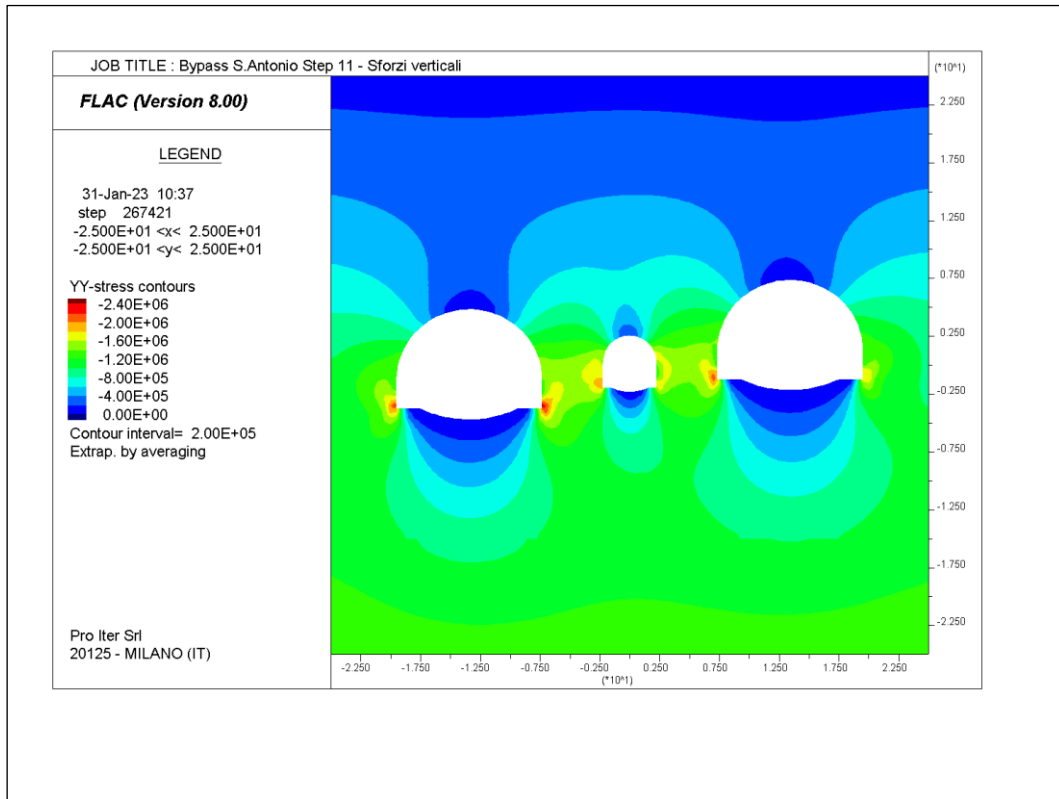
- **Sforzi verticali nel modello – Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)**



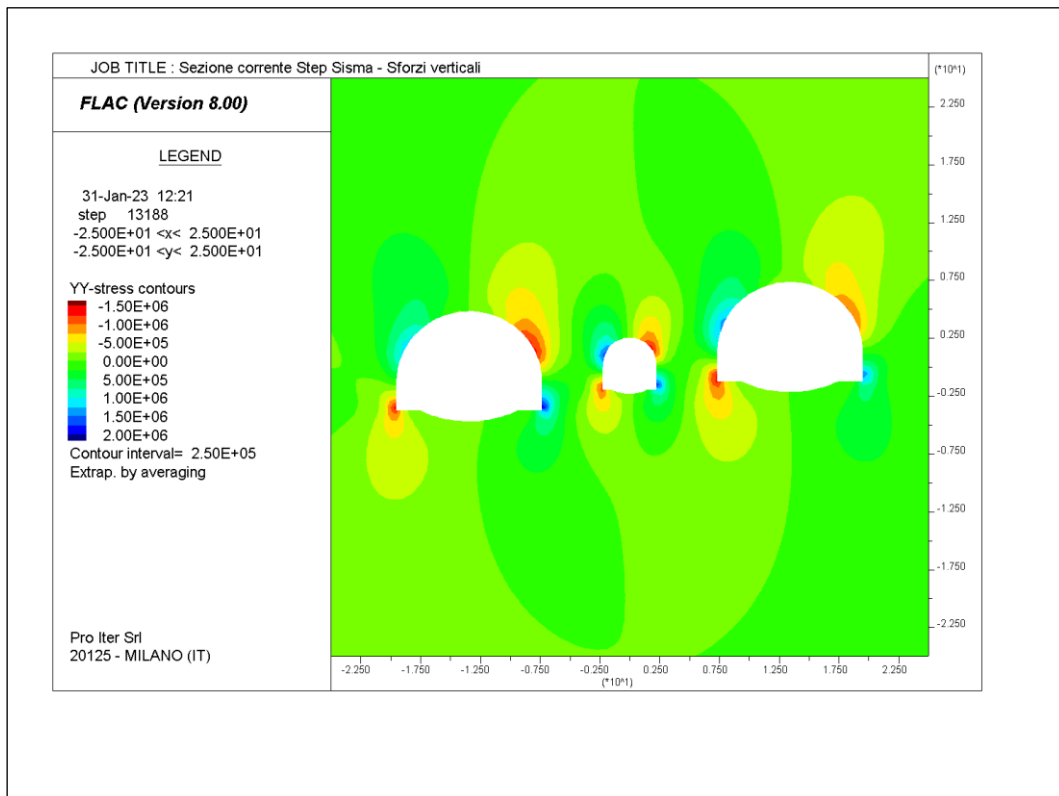
- **Sforzi verticali nel modello – Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**



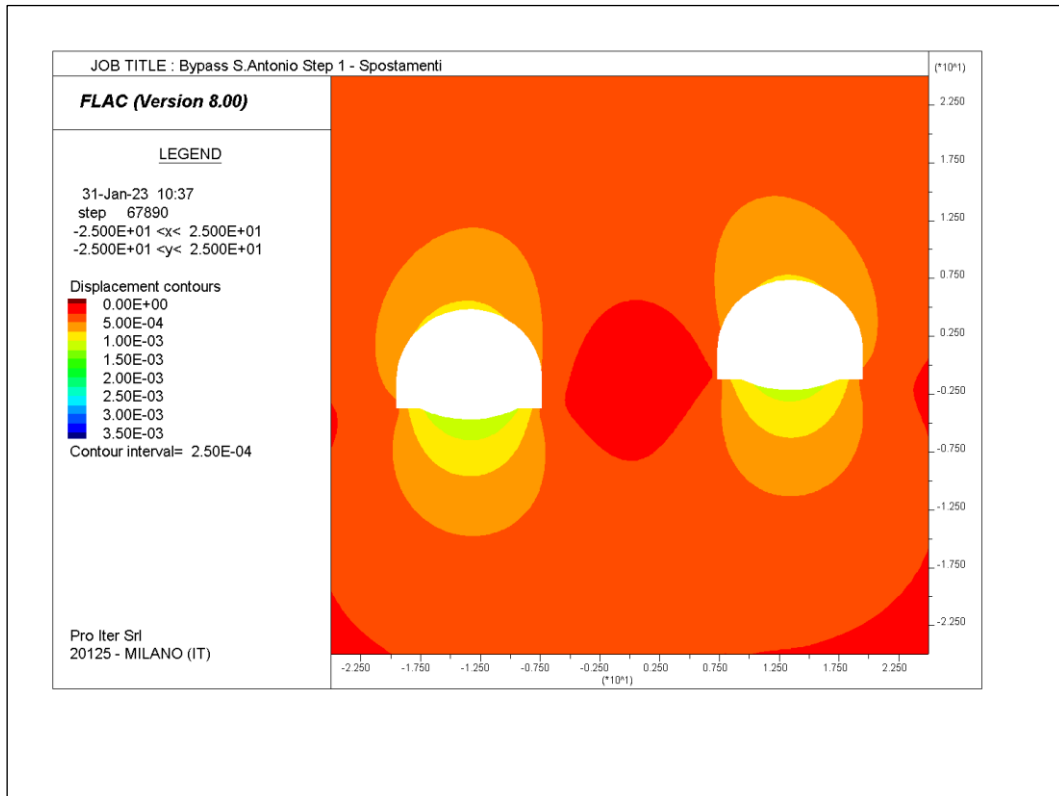
• **Sforzi verticali nel modello – Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



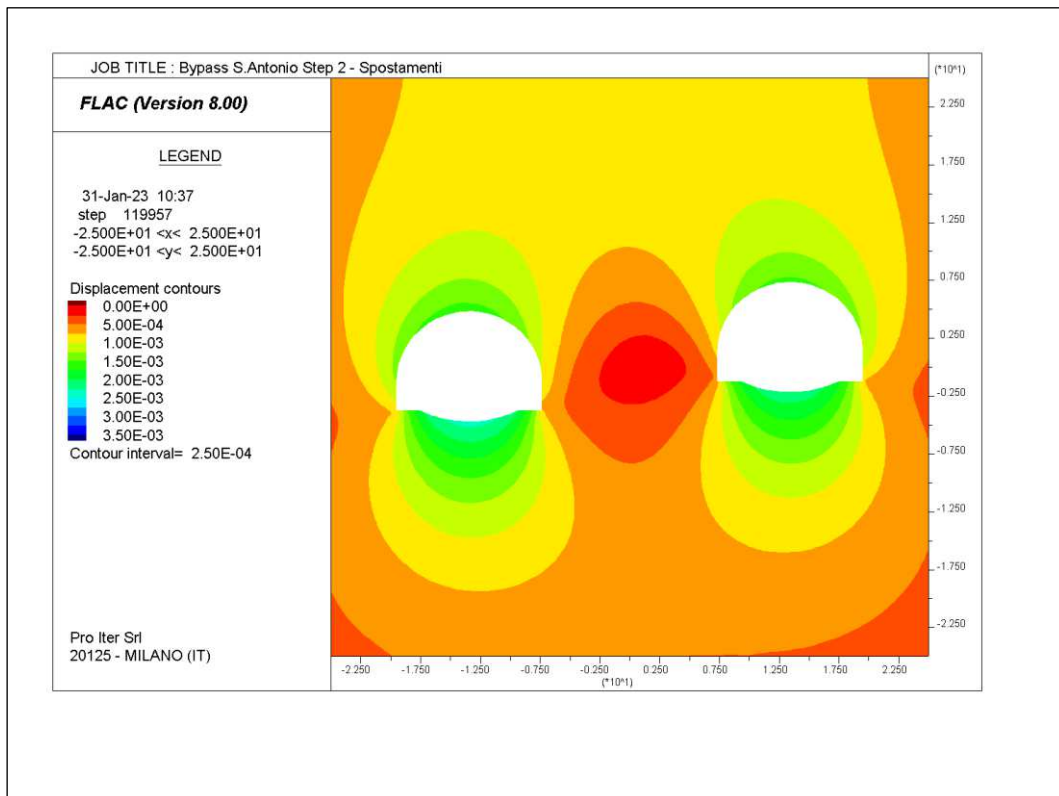
• **Sforzi verticali nel modello – Step 12 (Sisma)**



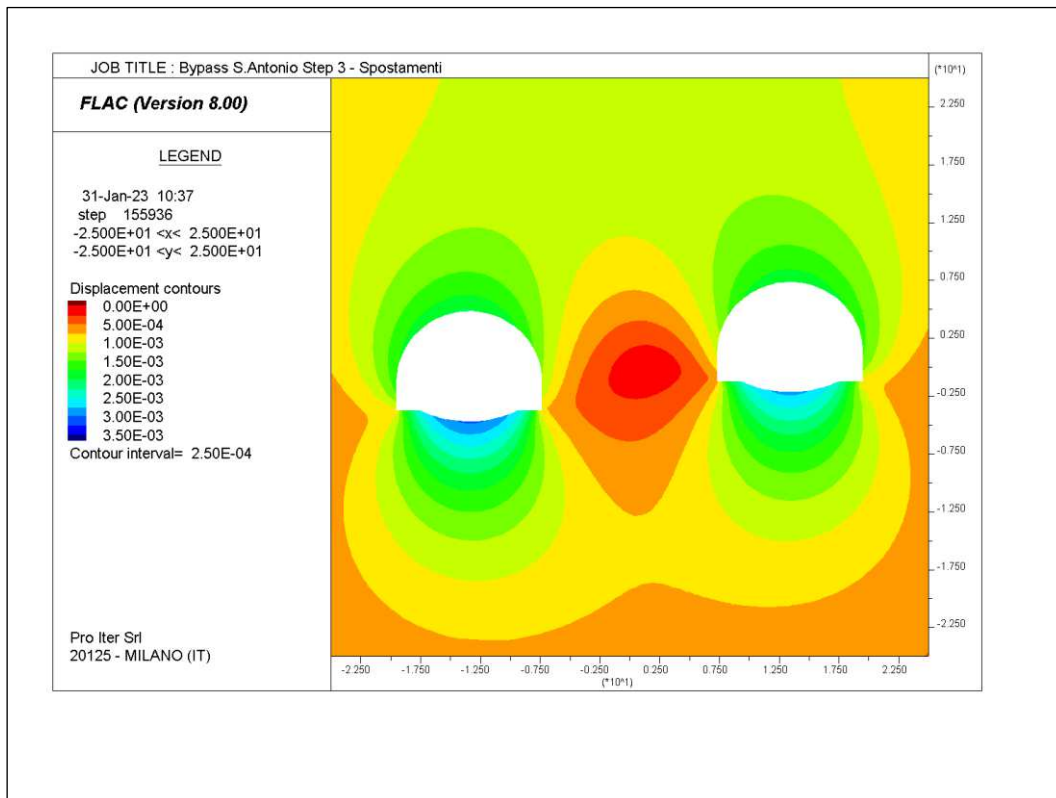
- **Spostamenti totali nel modello – Step 1 (Scavo GN – FFS 64%)**



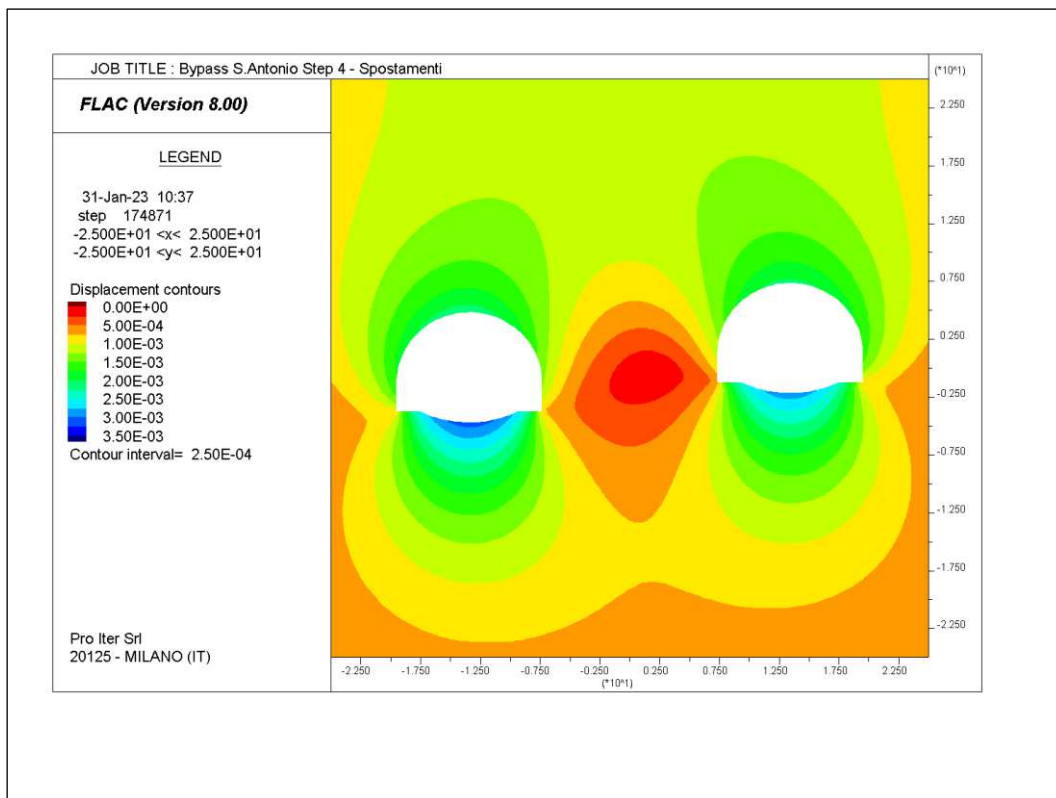
- **Spostamenti totali nel modello – Step 2 (Distanza 1.6 m dal fronte GN – FFS 28%)**



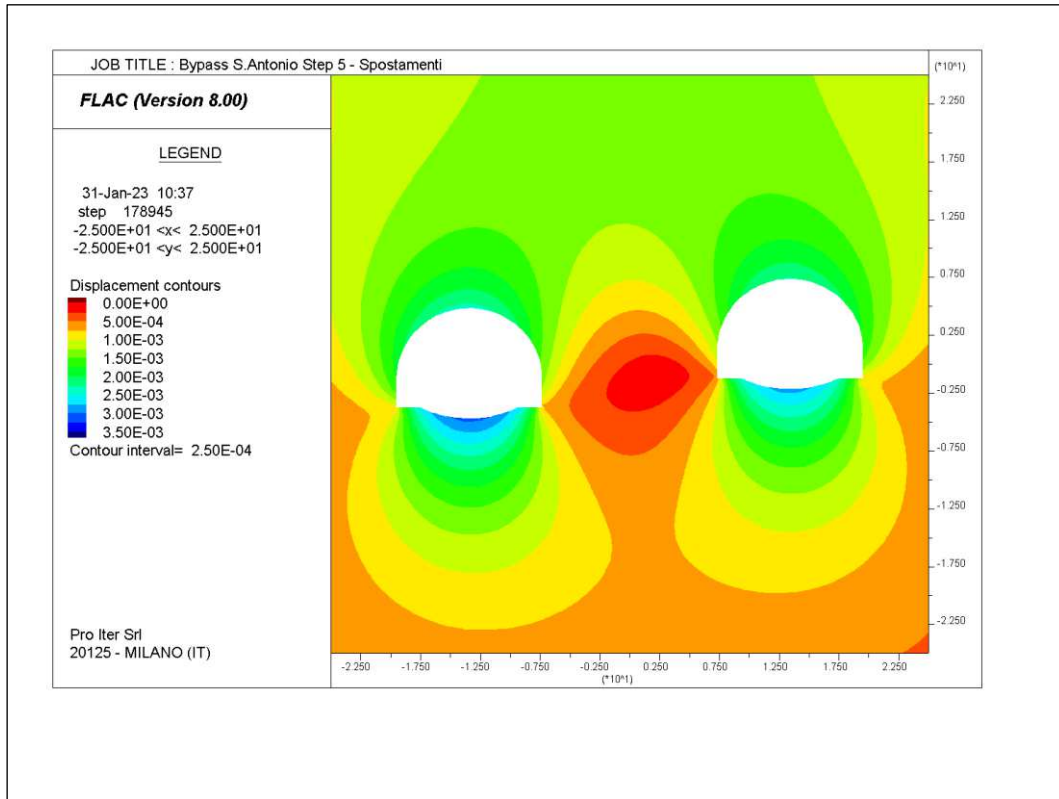
- **Spostamenti totali nel modello – Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



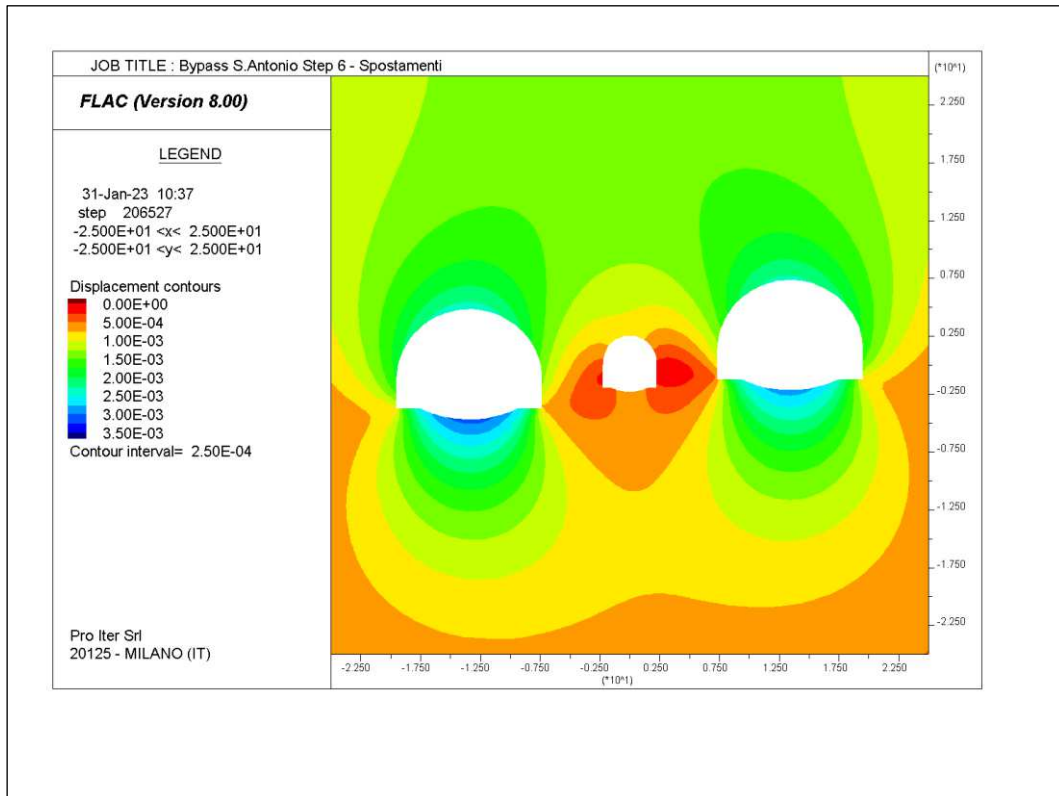
- **Spostamenti totali nel modello – Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



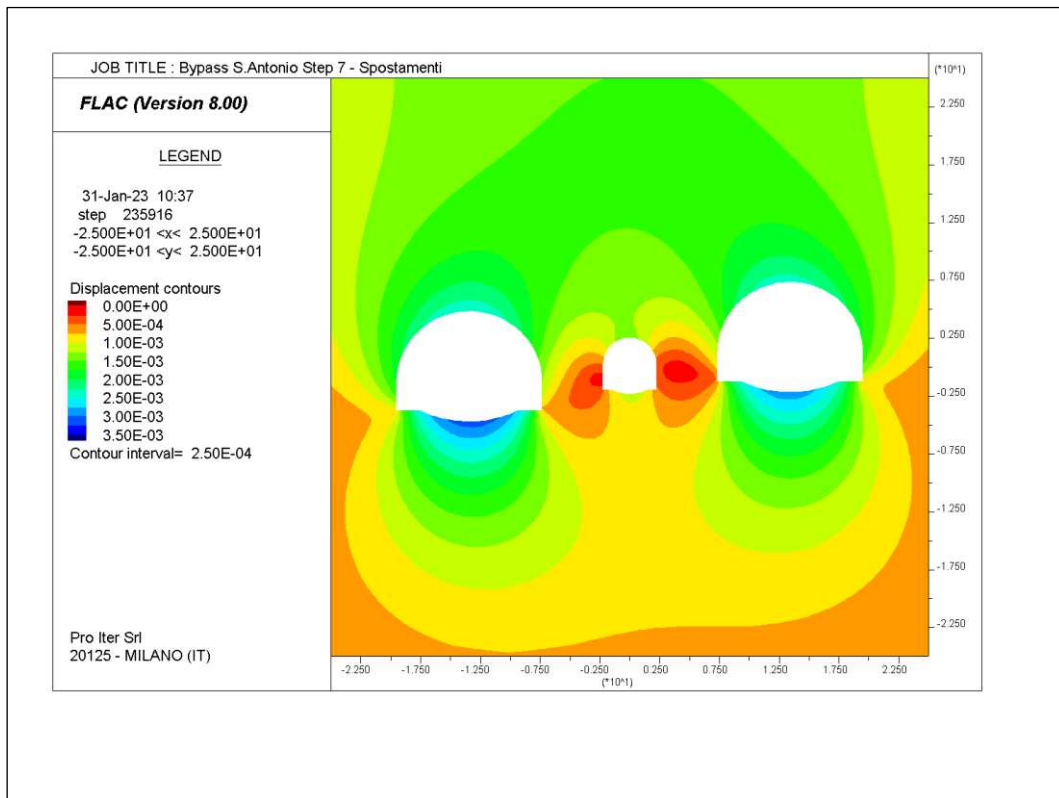
- **Spostamenti totali nel modello – Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**



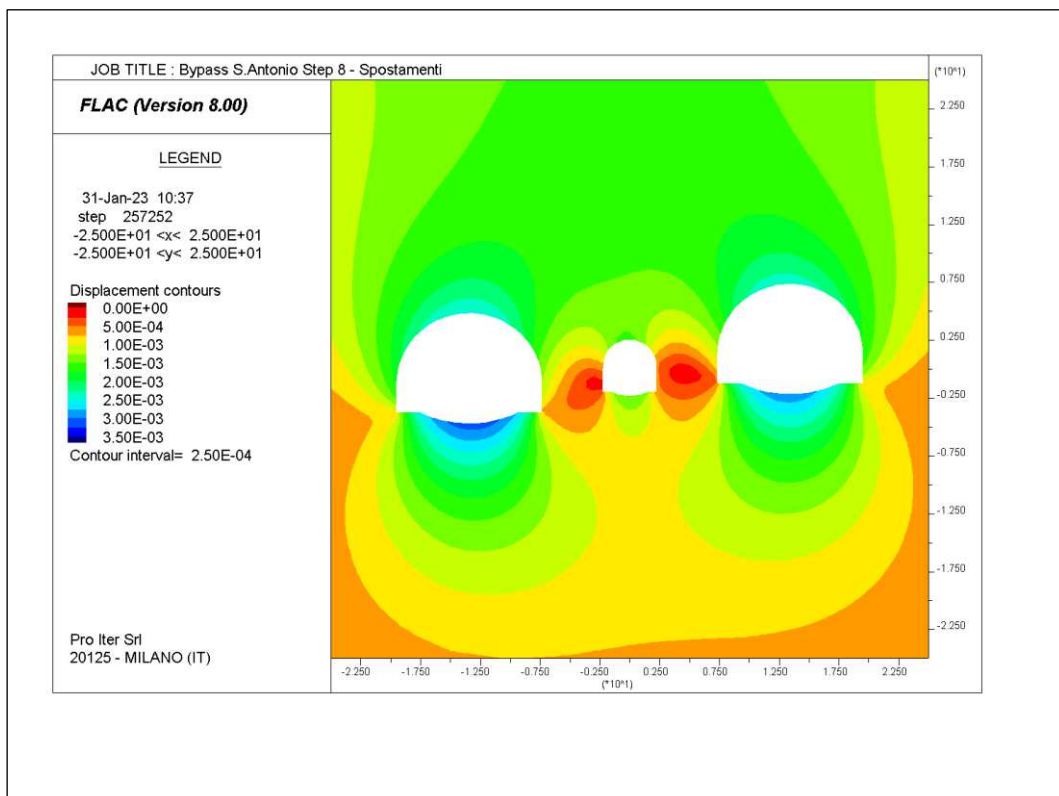
- **Spostamenti totali nel modello – Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**



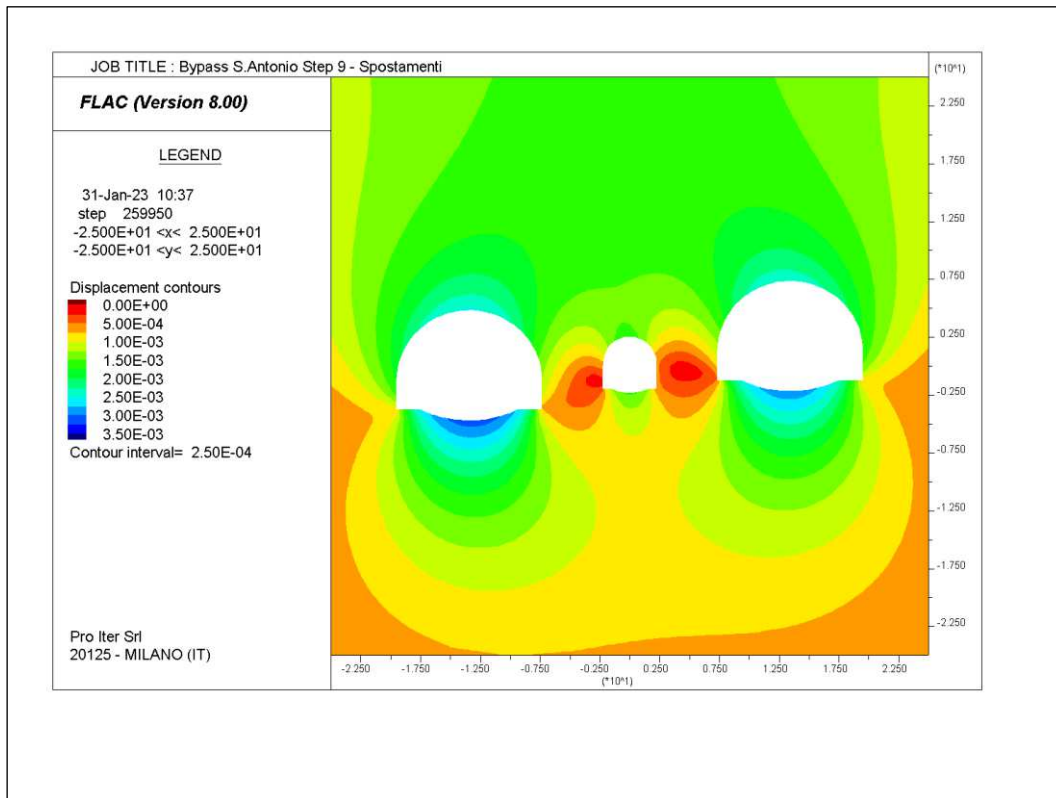
- **Spostamenti totali nel modello – Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)**



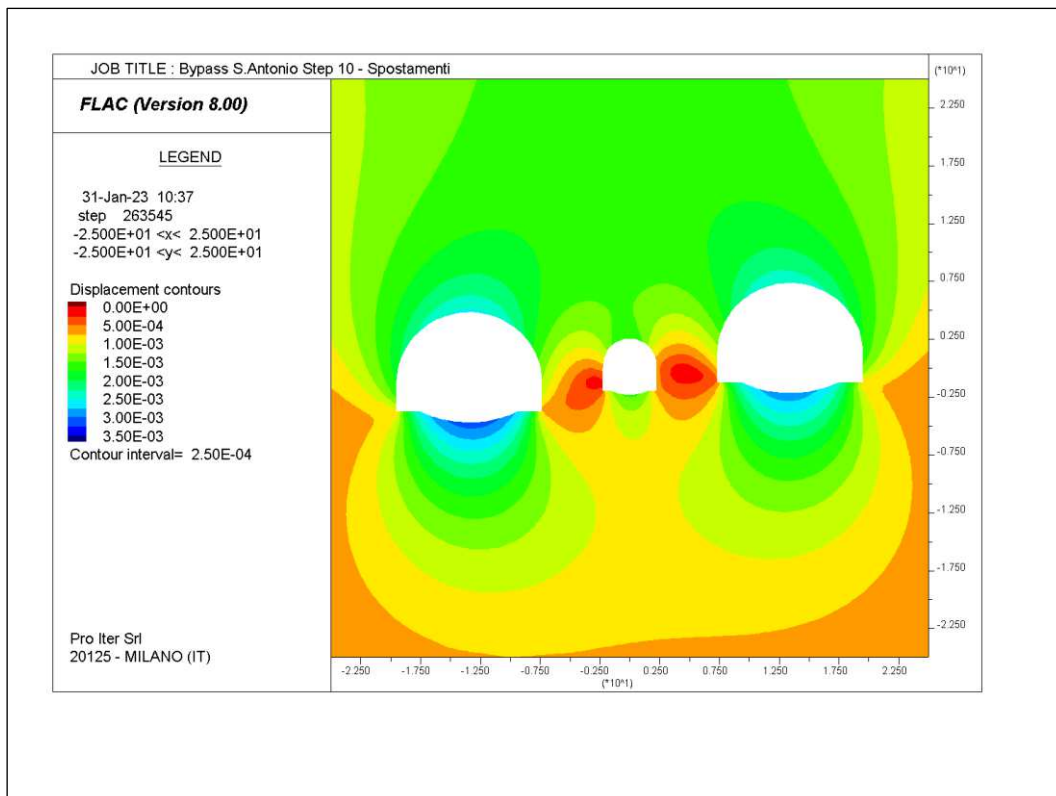
- **Spostamenti totali nel modello – Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)**



- **Spostamenti totali nel modello – Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)**

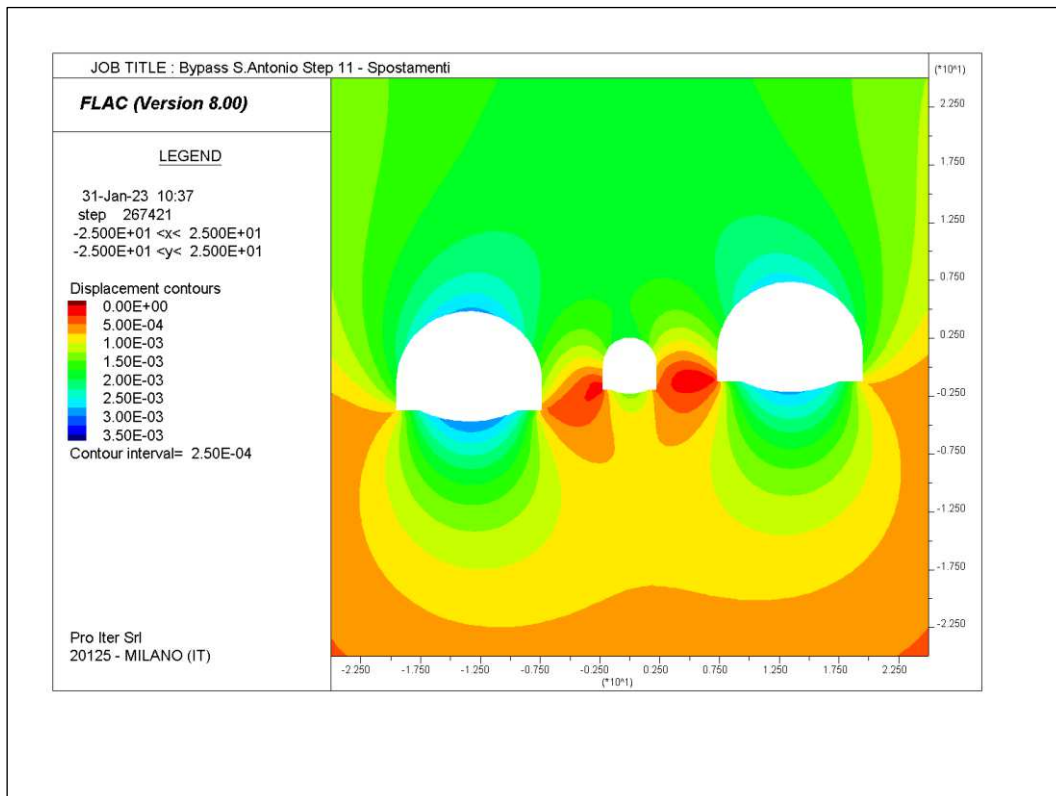


- **Spostamenti totali nel modello – Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**

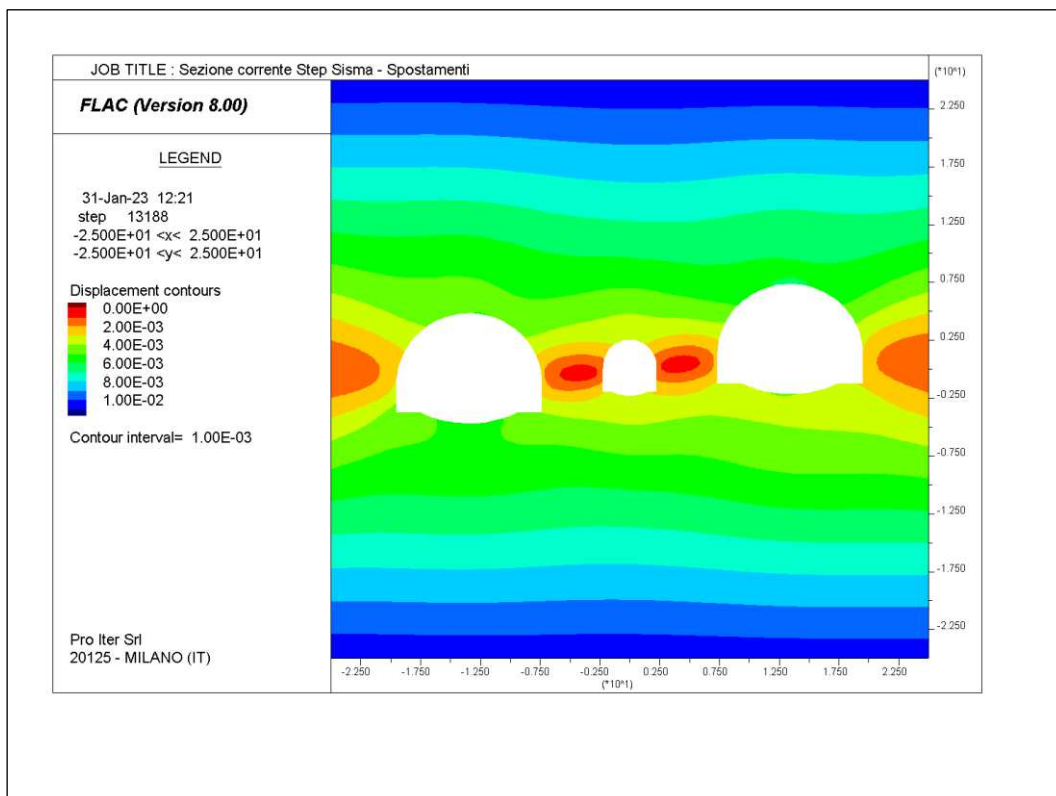




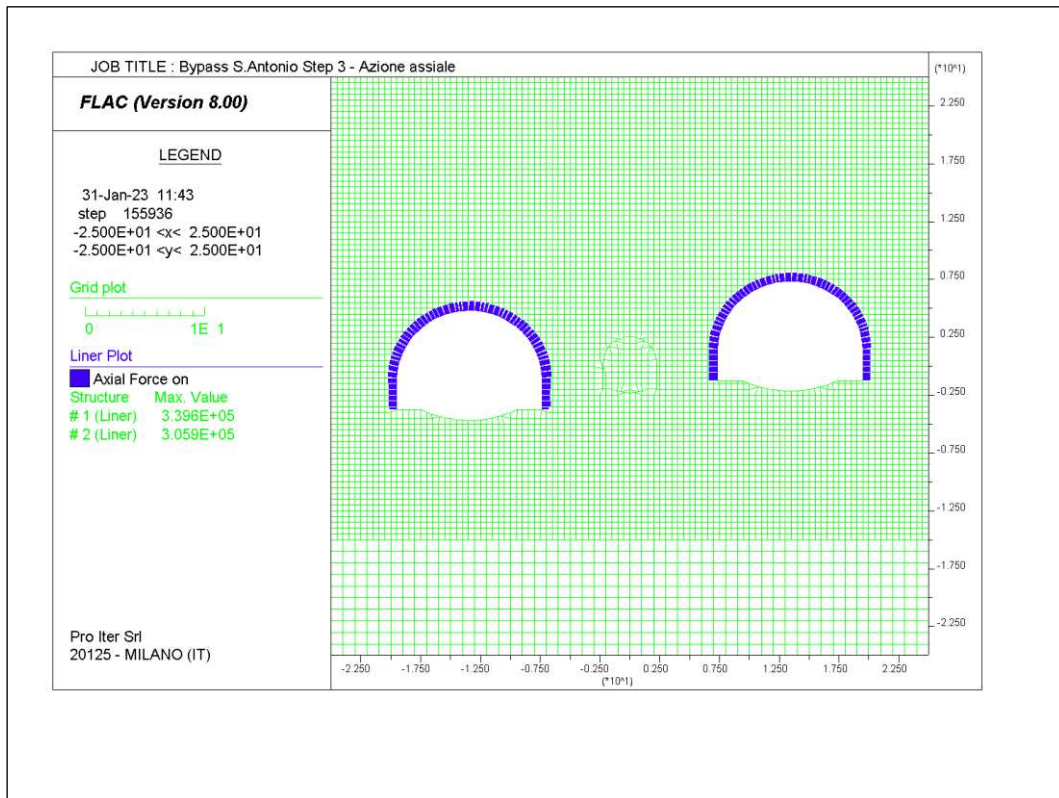
- **Spostamenti totali nel modello – Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



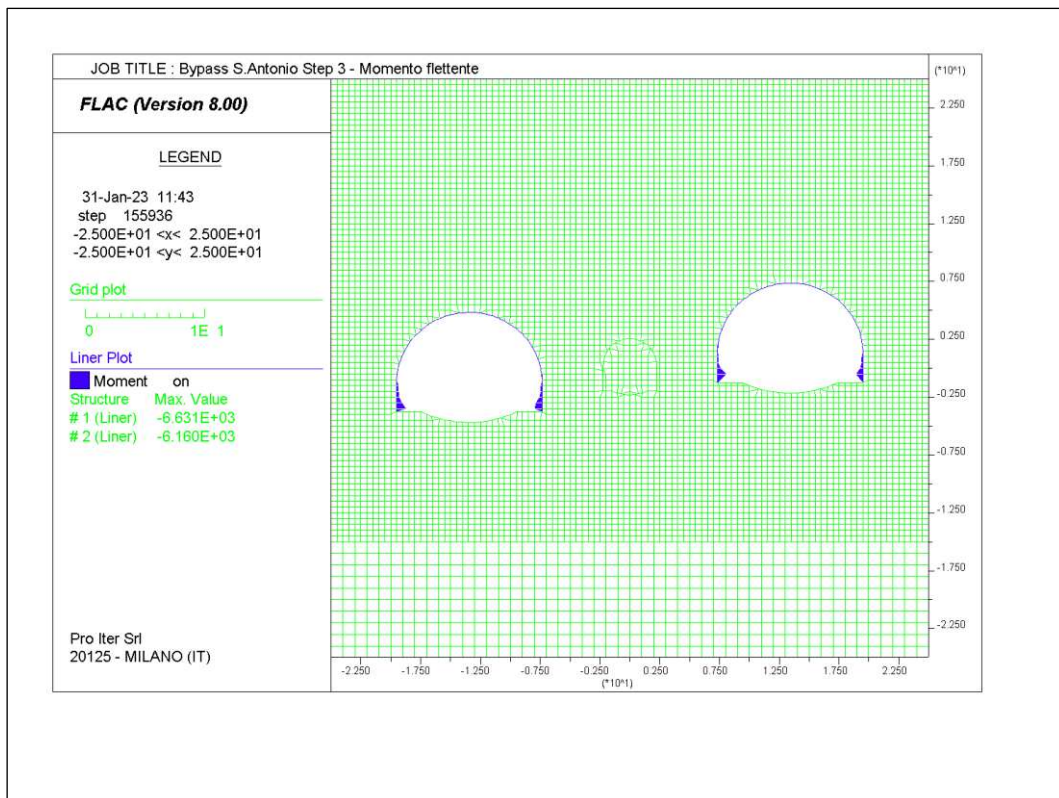
- **Spostamenti totali nel modello – Step 12 (Sisma)**



- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase [N] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



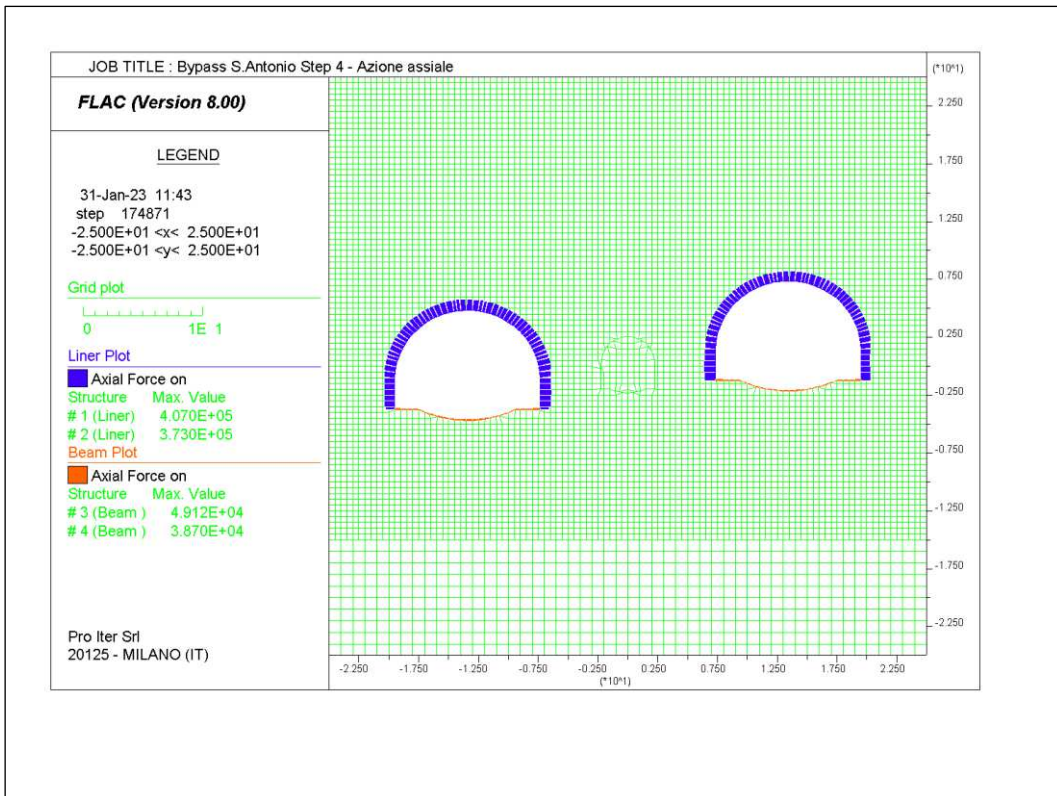
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase [N] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



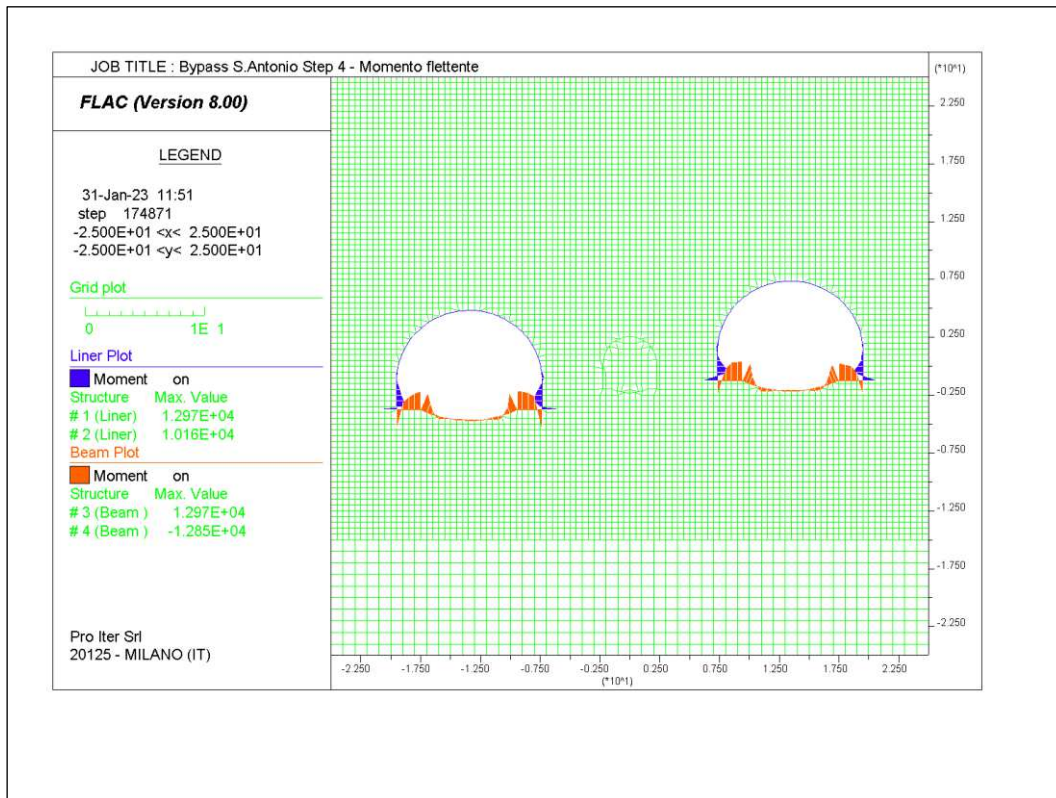
- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase [Nm] - Step 3 (Installazione rivestimento di prima fase GN – FFS 5%)**



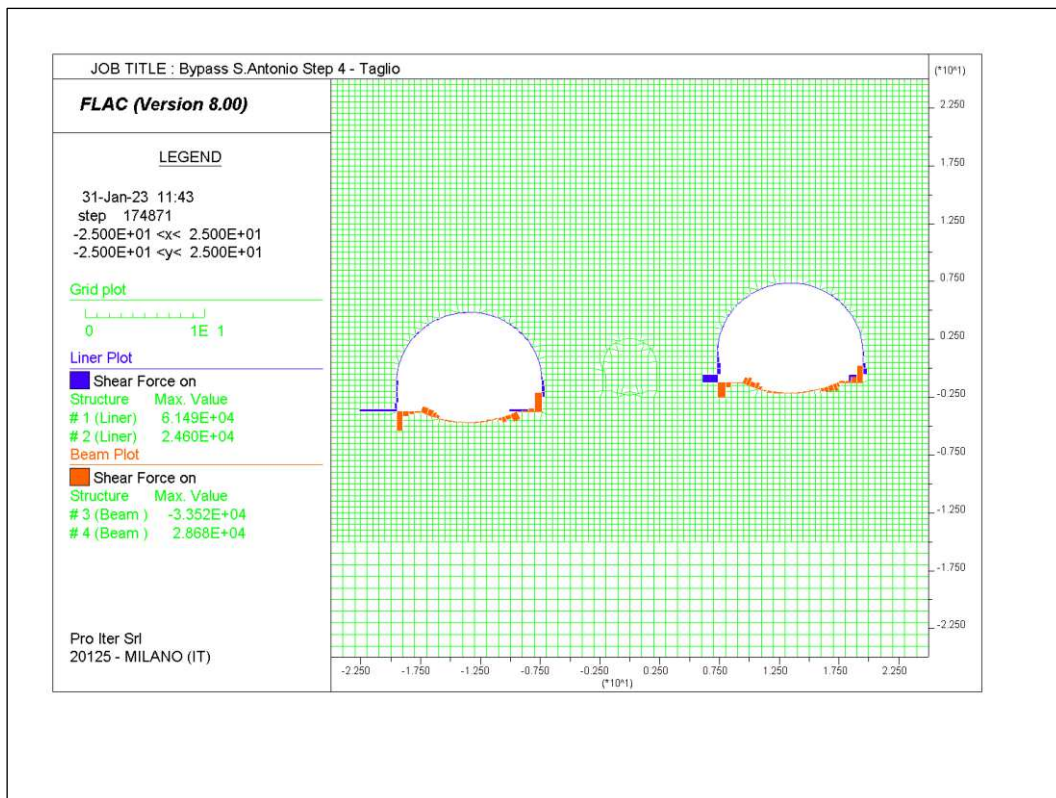
- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



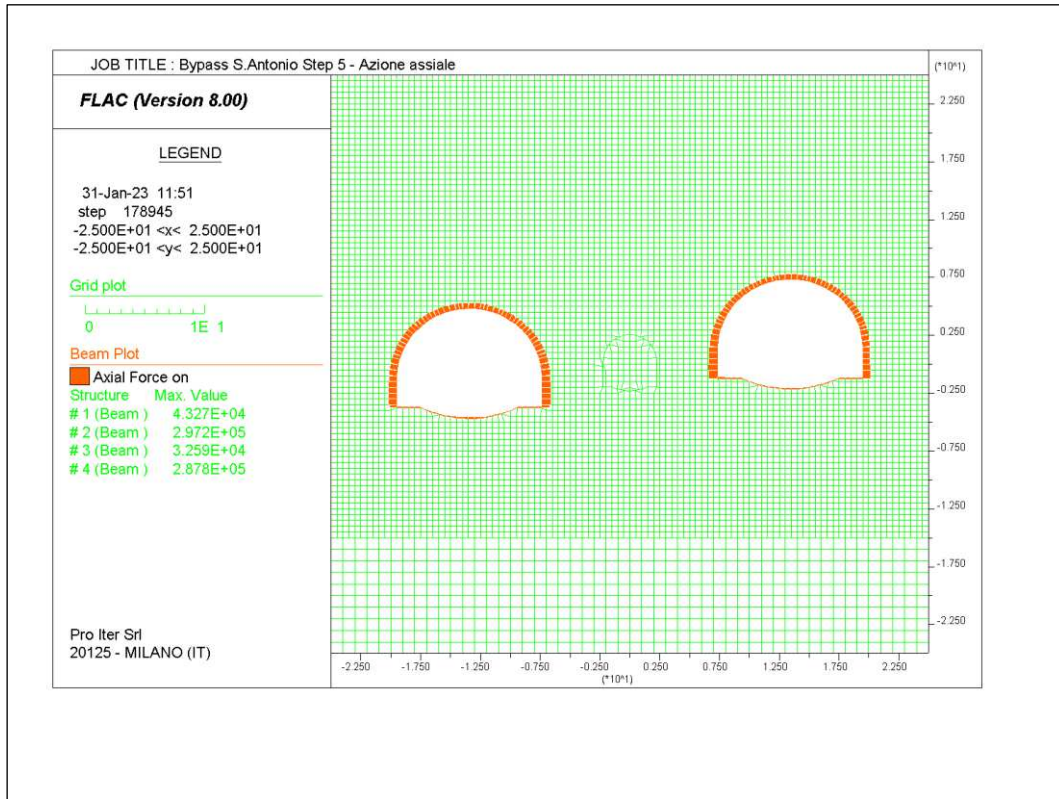
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase [Nm] - Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase [N] - Step 4 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio GN – FFS nulle)**



- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**



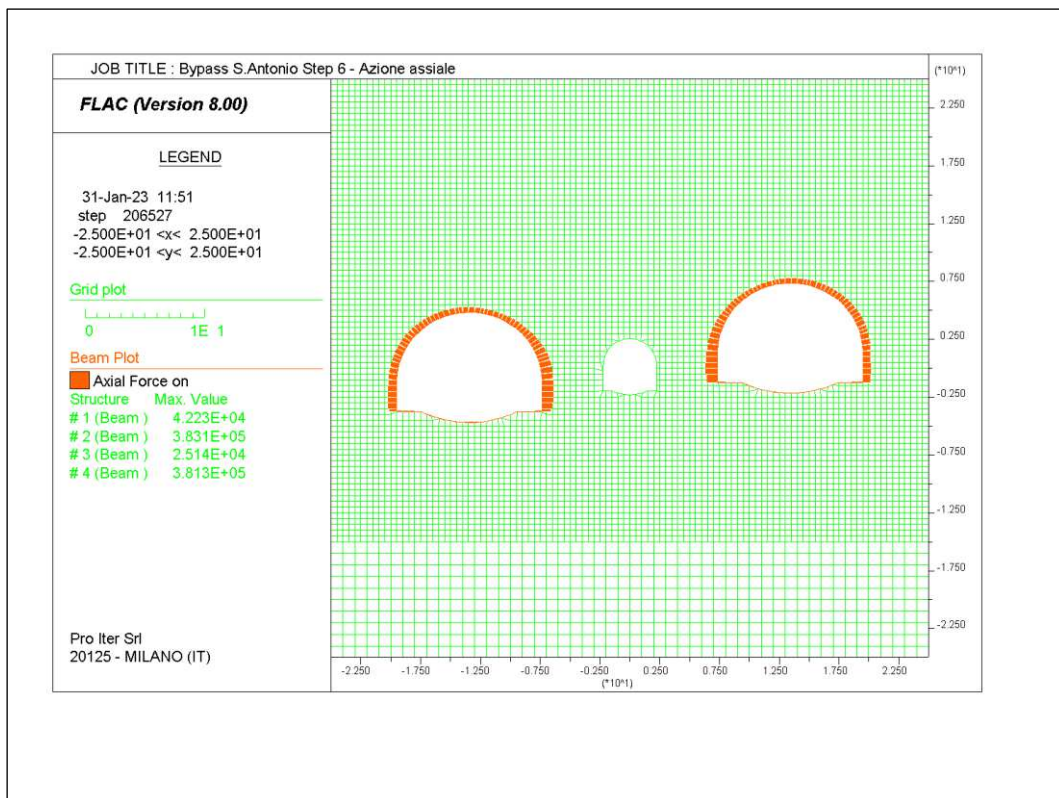
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase e definitivo [Nm] - Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**



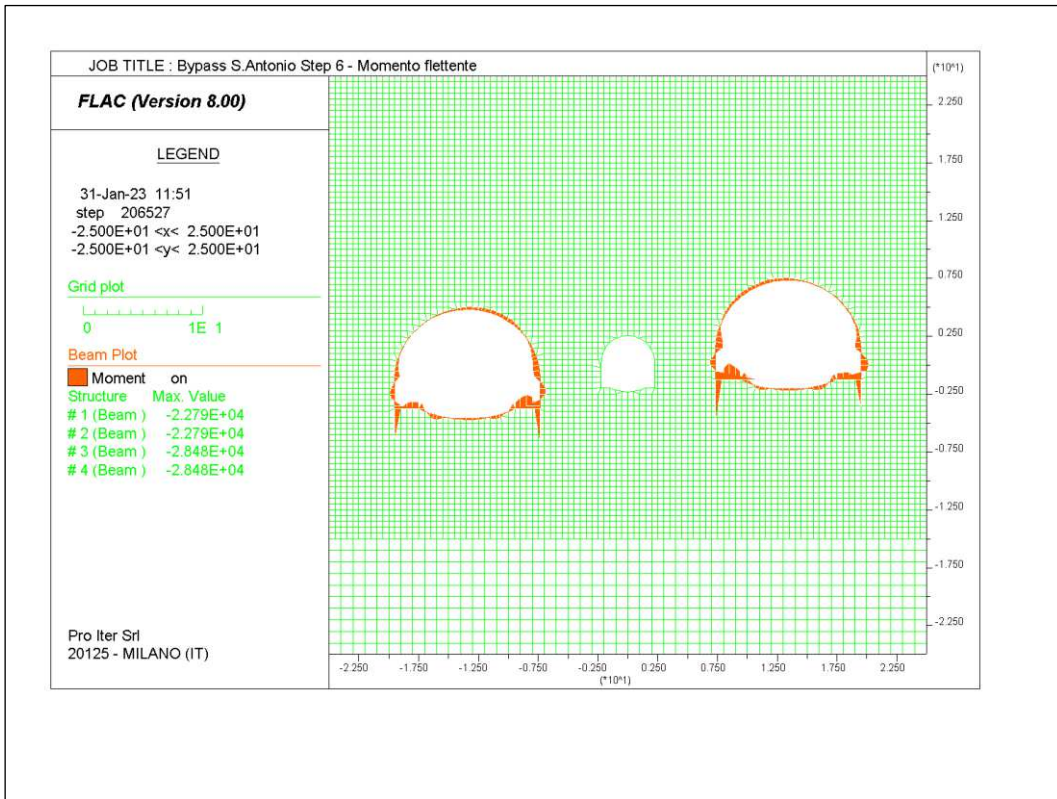
- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 5 (Installazione rivestimento definitivo in calotta e piedritti GN)**



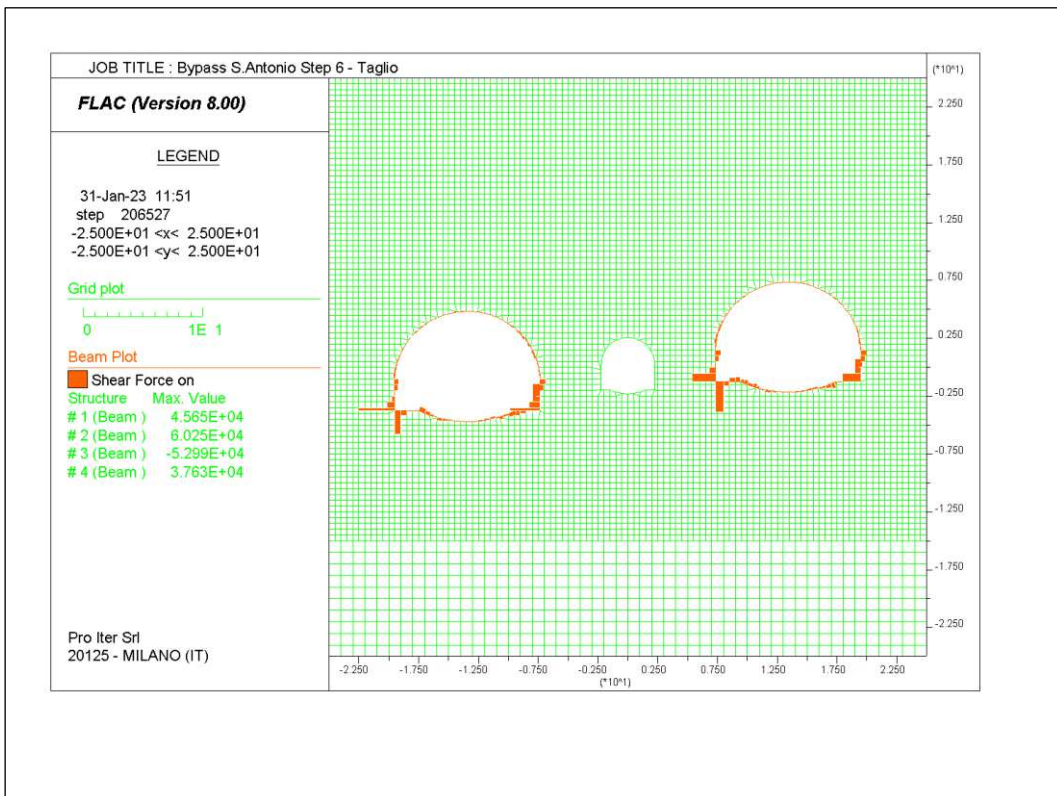
- **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**



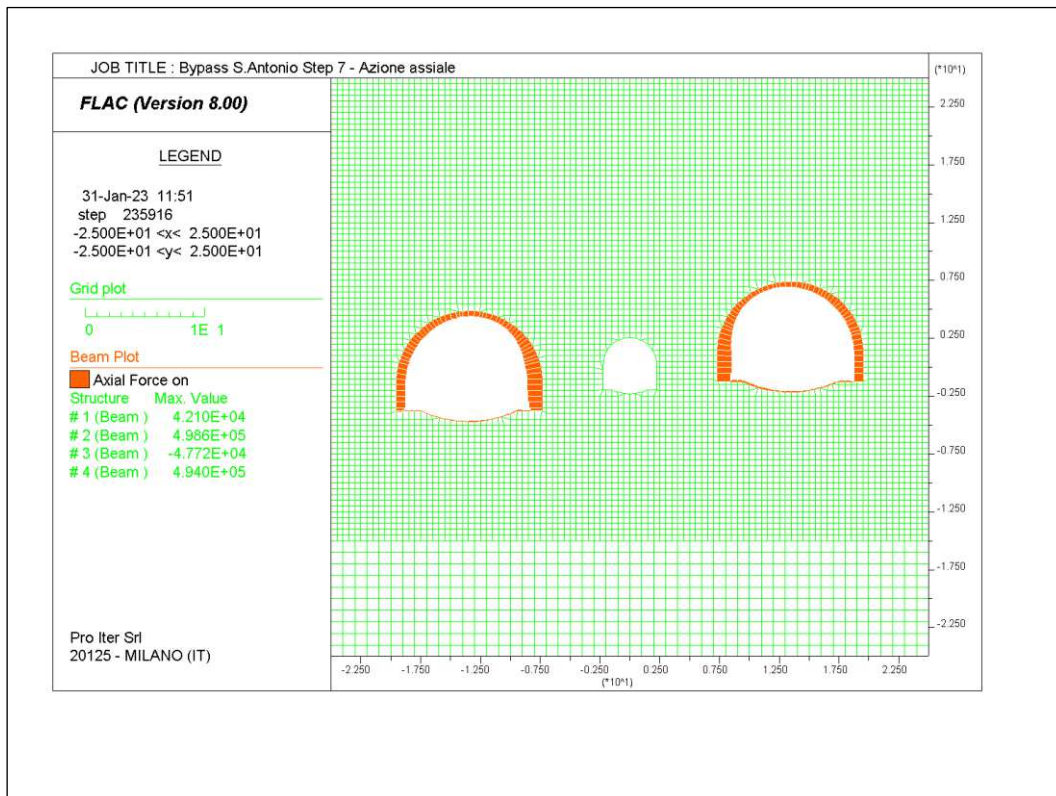
• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**



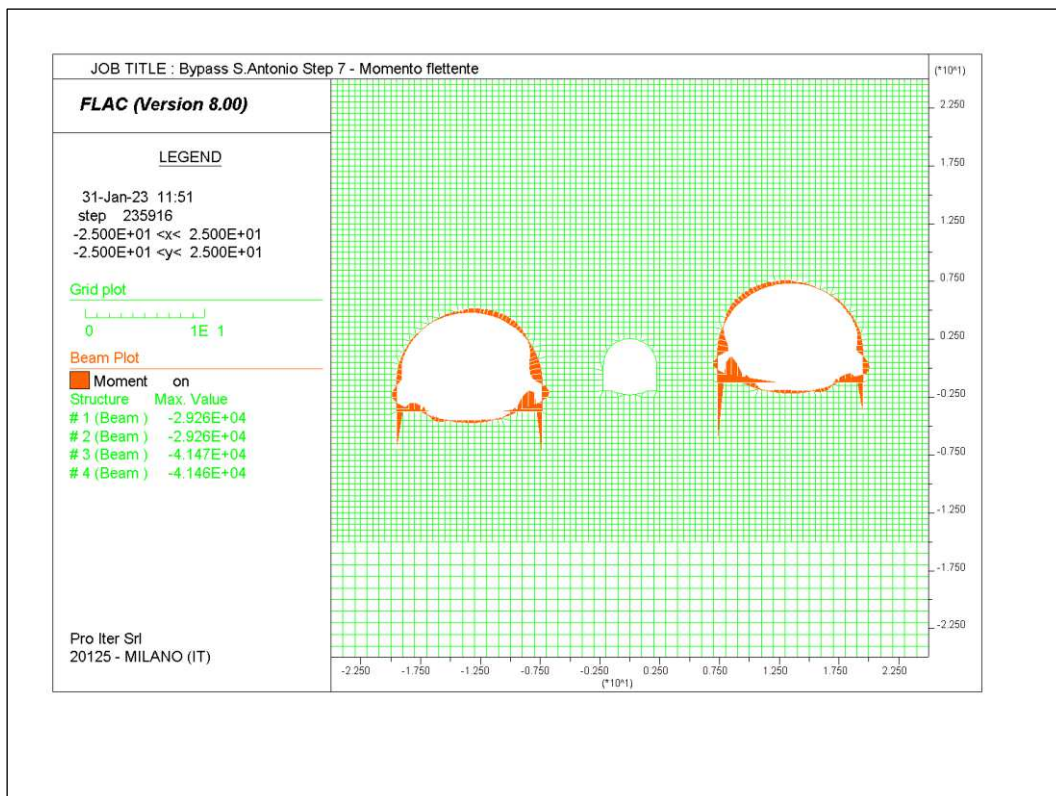
• **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 6 (Scavo Bypass – FFS 70%)**



- **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)**



- **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)**

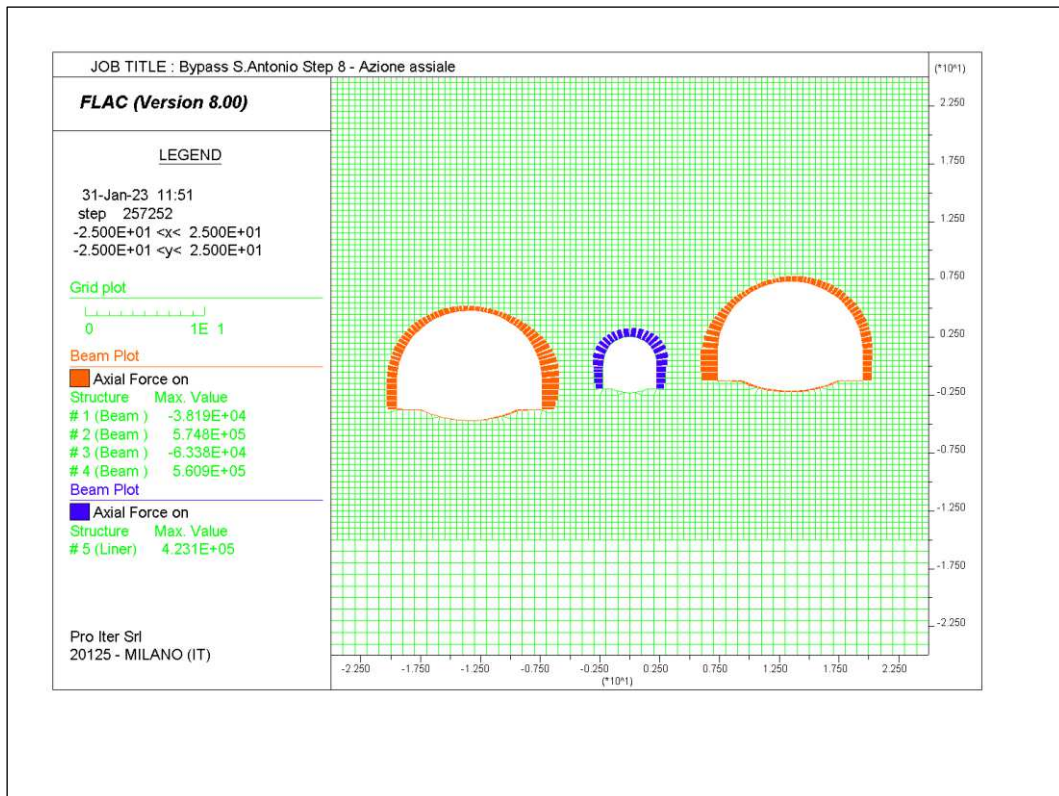




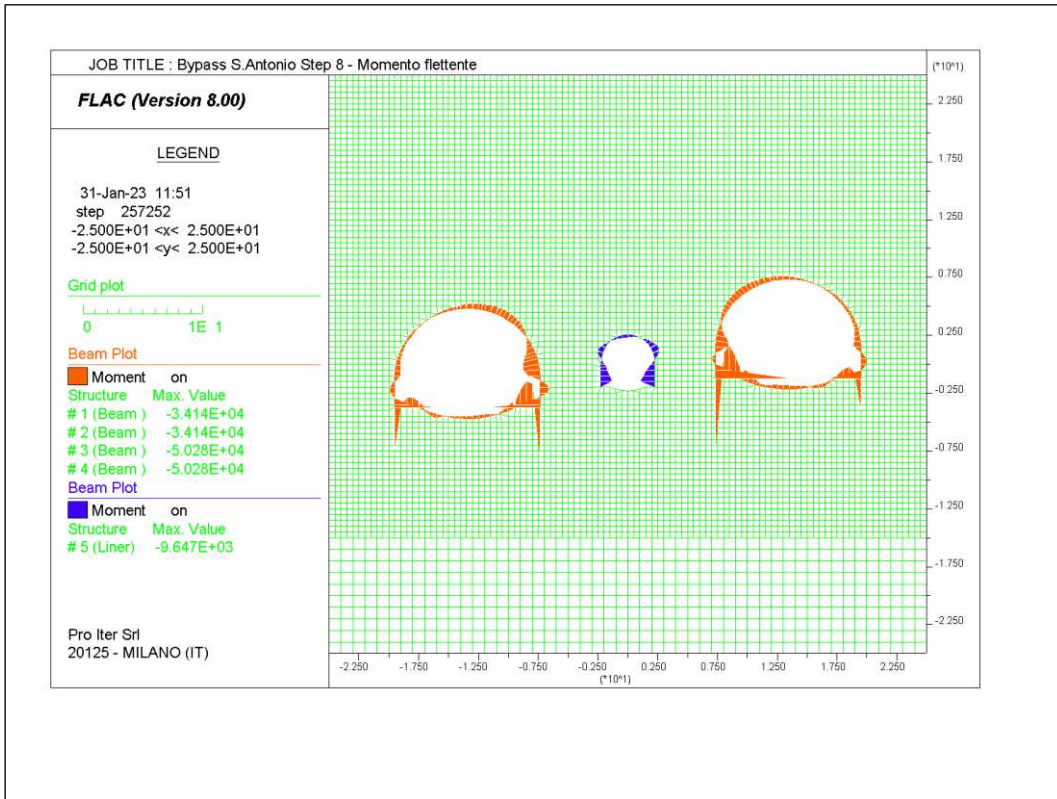
- **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 7 (Distanza 1.2 m dal fronte BP – FFS 36%)**



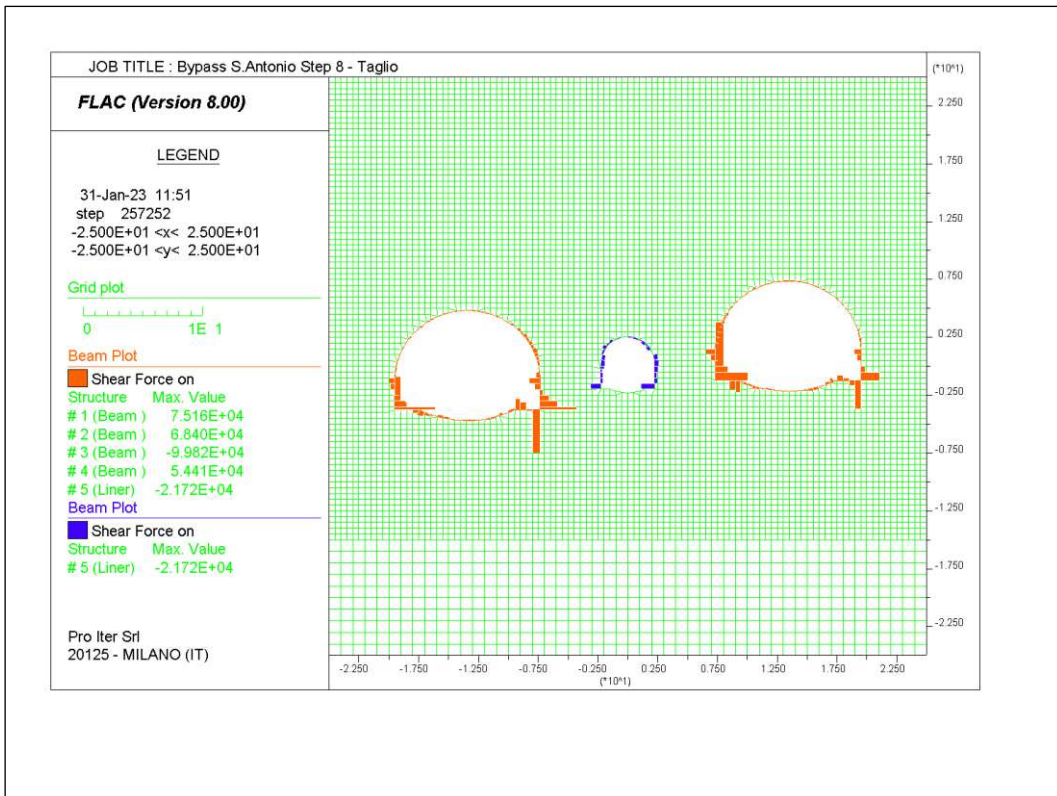
- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)**



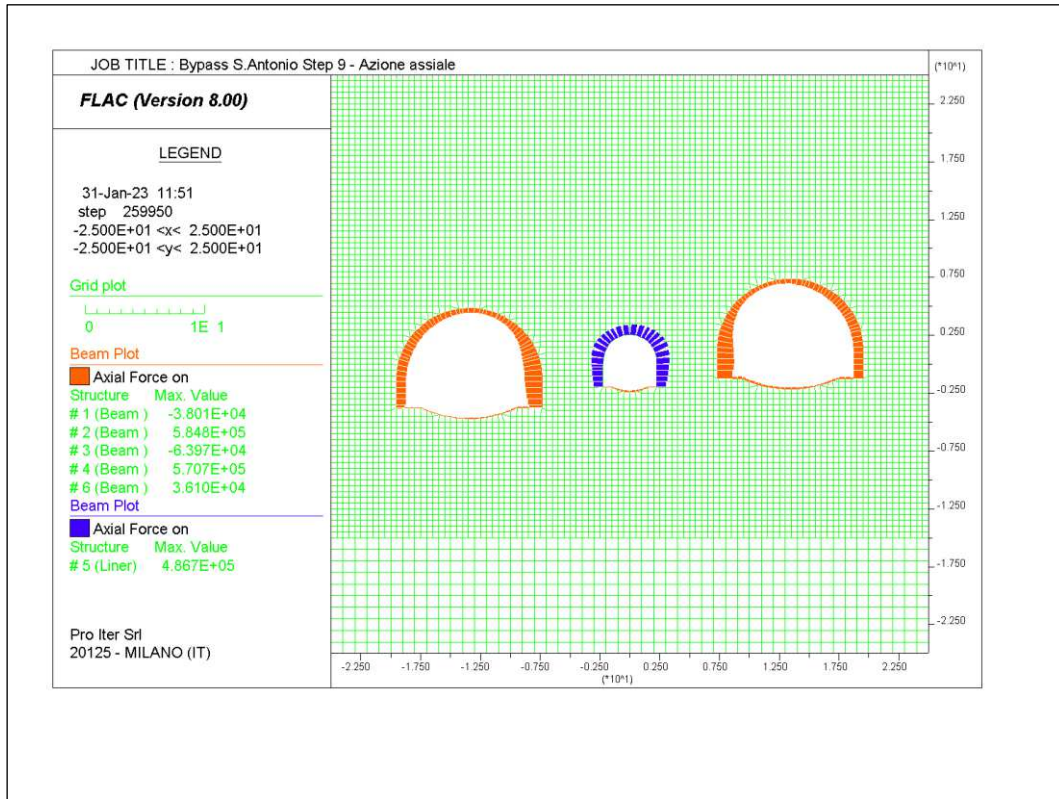
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase e definitivo [Nm] - Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)**



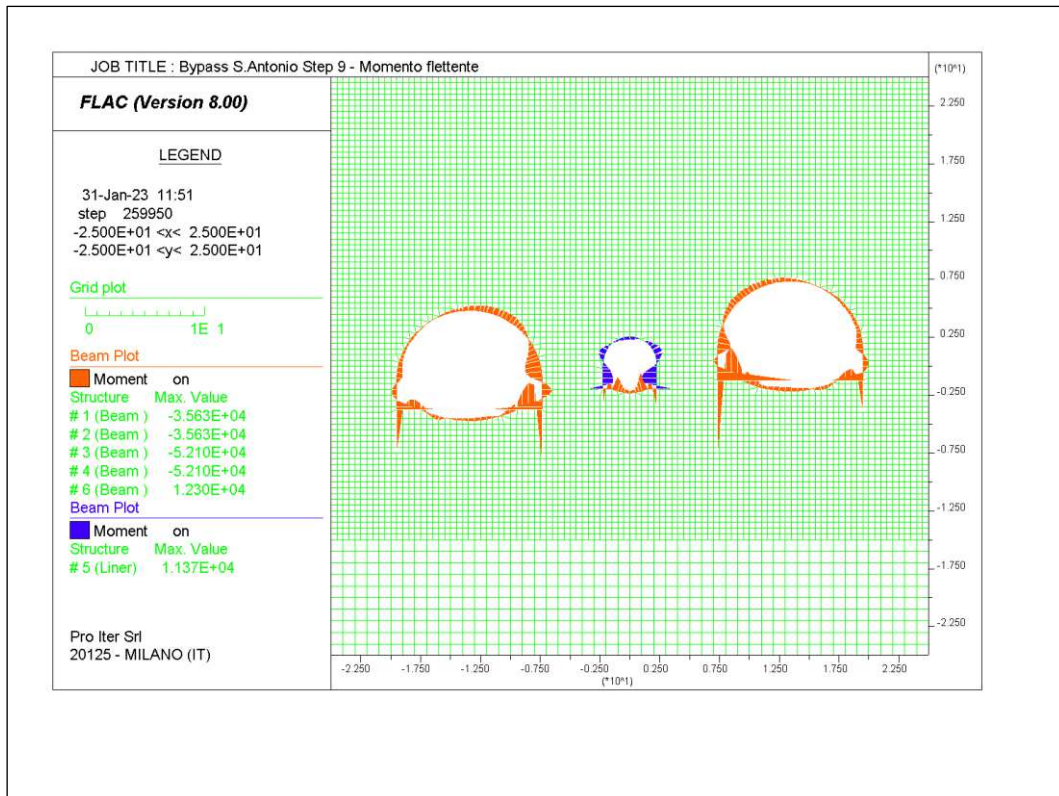
- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 8 (Installazione rivestimento di prima fase BP – FFS 5%)**



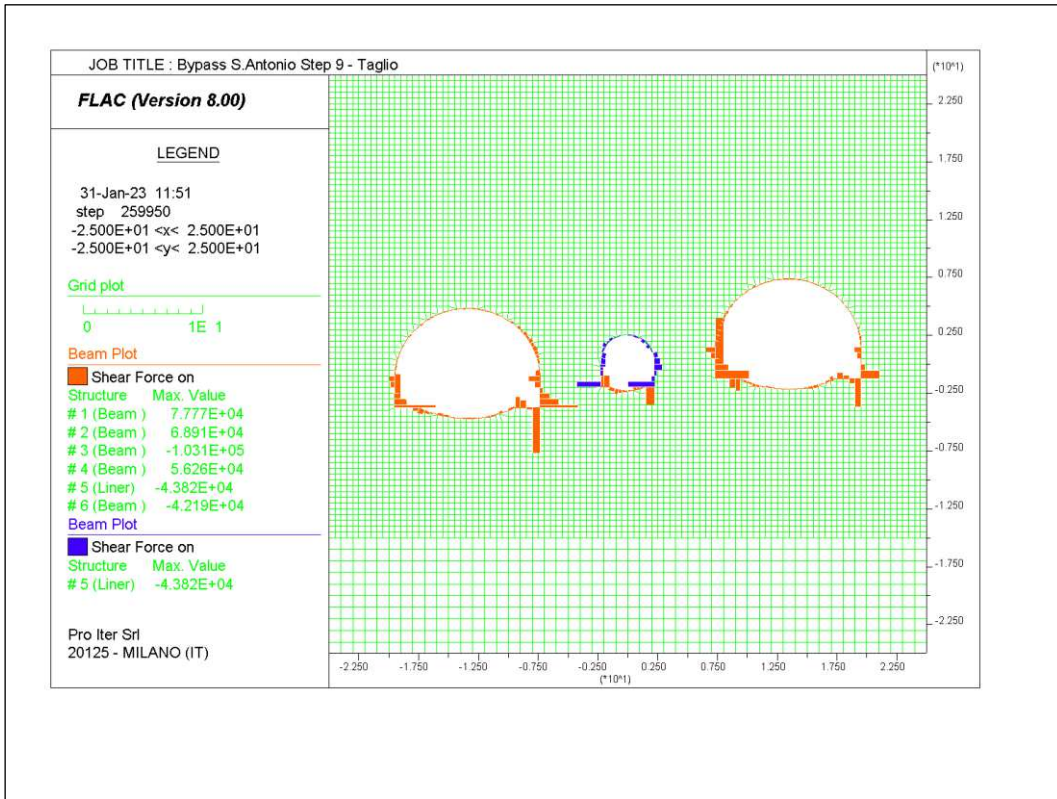
- **Azione assiale nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)**



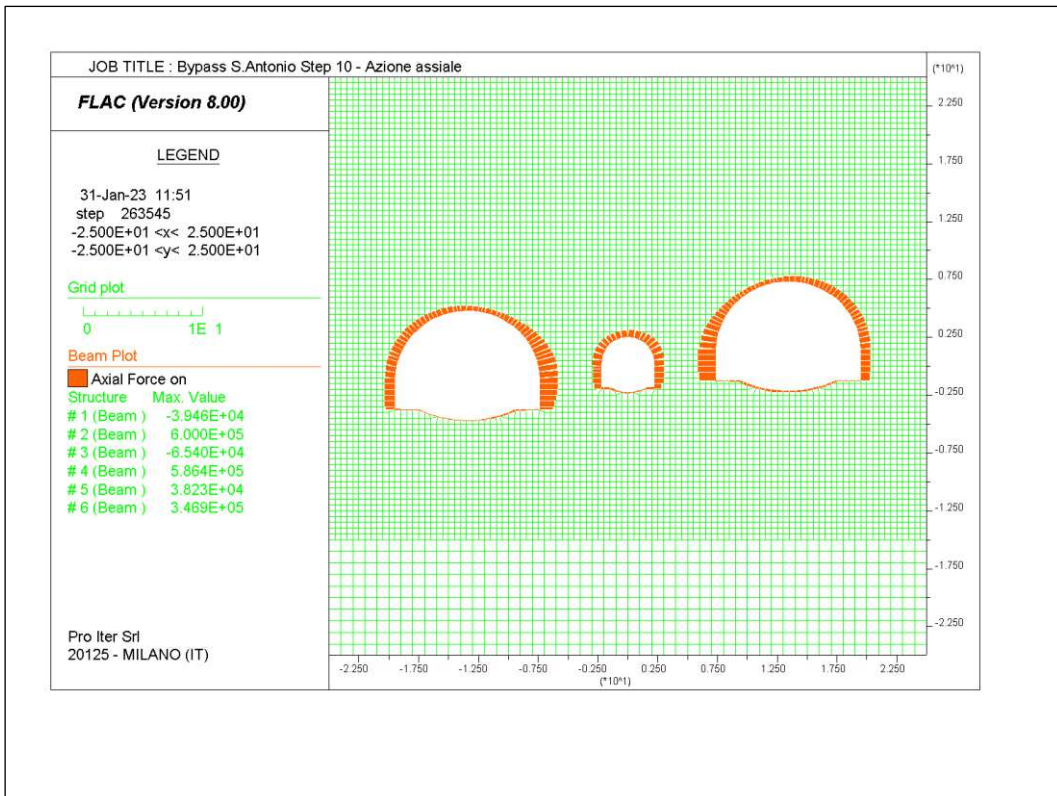
- **Momento flettente nel rivestimento di prima fase e definitivo [Nm] - Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)**



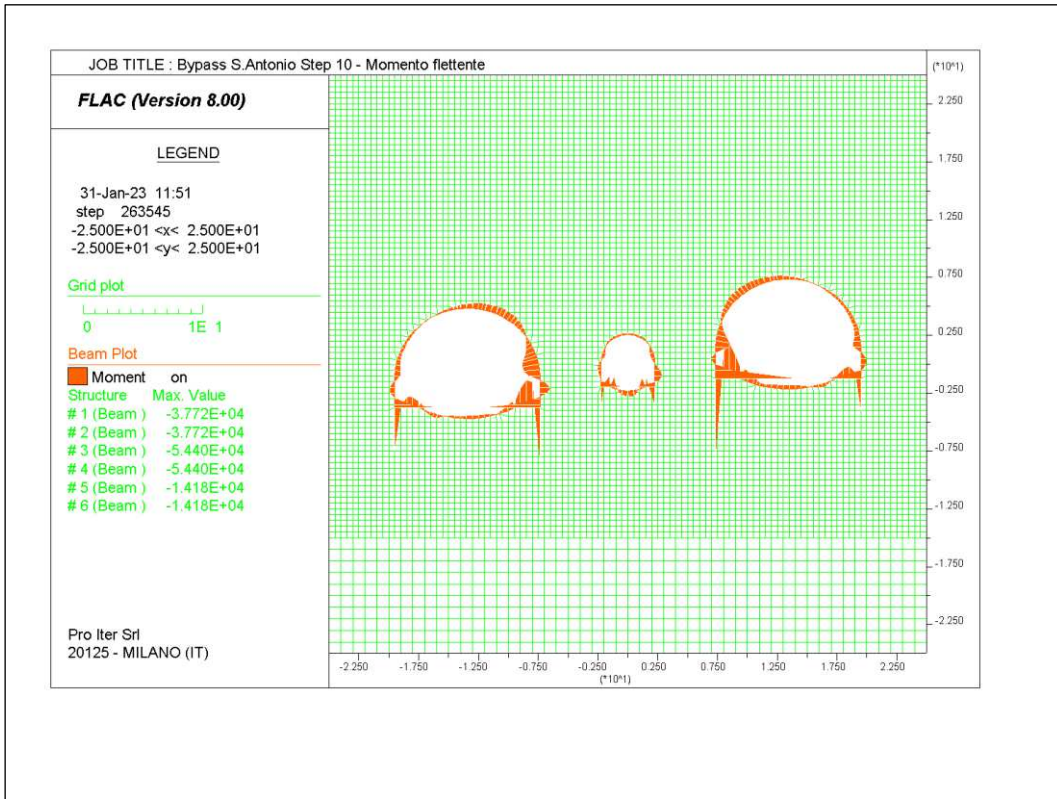
- **Azione di taglio nel rivestimento di prima fase e definitivo [N] - Step 9 (Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio BP – FFS nulle)**



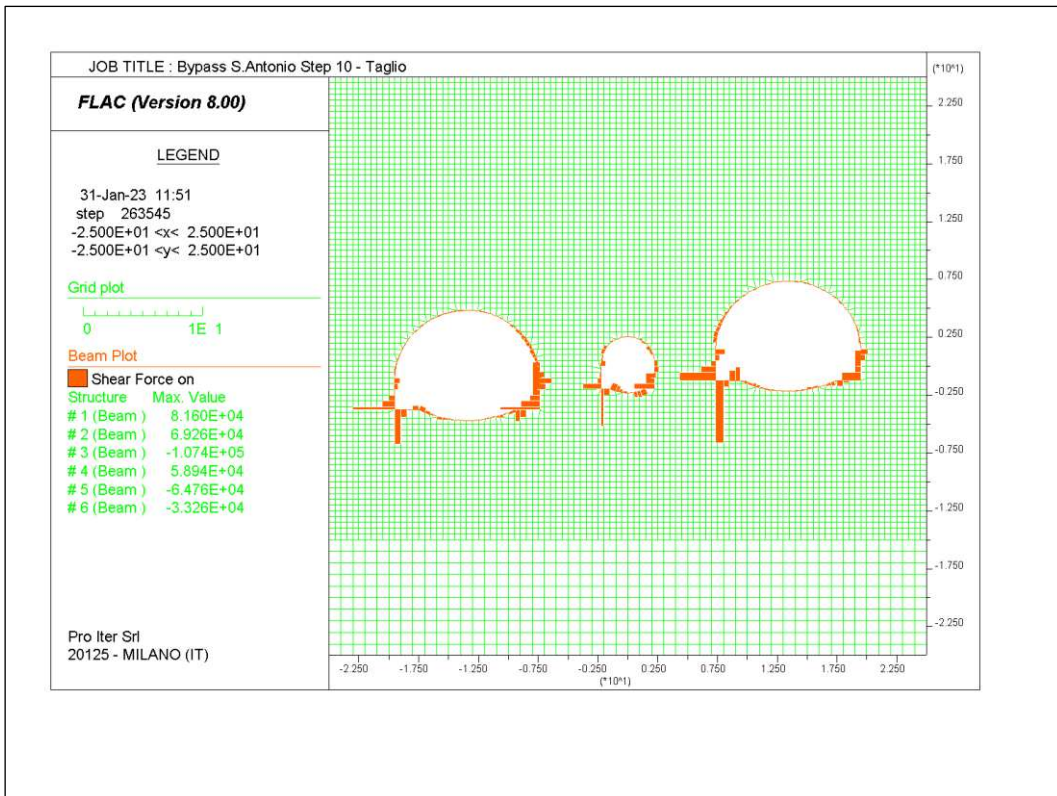
- **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**



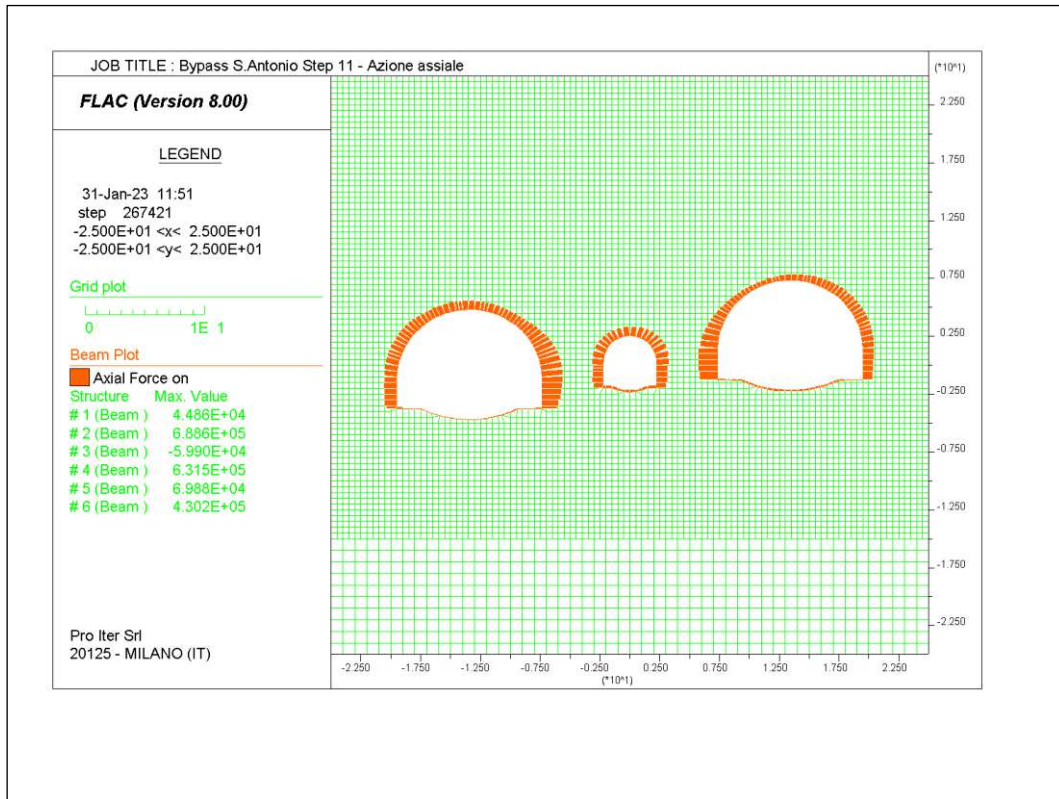
- **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**



- **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 10 (Installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti BP)**



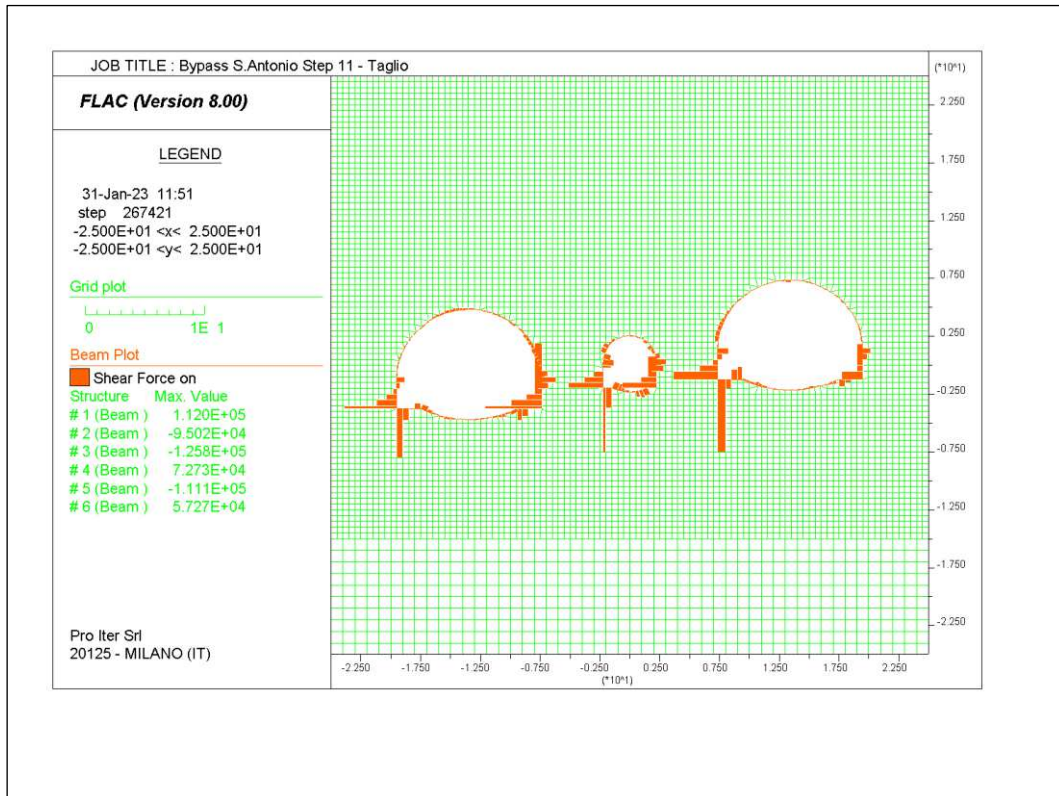
• **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



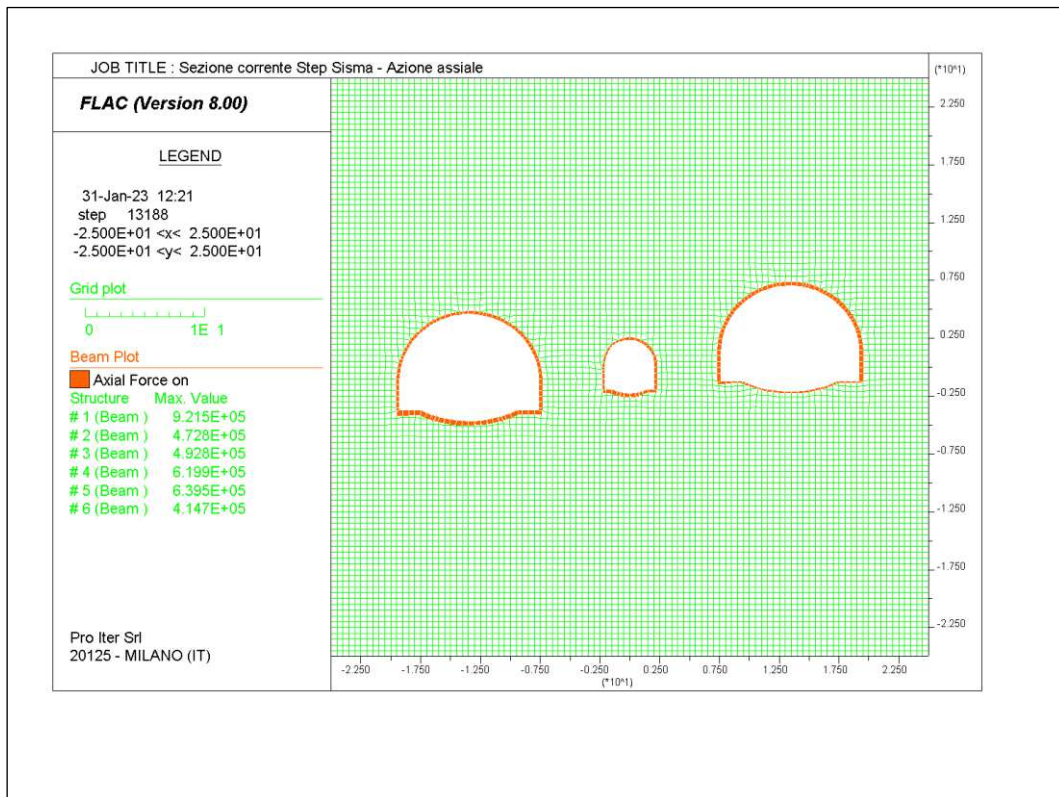
• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



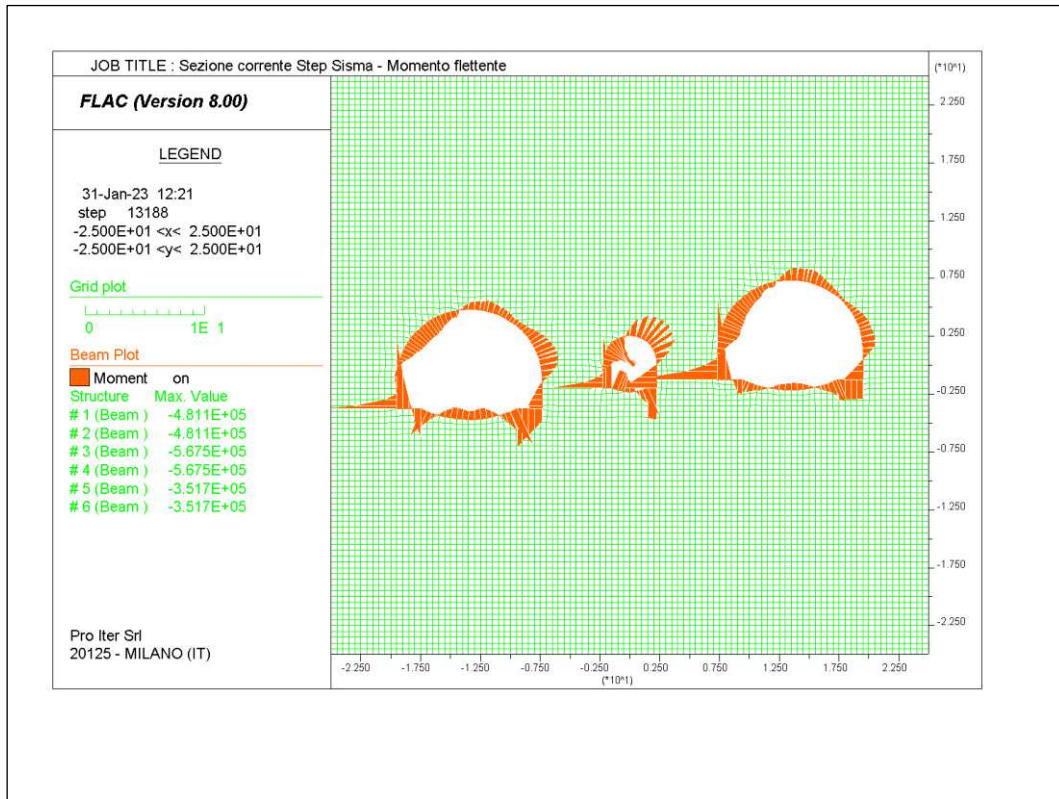
• **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 11 (Applicazione del carico di falda)**



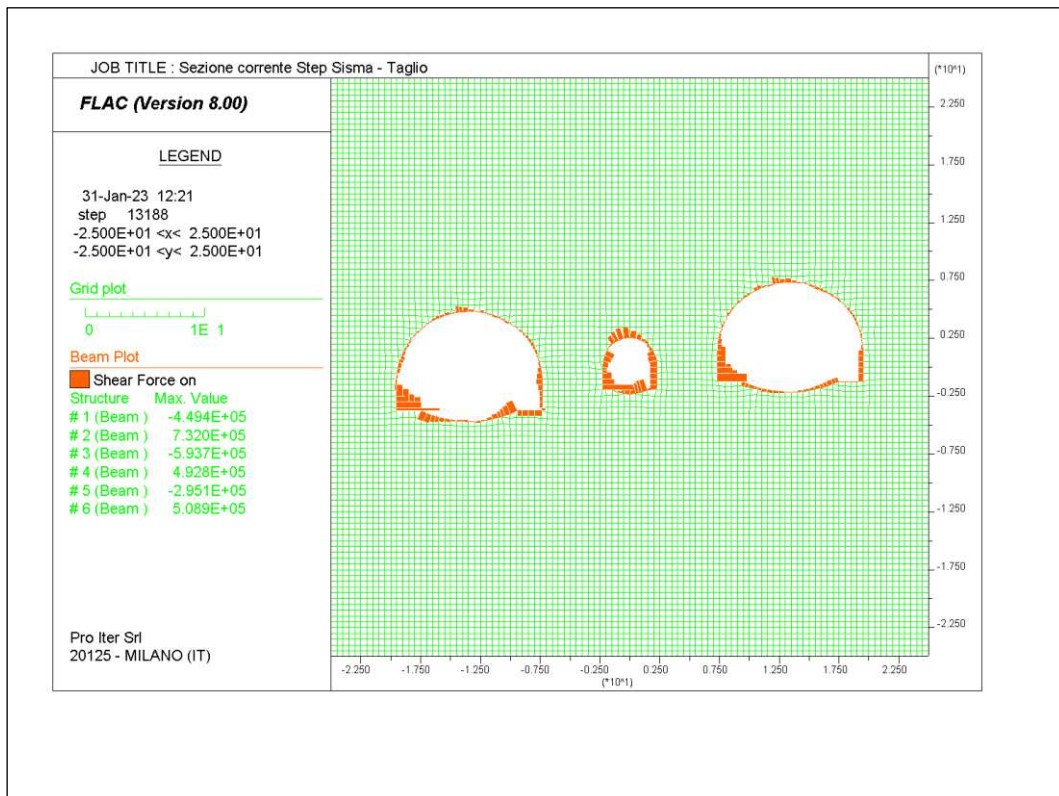
• **Azione assiale nel rivestimento definitivo [N] - Step 12 (Sisma)**



• **Momento flettente nel rivestimento definitivo [Nm] - Step 12 (Sisma)**



• **Azione di taglio nel rivestimento definitivo [N] - Step 12 (Sisma)**





## 14 ALLEGATO 3 – VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO

### 14.1 Gallerie Naturali - Rivestimento definitivo

Nelle seguenti tabelle sono riportati gli spessori strutturali e i quantitativi di armatura considerati per effettuare le verifiche del rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali.

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

| Rivestimento definitivo arco rovescio – stato di fatto |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                                      | 50     |
| Classe di resistenza cls                               | C25/30 |
| Armatura trasversale simmetrica                        | –      |
| Armatura a taglio                                      | –      |
| Ripartitori  | –      |

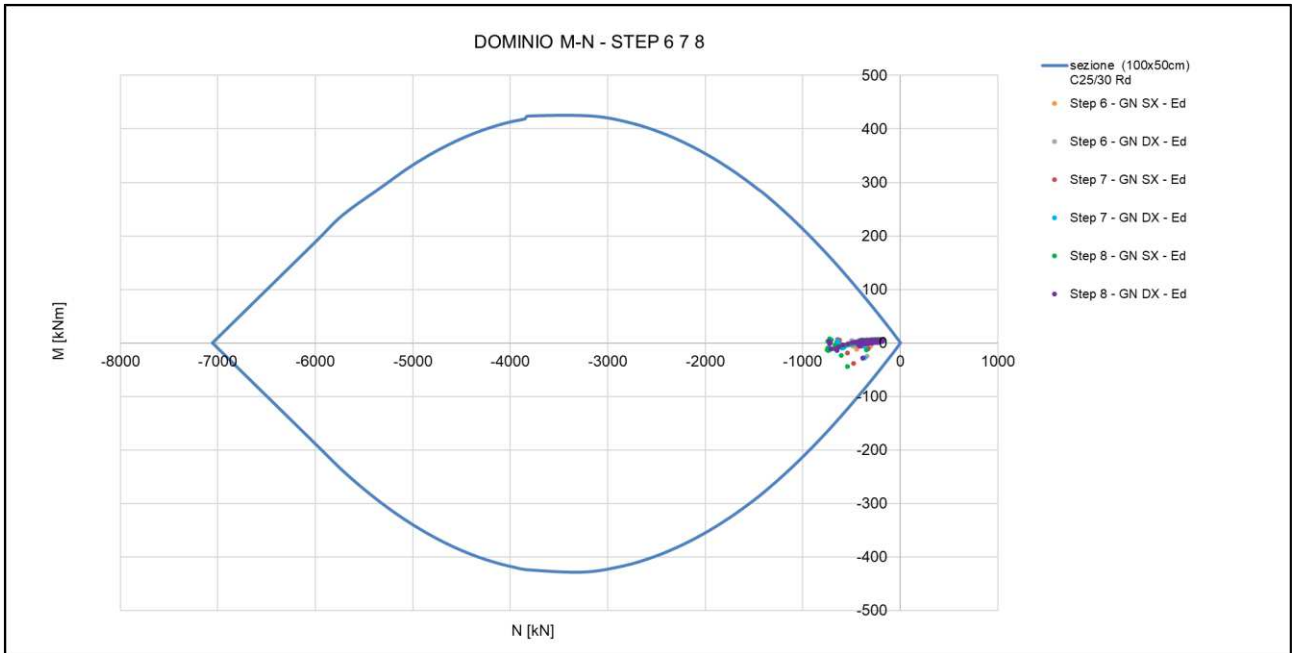
#### 14.1.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

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

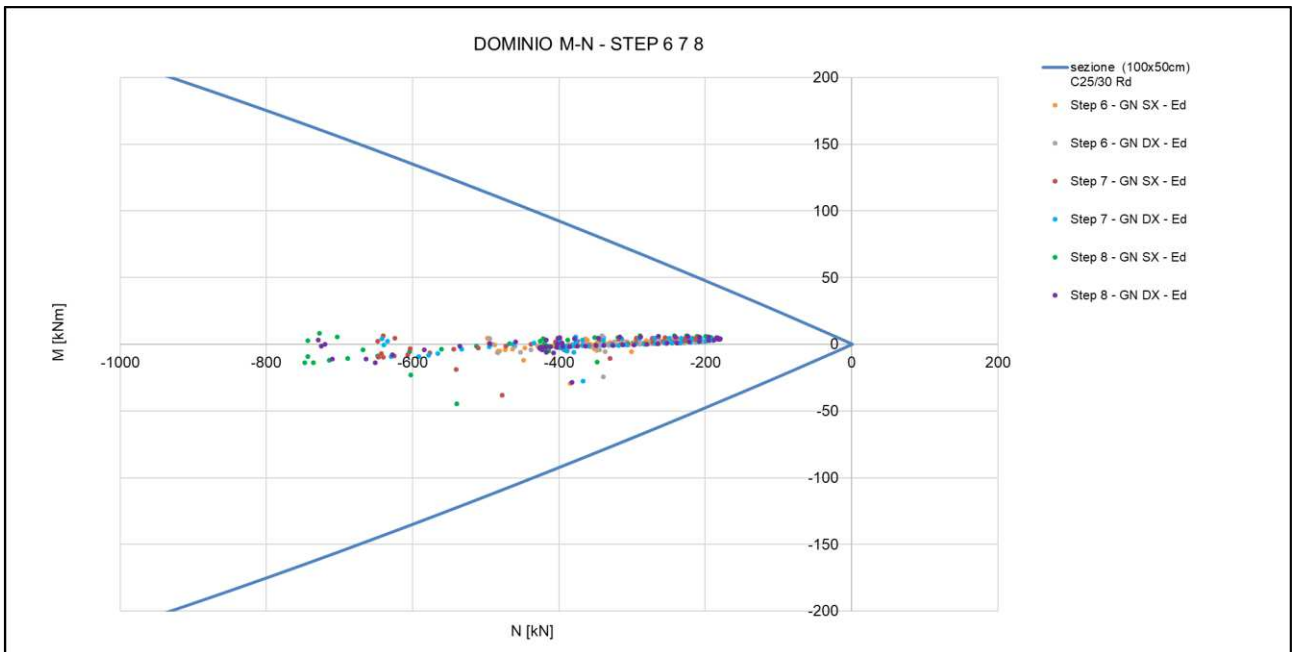
- Step 6 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, scavo del Bypass;
- Step 7 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, avanzamento dello scavo del Bypass)
- Step 8 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento di prima fase nel Bypass;
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio nel Bypass
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

### 14.1.1.1 Verifiche a pressoflessione

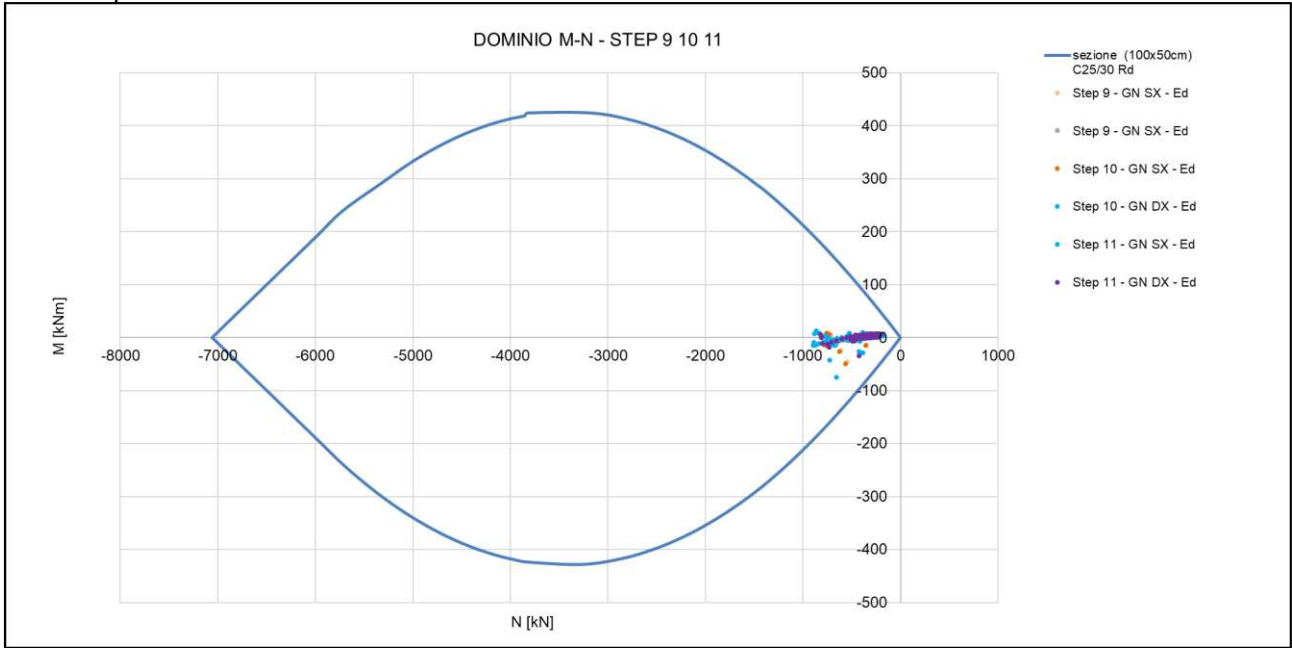
#### Calotta e piedritti



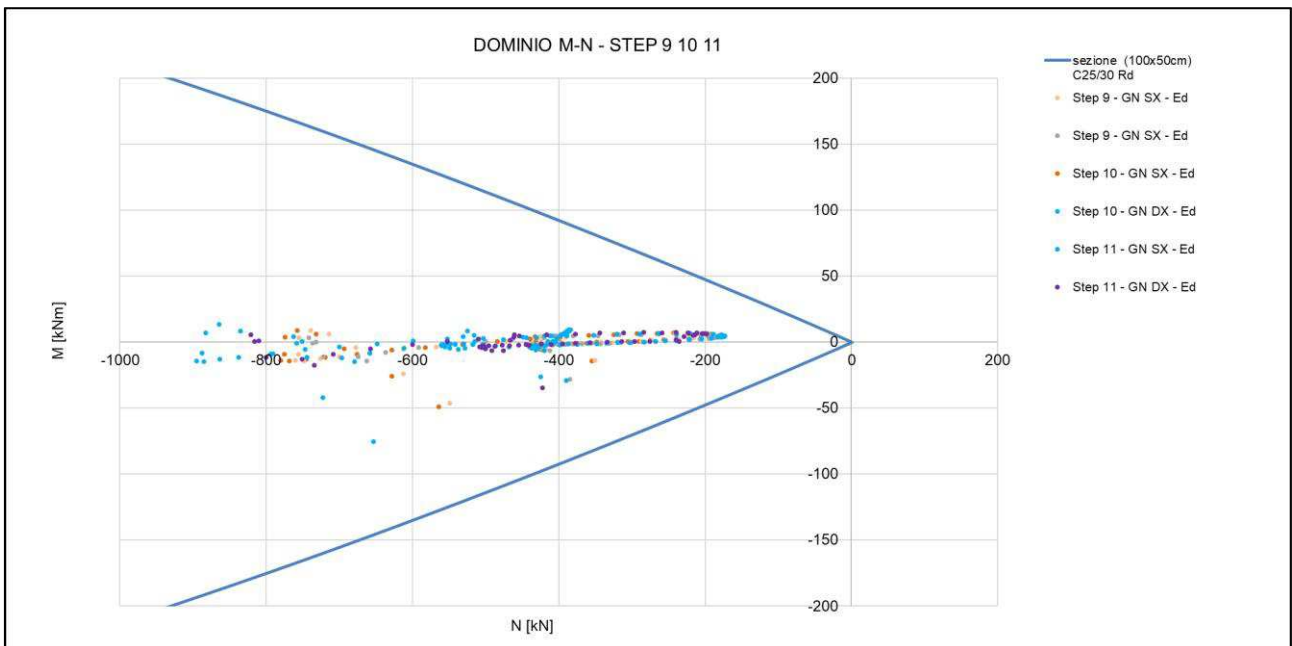
#### Calotta e piedritti, zoom



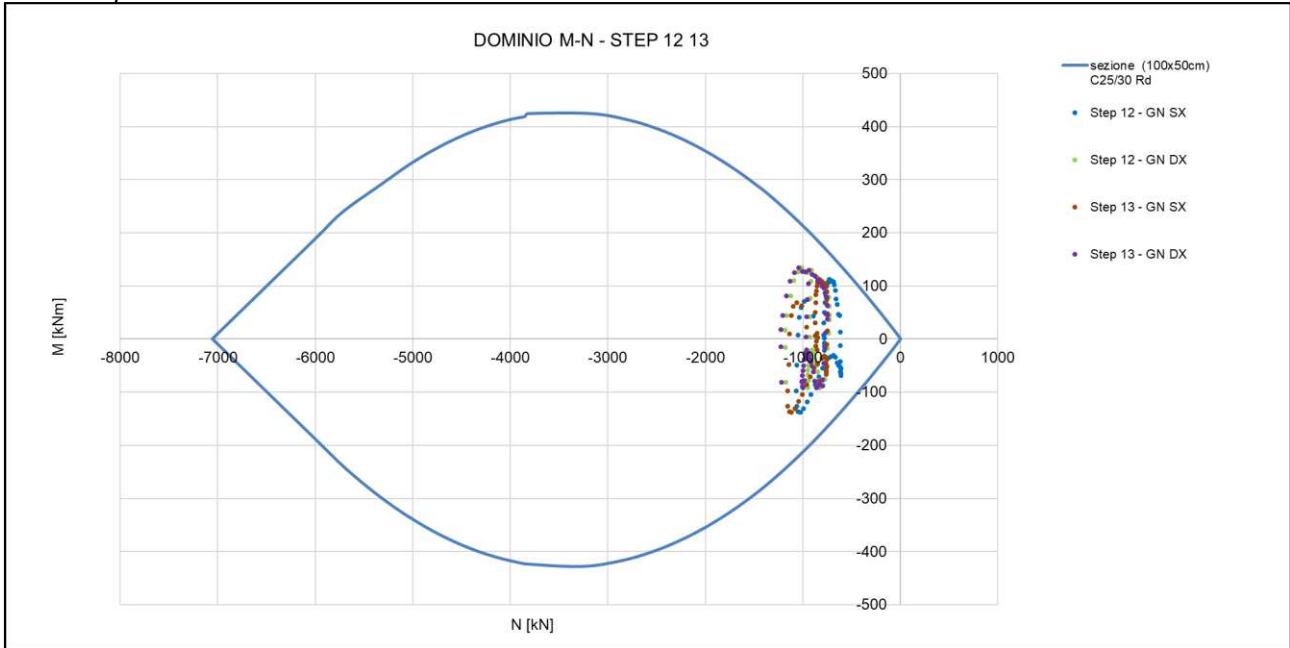
Calotta e piedritti



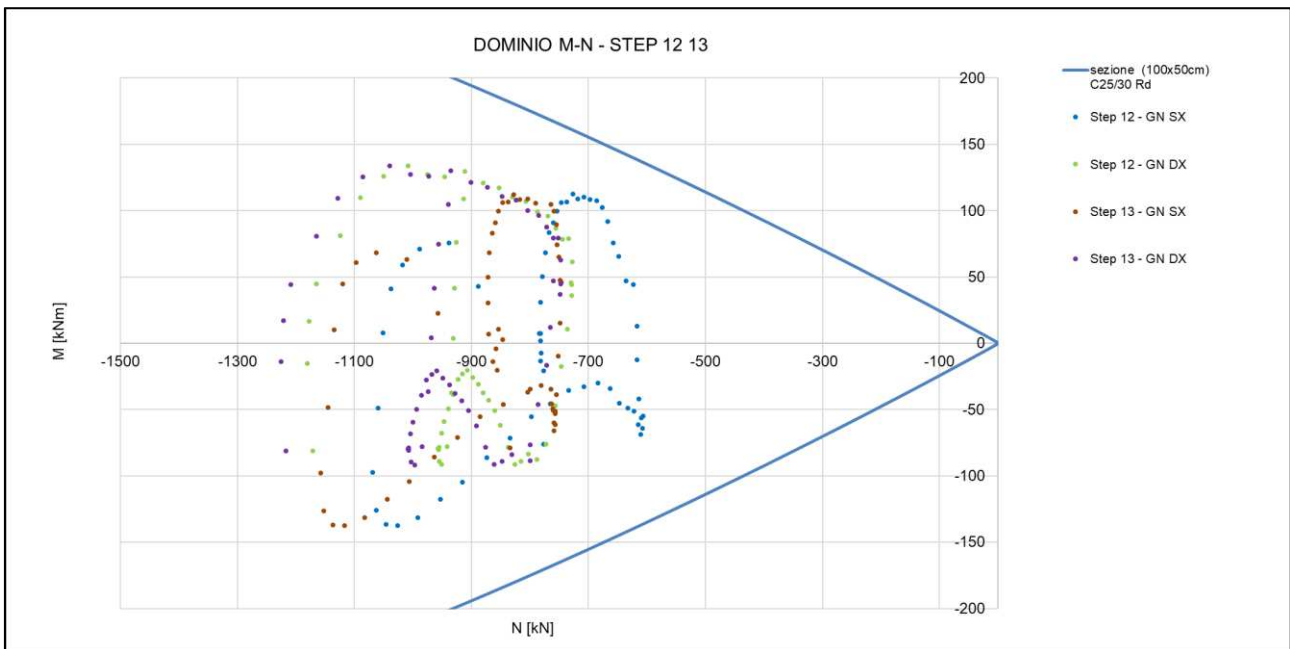
Calotta e piedritti, zoom



Calotta e piedritti



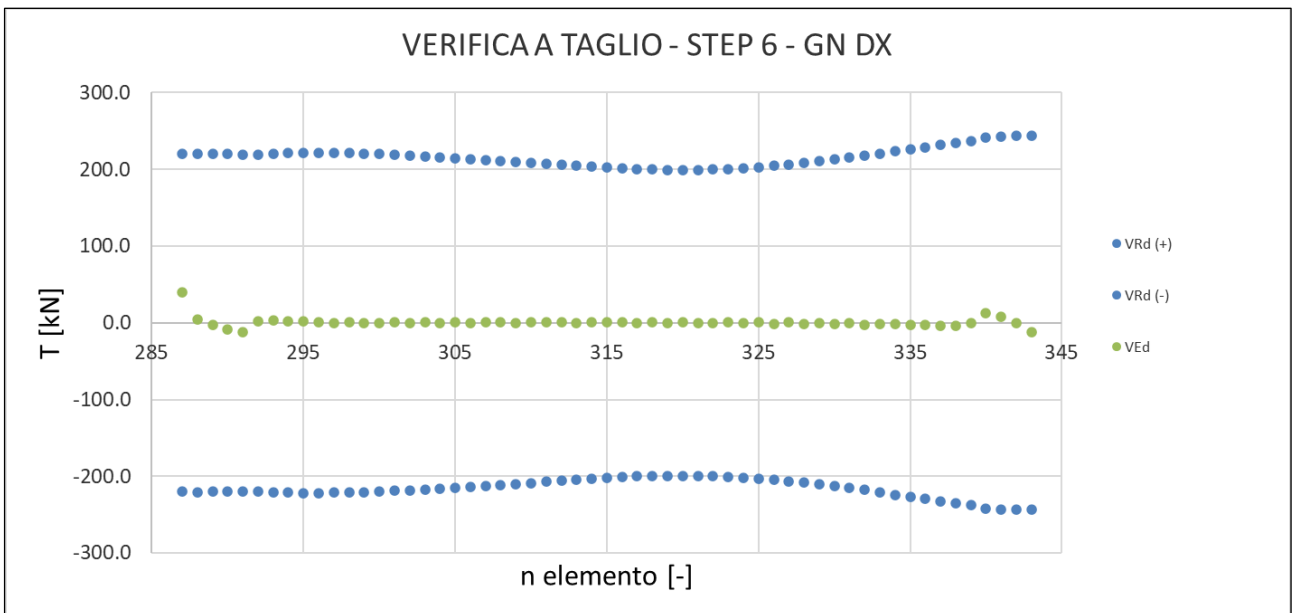
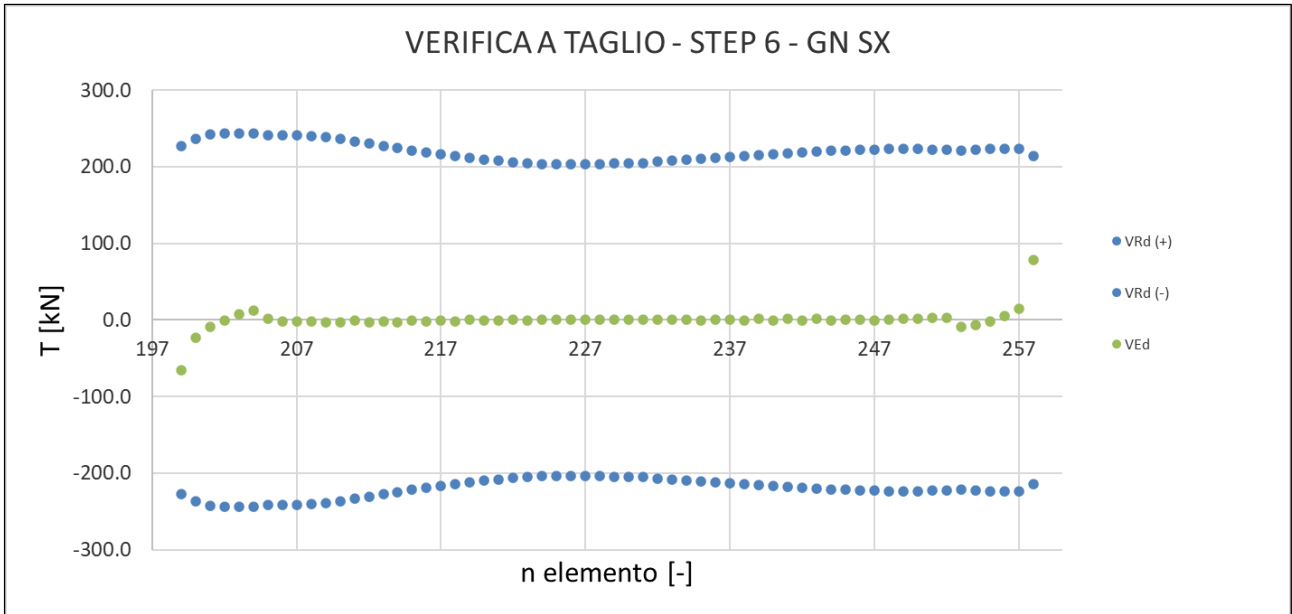
Calotta e piedritti, zoom

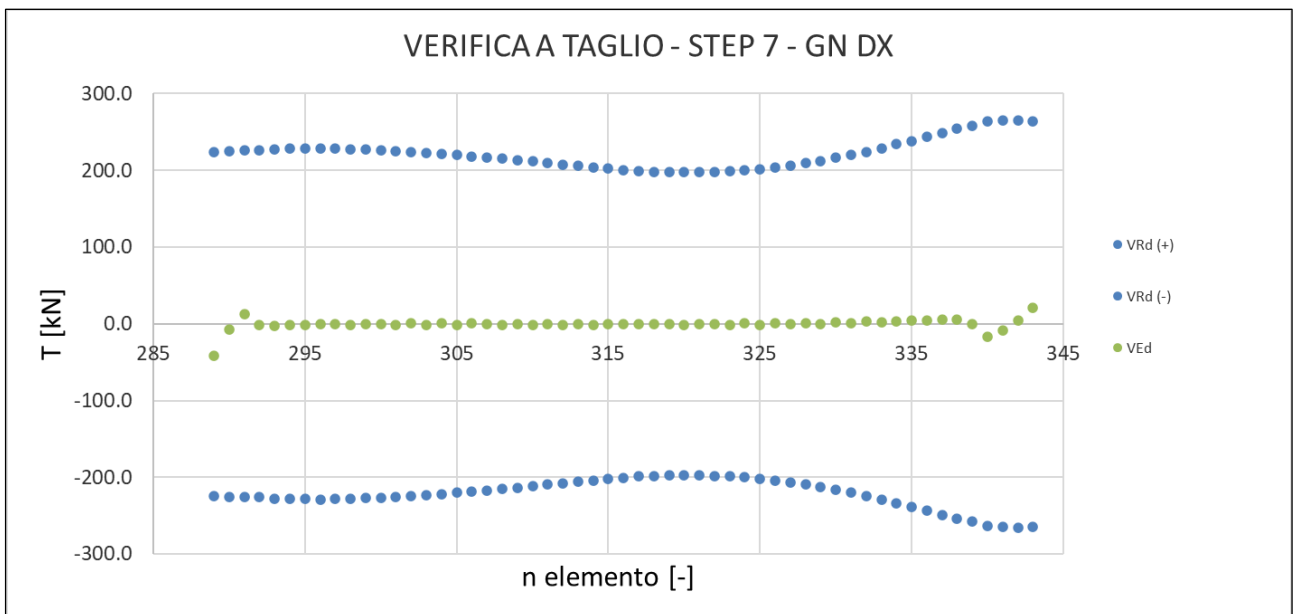
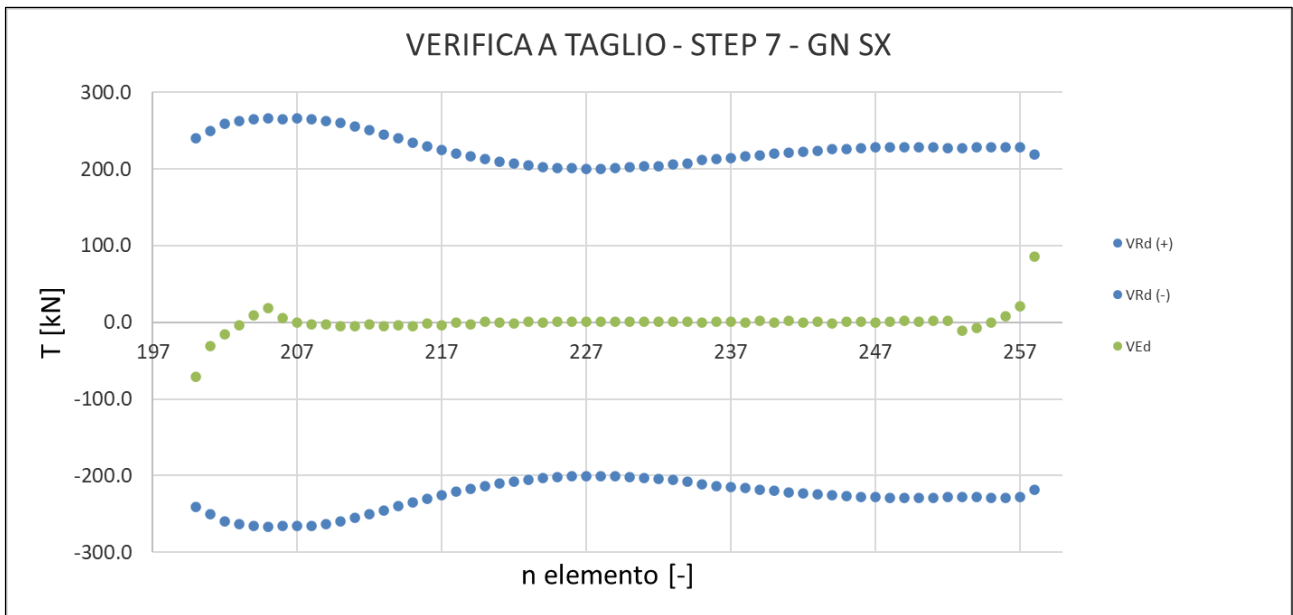


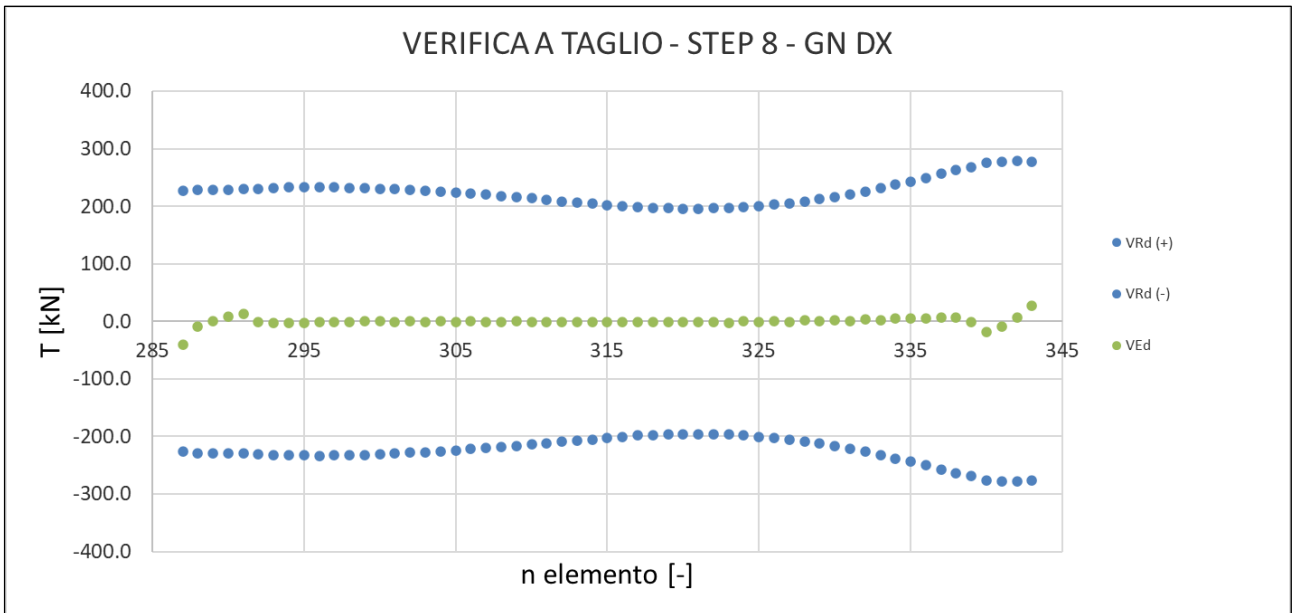
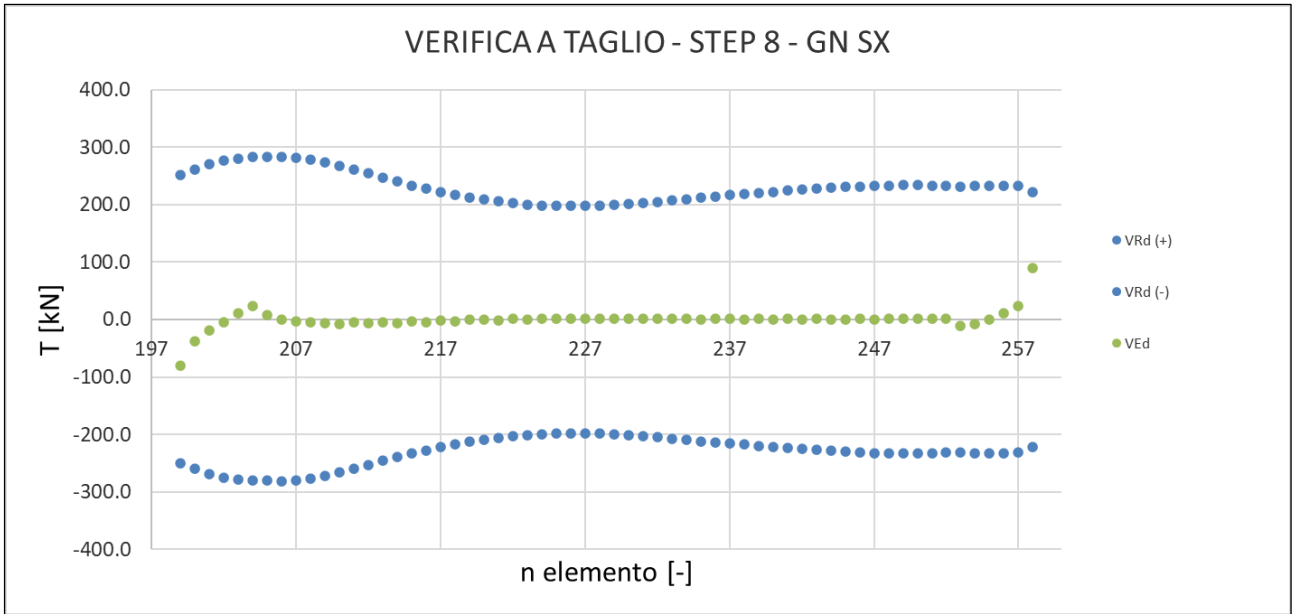
14.1.1.2 Verifiche a taglio

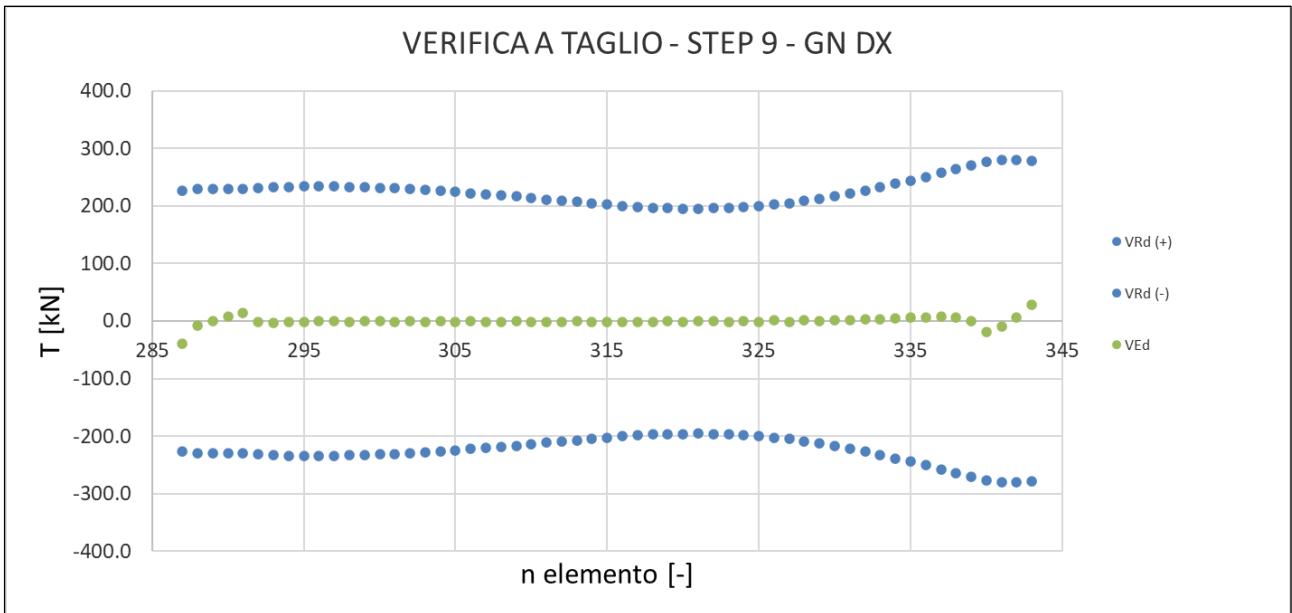
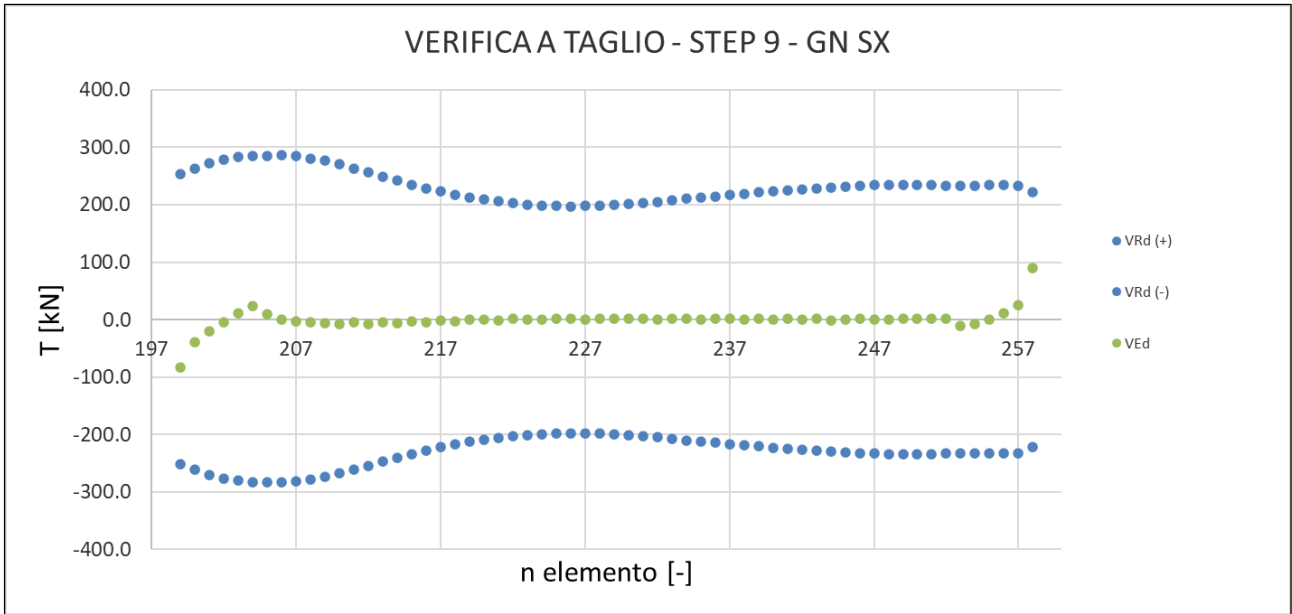
La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a taglio del rivestimento definitivo di calotta. 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.

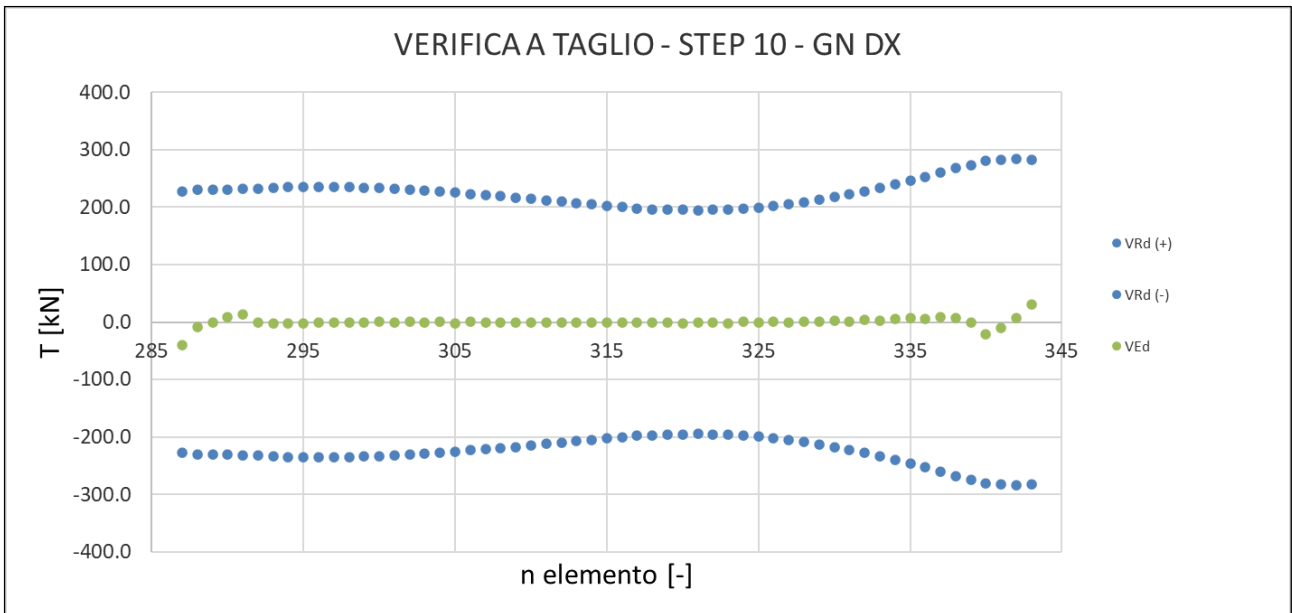
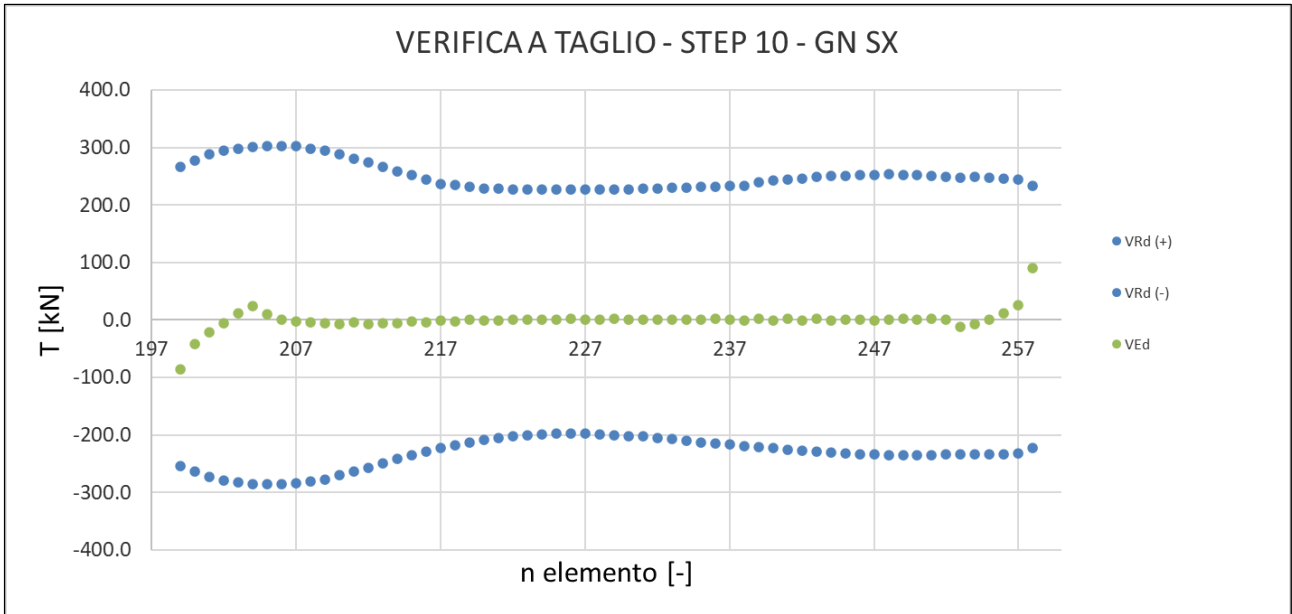


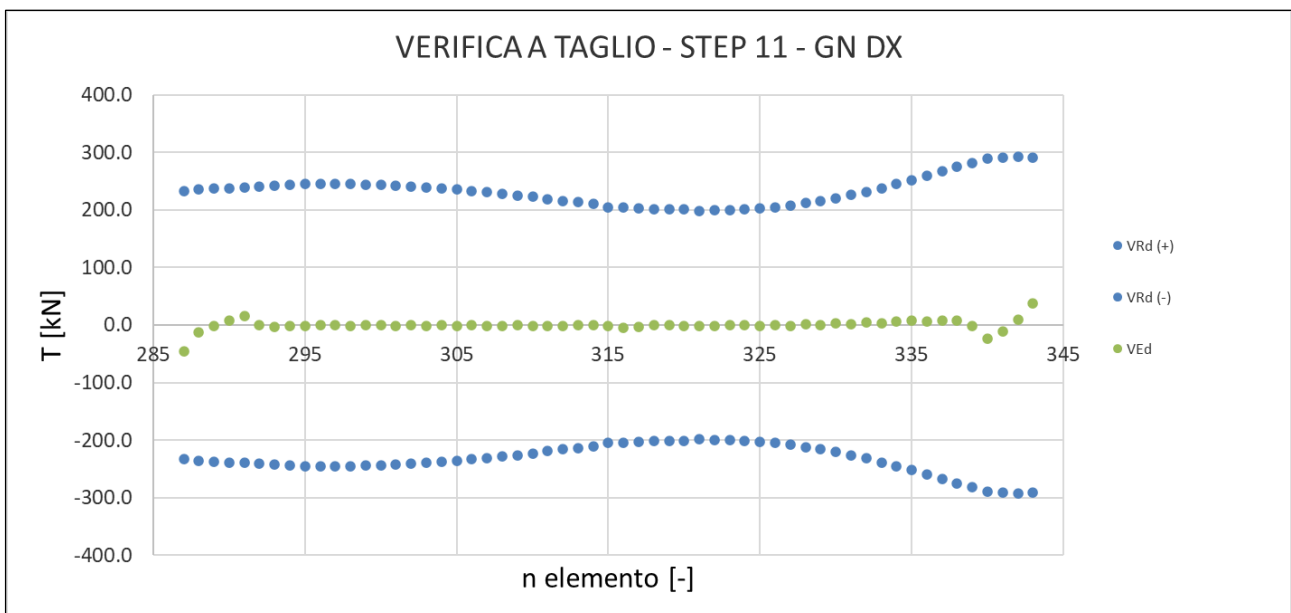
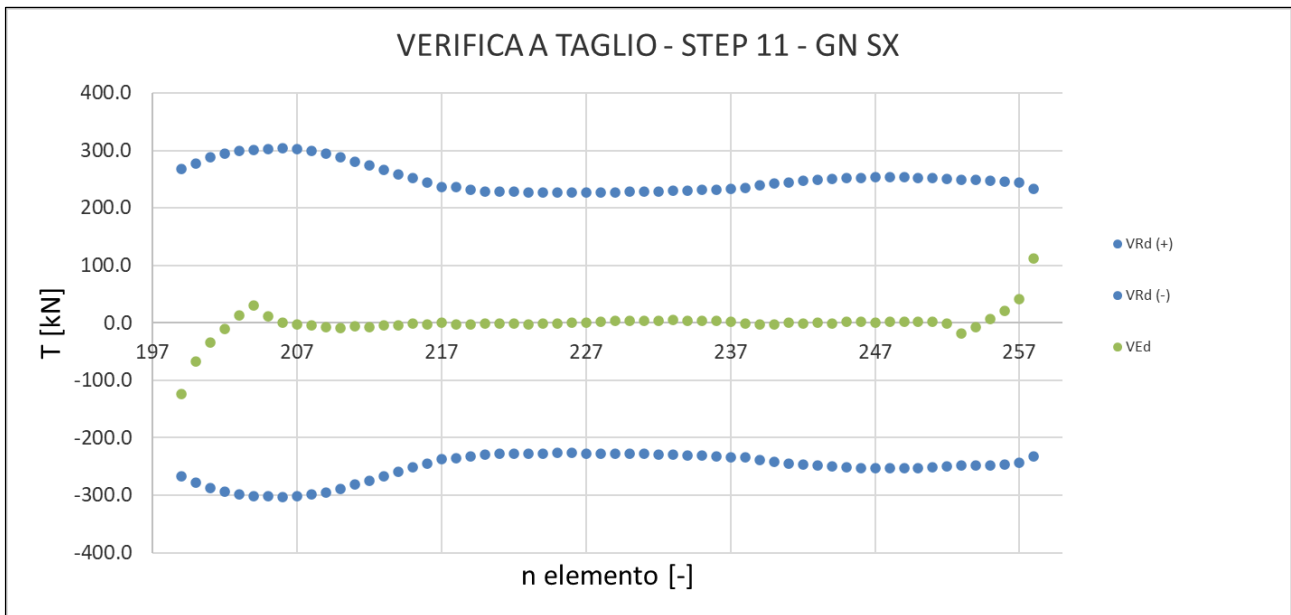


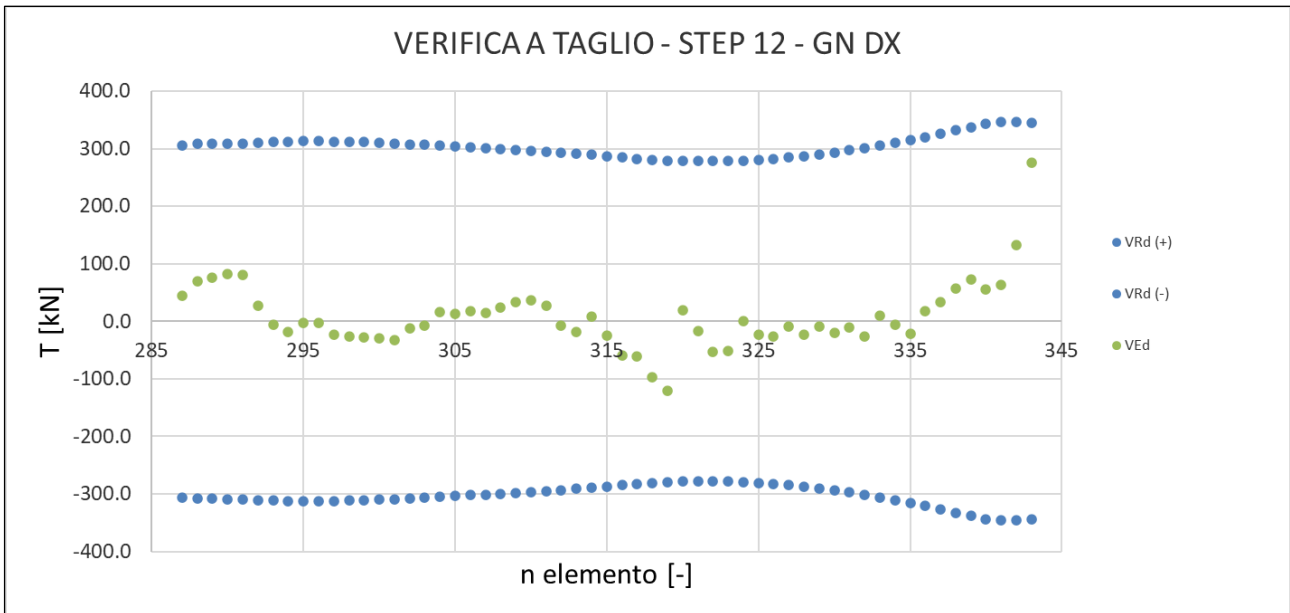
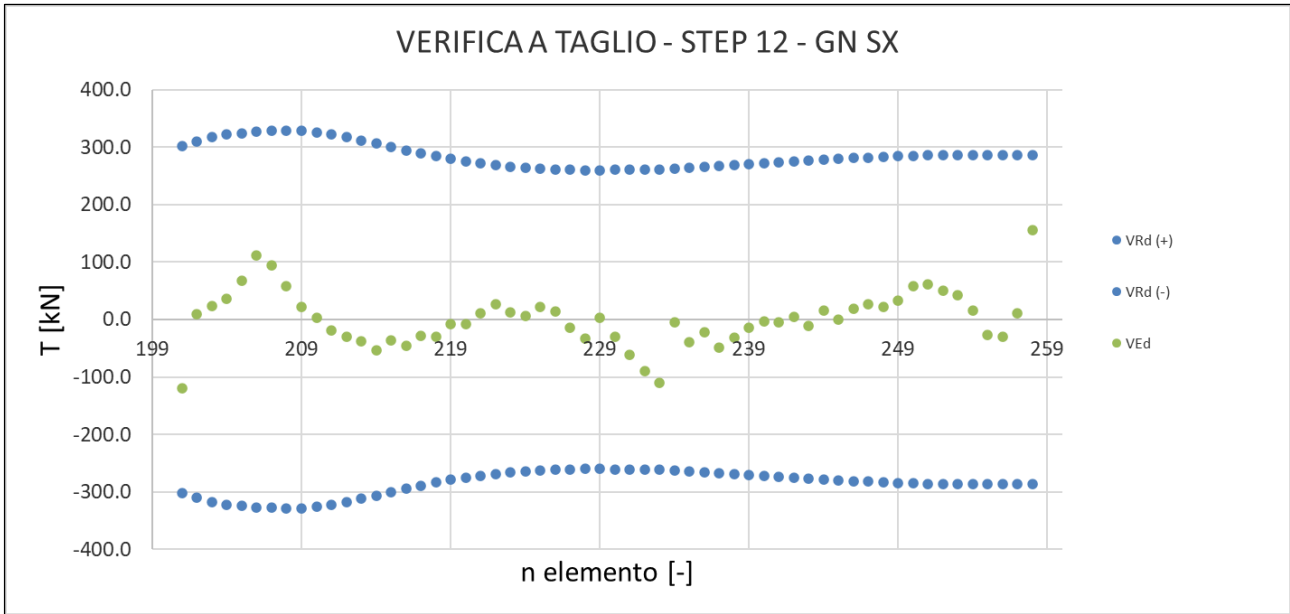


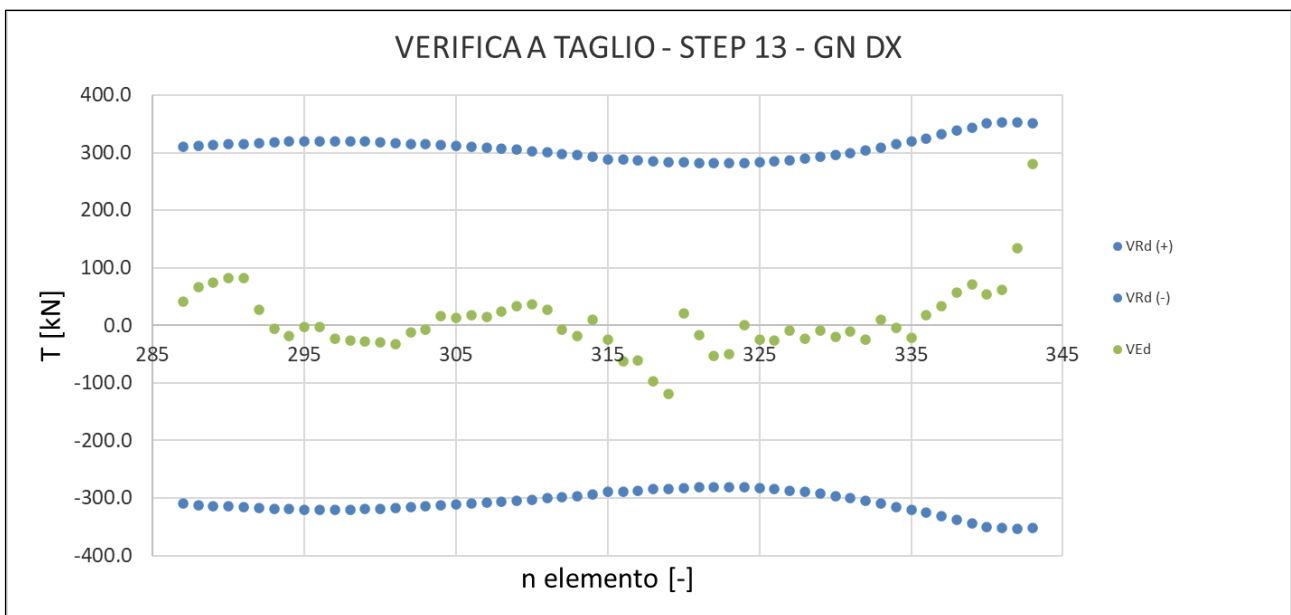
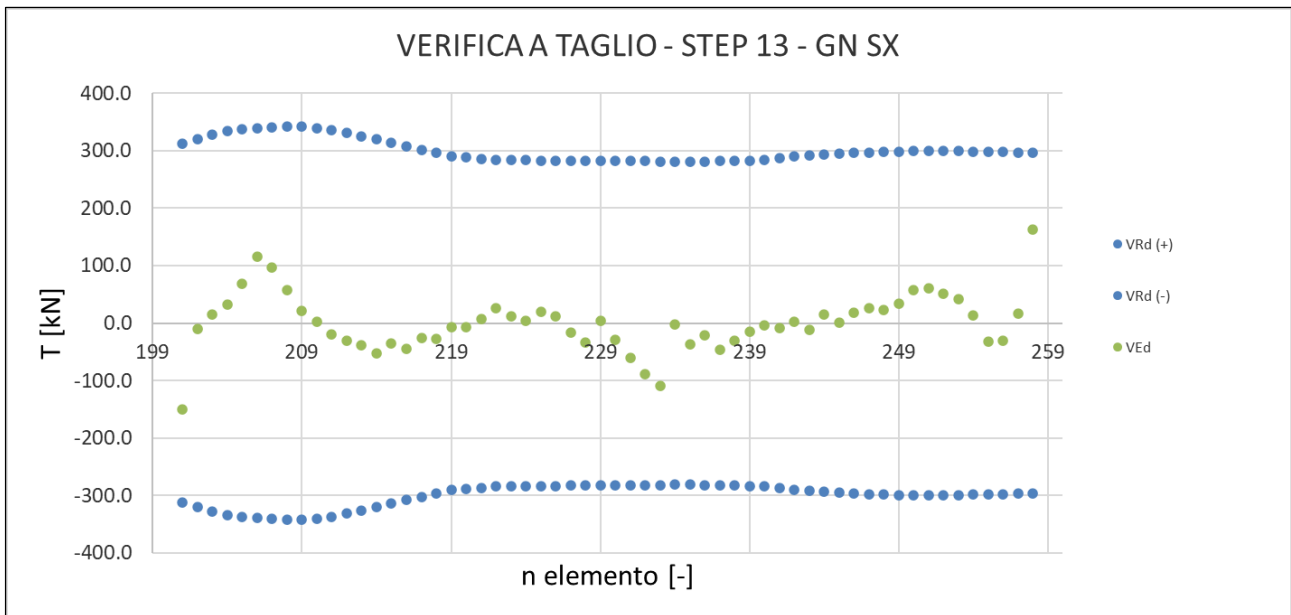












### 14.1.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

#### 14.1.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

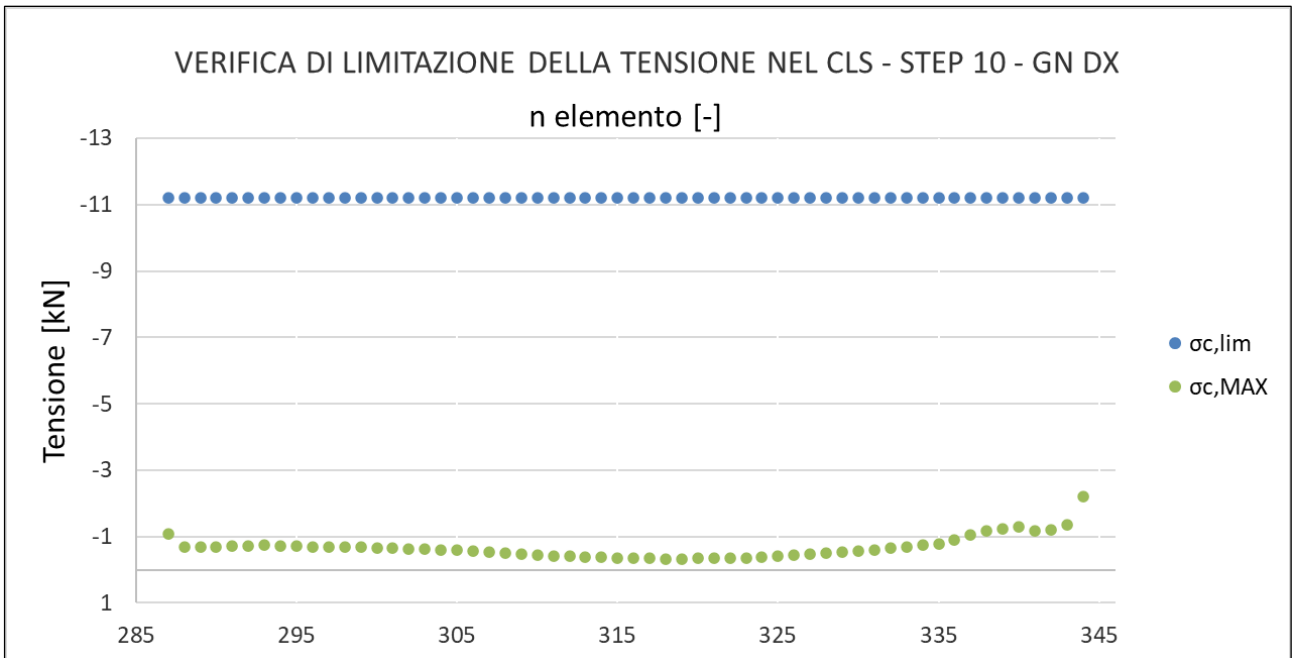
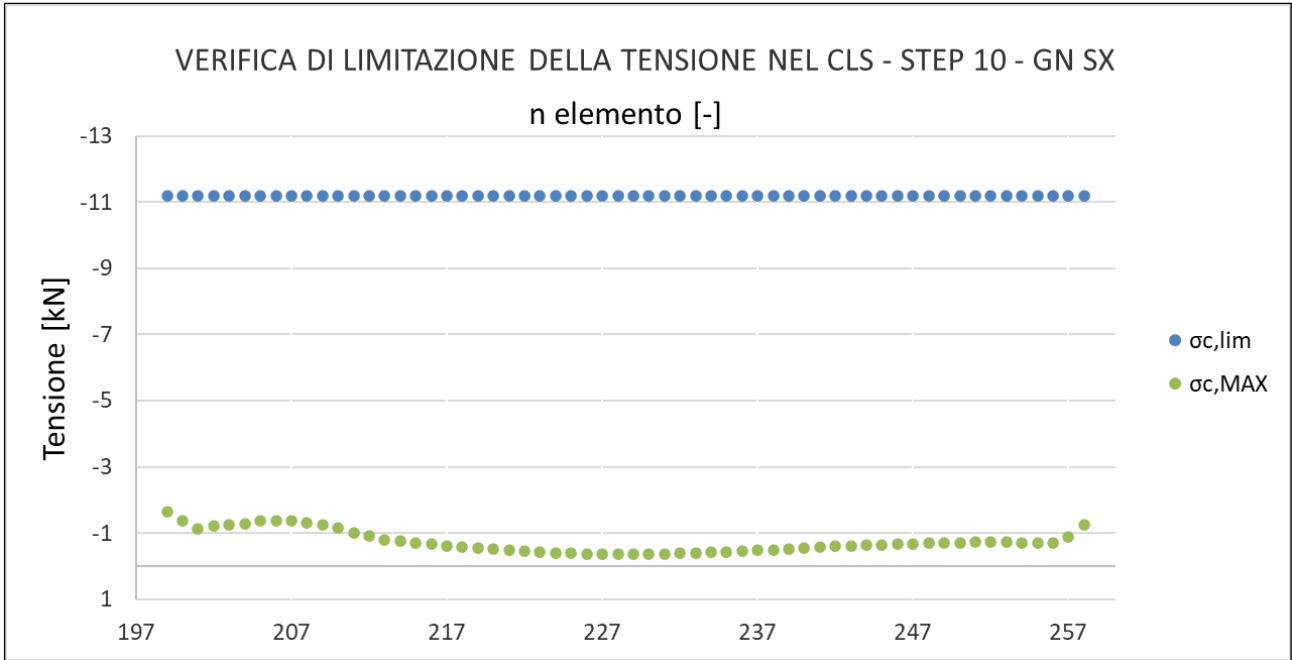
Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle sole tensioni nel calcestruzzo, trattandosi di sezioni non armate, secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC 2018. Per le sezioni non armate sottoposte a pressoflessione nel caso in cui una porzione dell'elemento sia sottoposto a trazione si fa riferimento alla sezione parzializzata. Il calcolo della sollecitazione massima avviene come segue

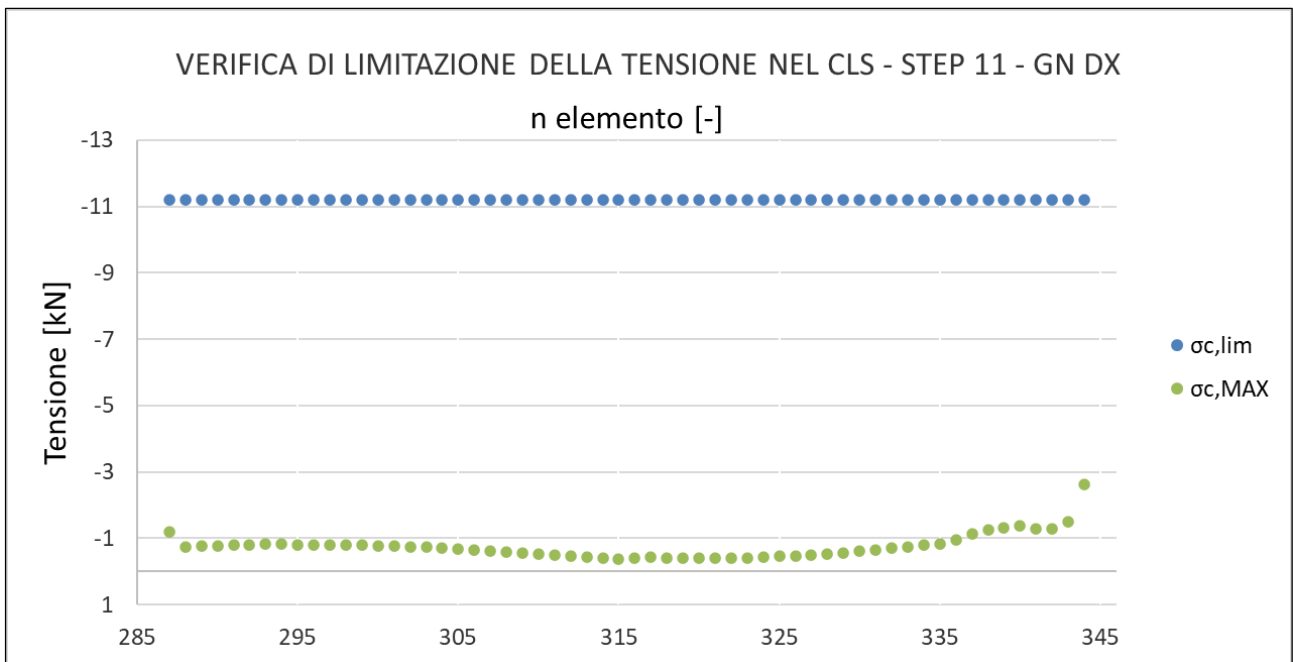
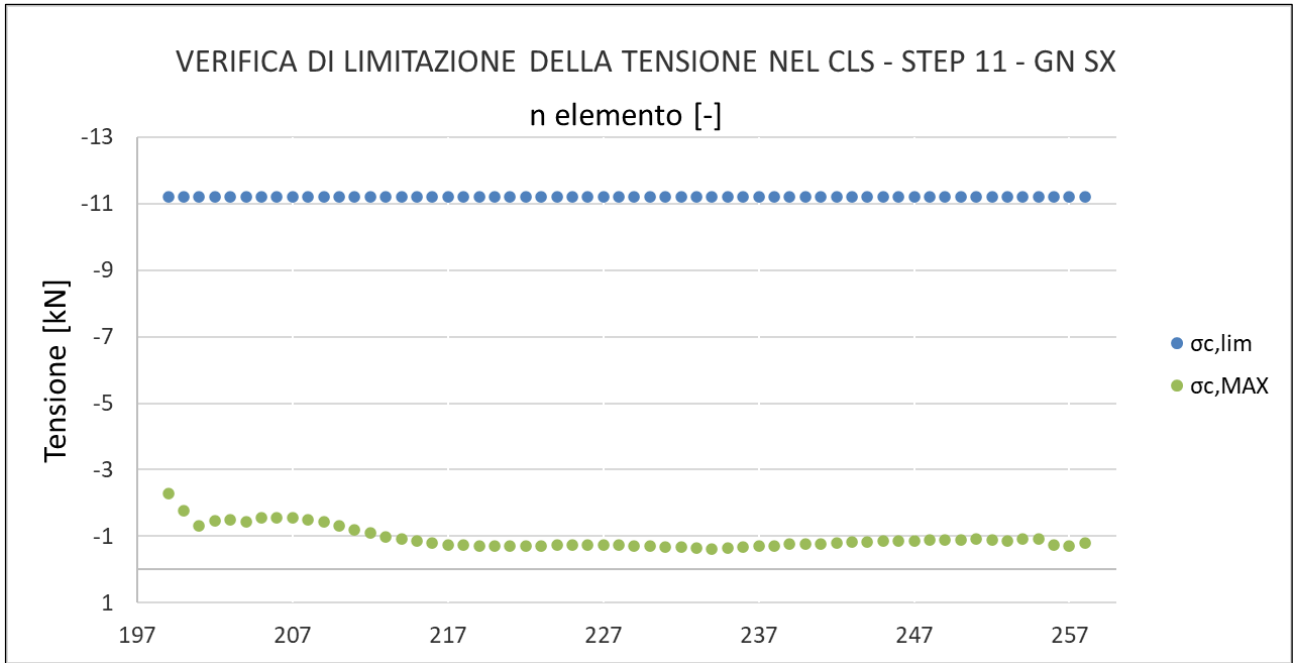
$$\sigma_{c,max} = \frac{2N}{3 \cdot u \cdot b}$$

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

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

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





## 14.2 Bypass - 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. 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 [19]. 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.

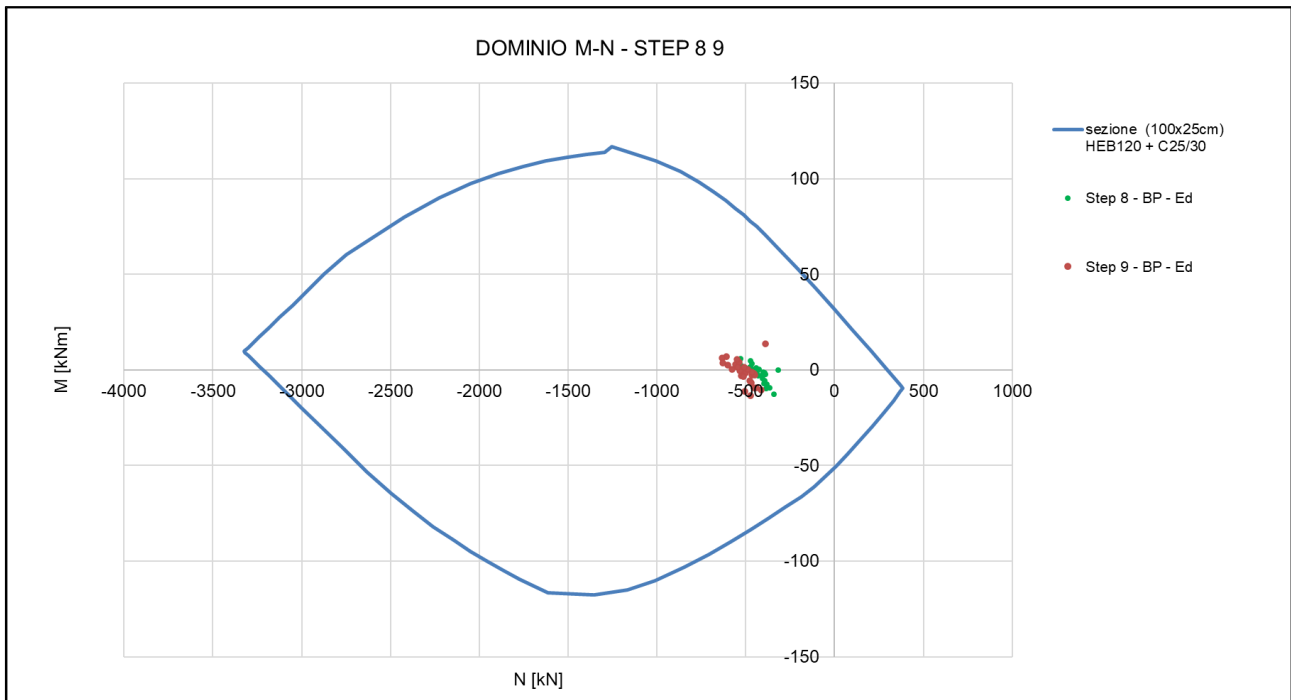
| Rivestimento di prima fase – Bypass          |        |
|--|--------|
| Spessore betoncino [cm]                      | 25     |
| Classe di resistenza cls                     | C25/30 |
| Area centine (solo ali) [cm <sup>2</sup> ]   | 13.20  |
| Area centine (solo anima) [cm <sup>2</sup> ] | 6.37   |
| Interasse [m]                                | -1.2   |
| Classe di resistenza acciaio                 | S275   |

### 14.2.1 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 8 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase (senza rivestimento definitivo in arco rovescio);
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento di prima fase (con rivestimento definitivo in arco rovescio)

#### 14.2.1.1 Verifiche a pressoflessione



### 14.2.1.2 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:

$$V_{Ed} = 57 \text{ kN} < 165.8 \text{ kN} = V_{Rd}$$



### 14.3 Bypass - 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.

| Rivestimento definitivo calotta e piedritti – Bypass |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                                    | 40     |
| Classe di resistenza cls                             | C32/40 |
| Armatura trasversale simmetrica                      | Φ16/25 |
| Armatura a taglio                                    | –      |
| Ripartitori  | Φ8/30  |

| Rivestimento definitivo arco rovescio – Bypass |        |
|--|--------|
| Spessore cls [cm]                              | 45     |
| Classe di resistenza cls                       | C32/40 |
| Armatura trasversale simmetrica                | Φ16/25 |
| Armatura a taglio                              | –      |
| Ripartitori                                    | Φ8/30  |

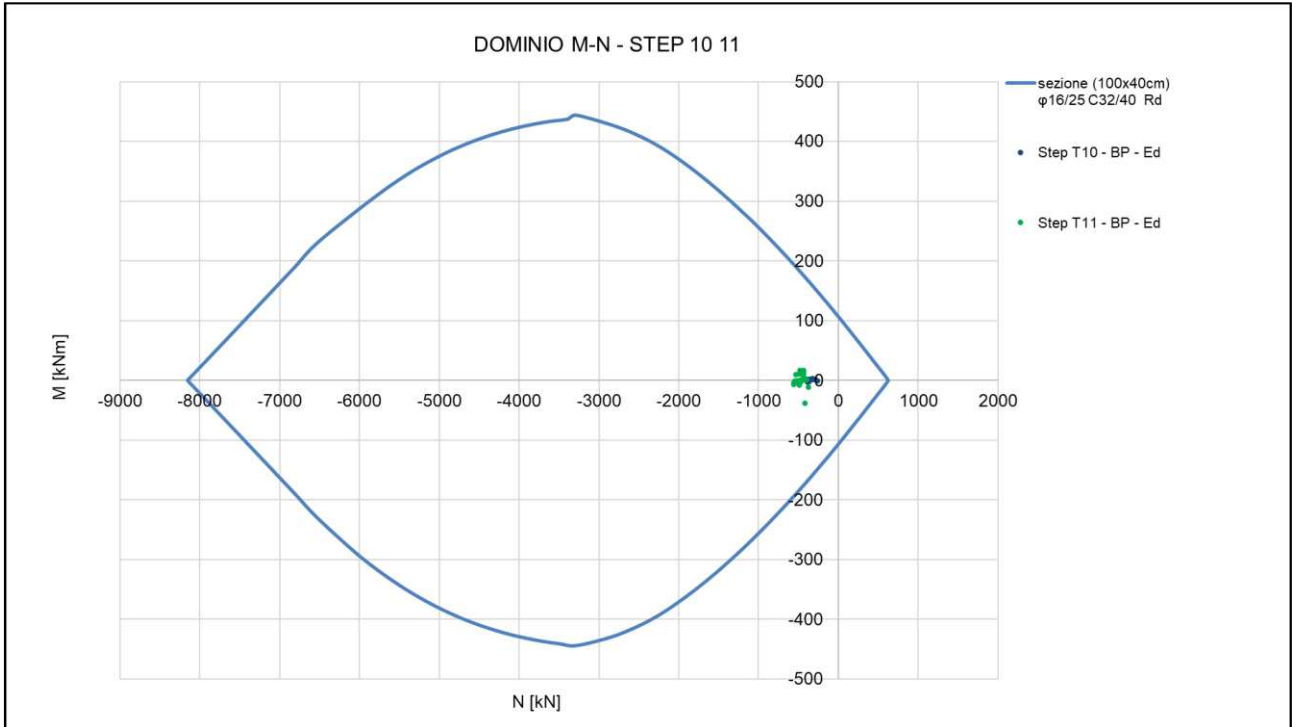
#### 14.3.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

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

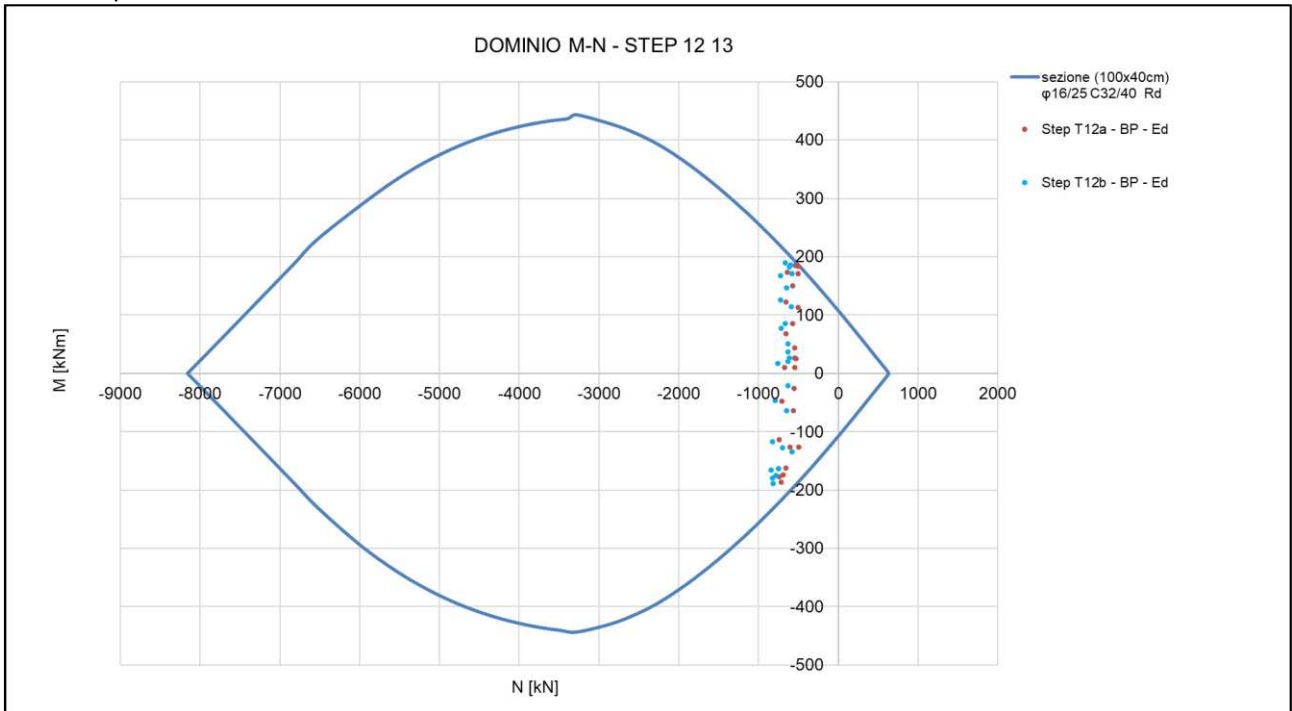
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass (solo arco rovescio)
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

### 14.3.1.1 Verifiche a pressoflessione

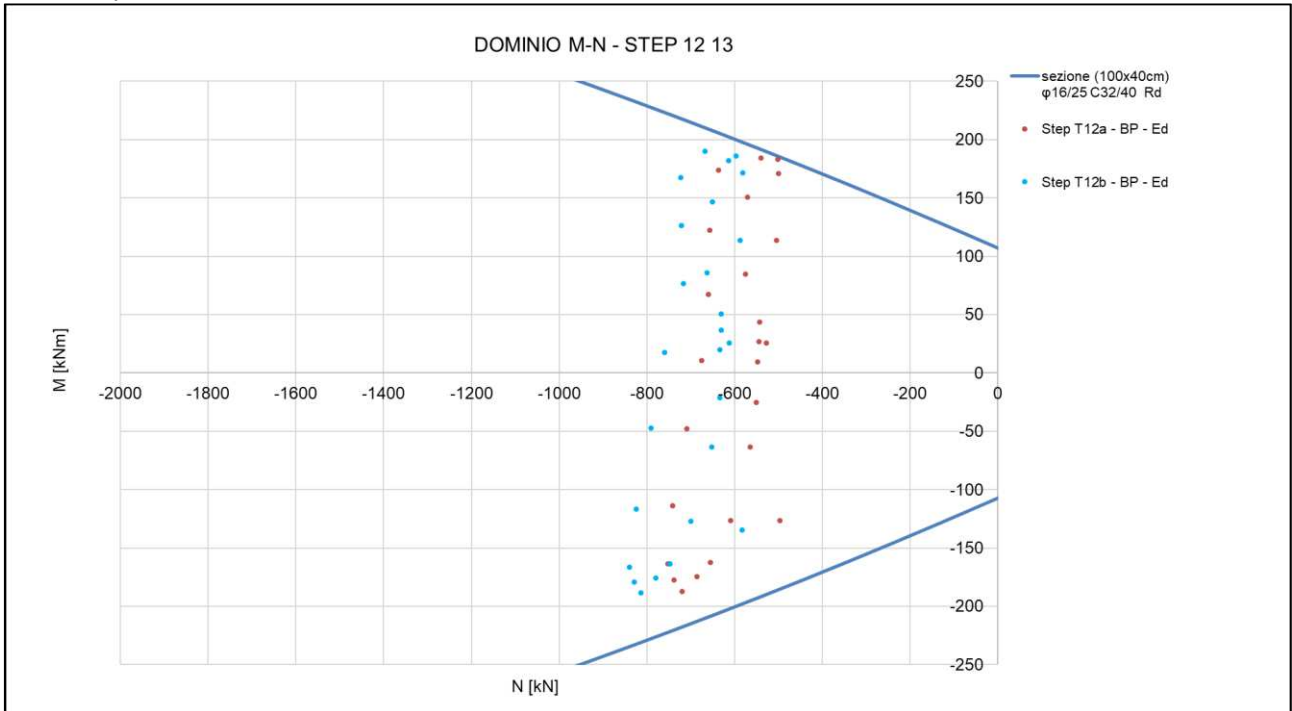
Calotta e piedritti



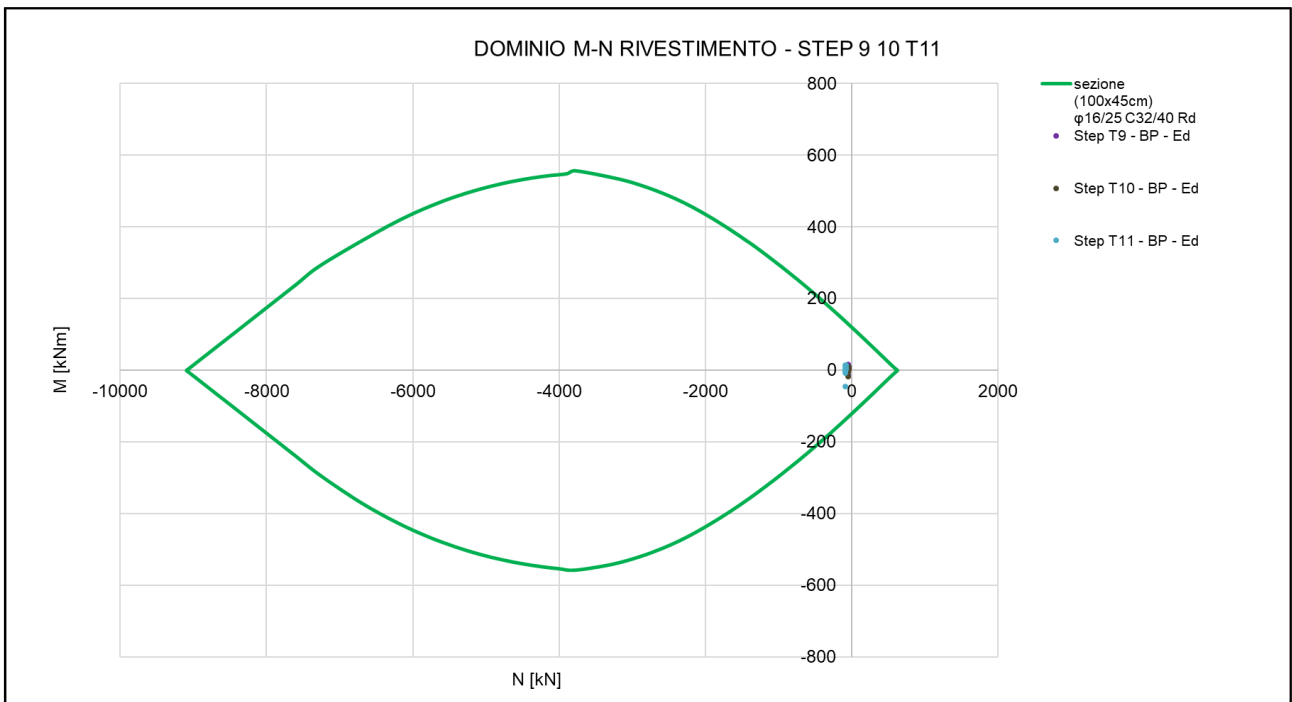
Calotta e piedritti



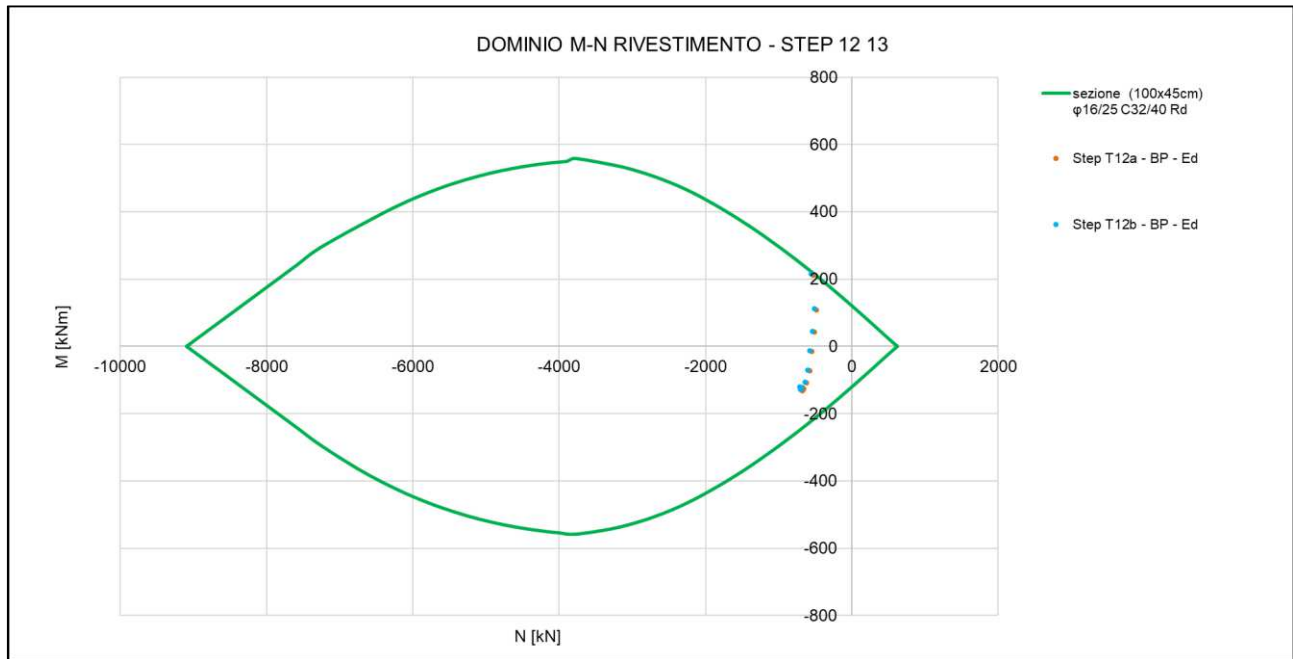
Calotta e piedritti, zoom



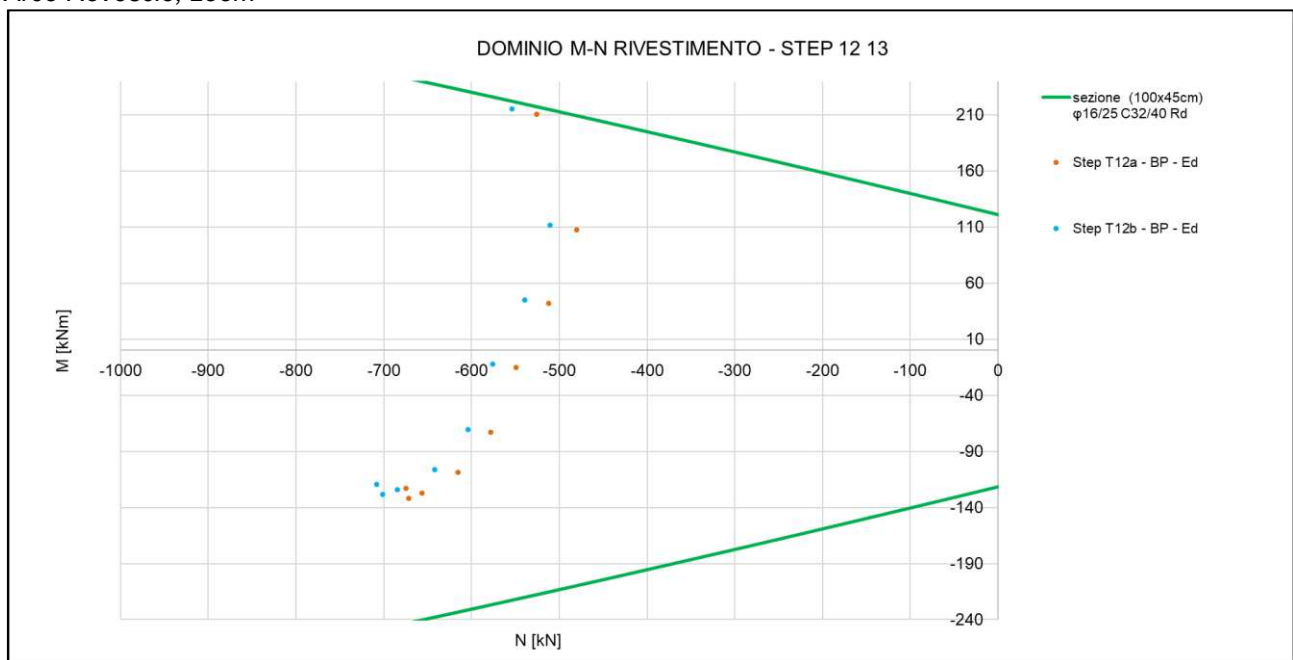
Arco Rovescio



### Arco Rovescio



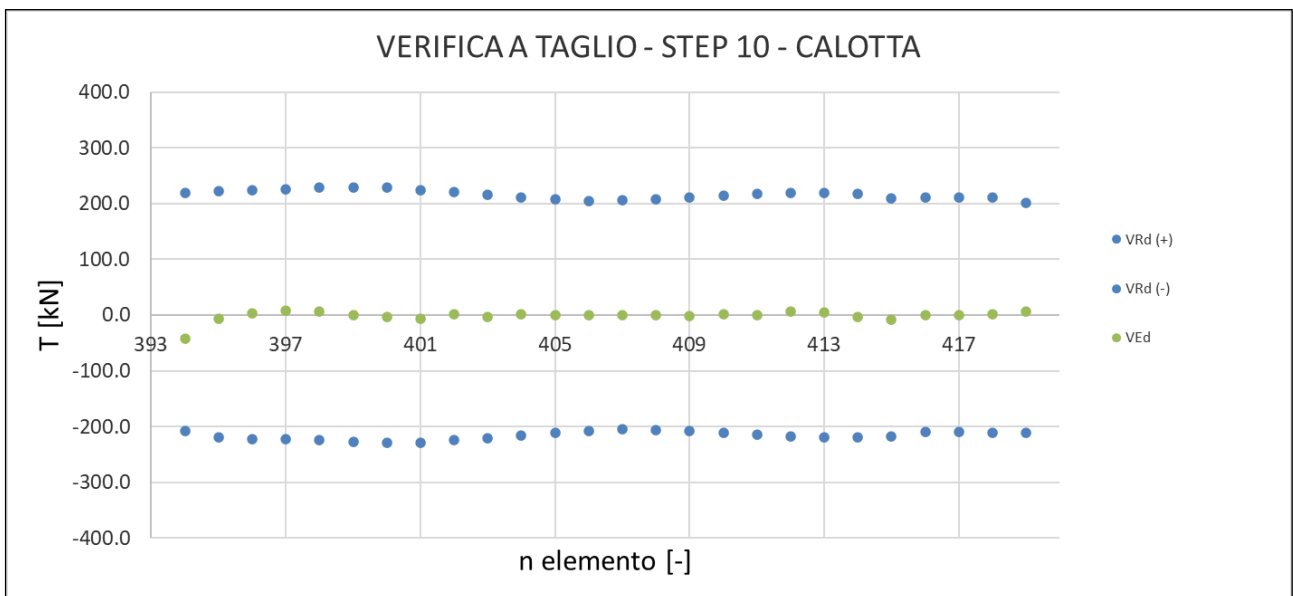
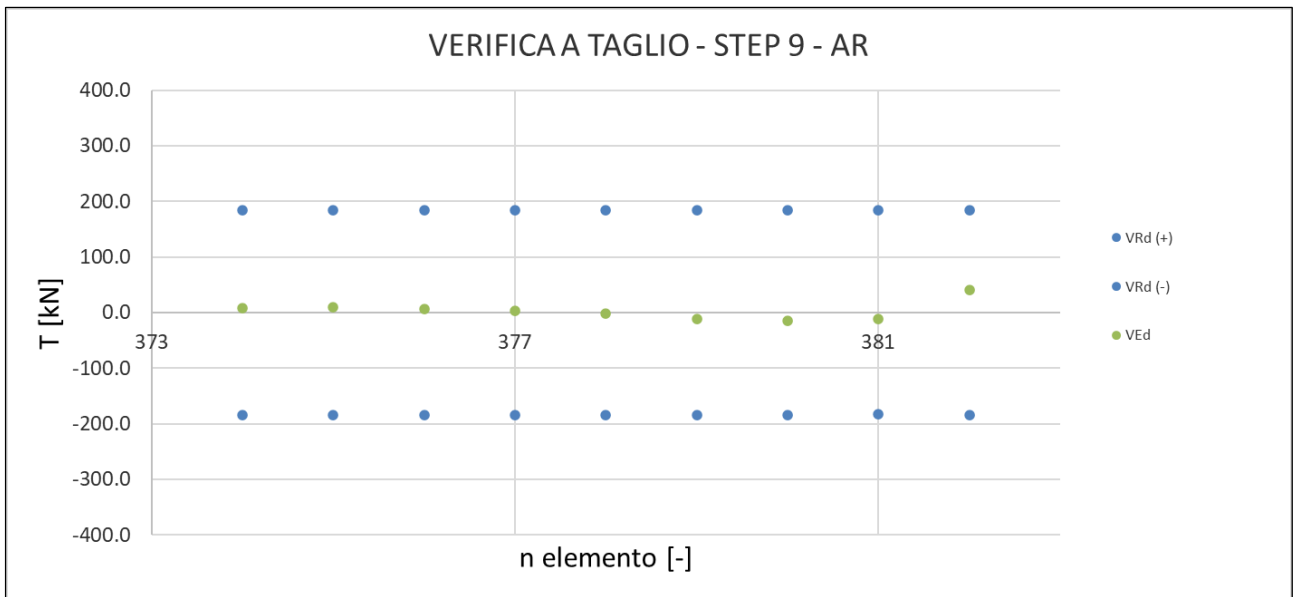
### Arco Rovescio, zoom

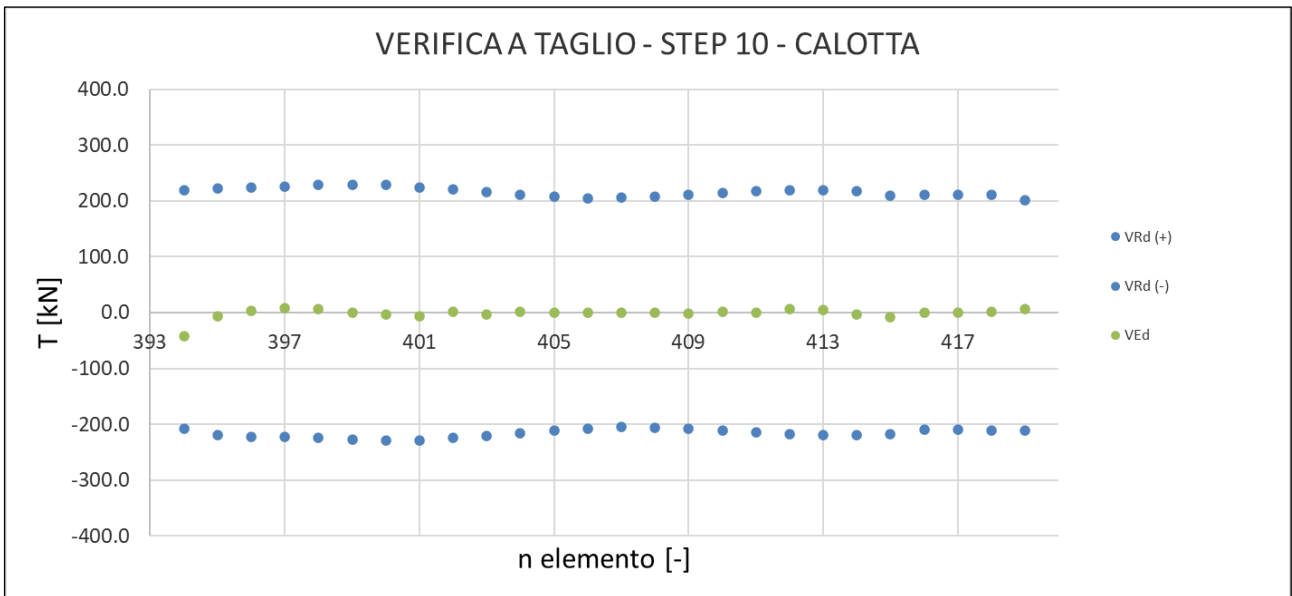
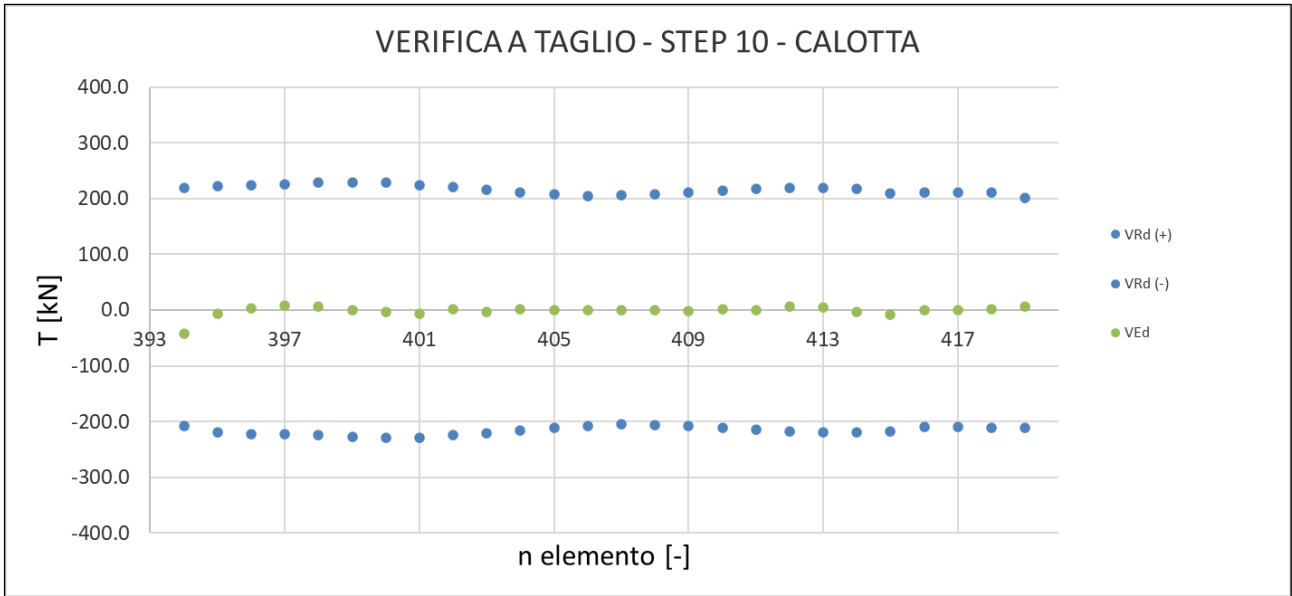


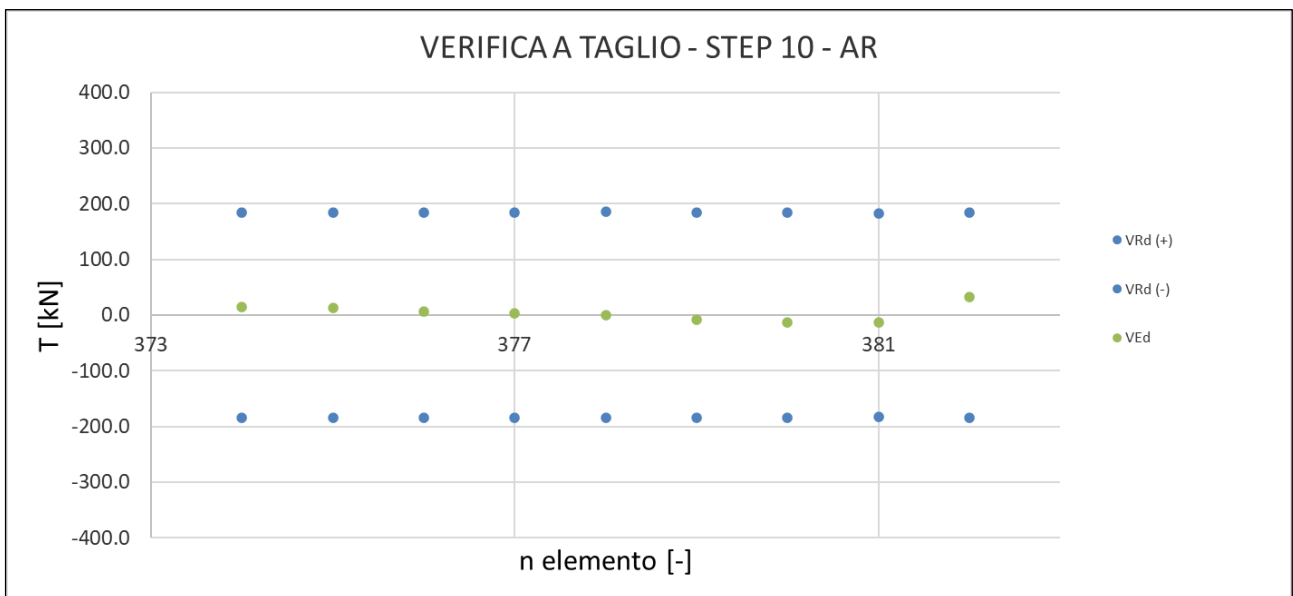
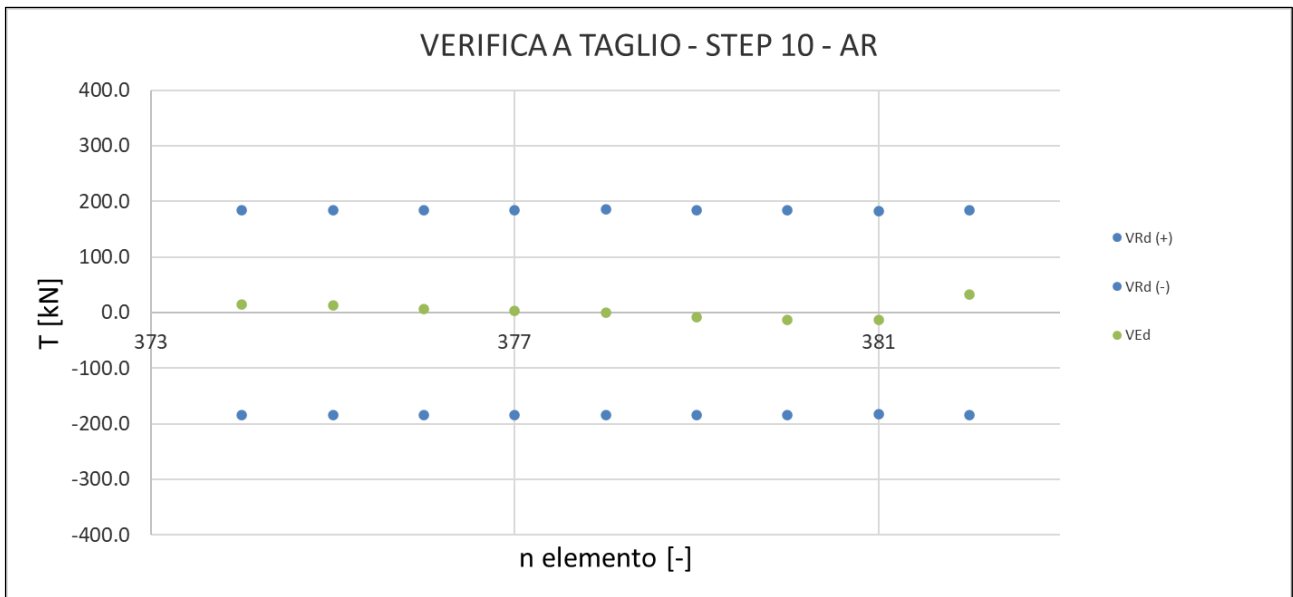
#### 14.3.1.2 Verifiche a taglio

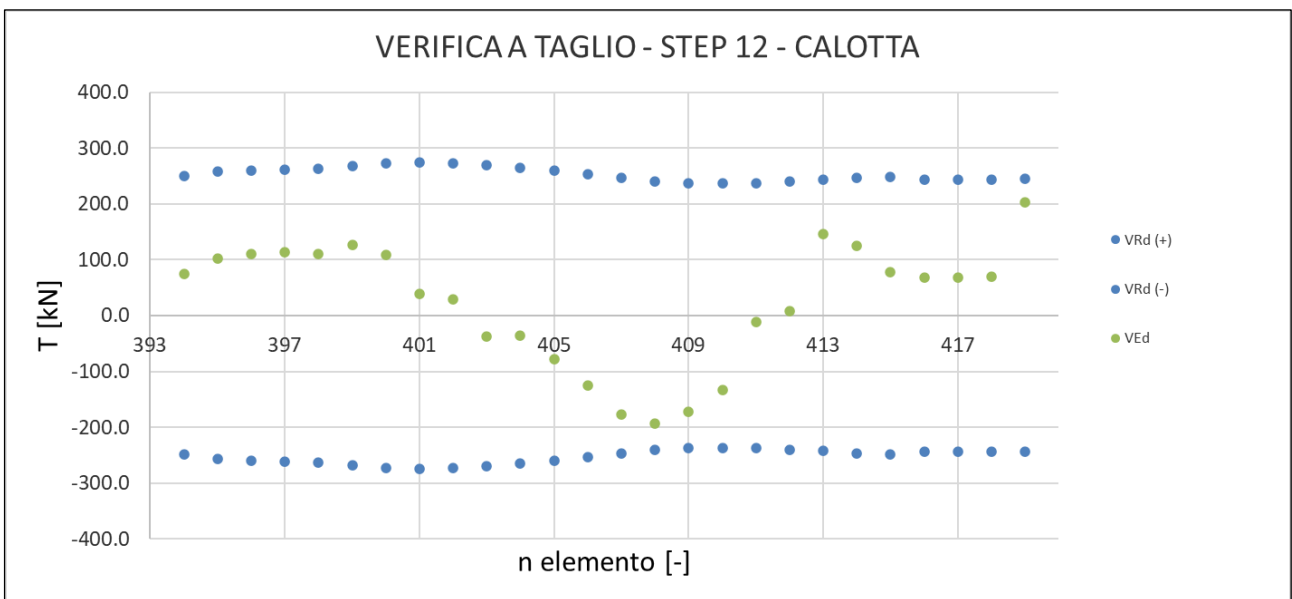
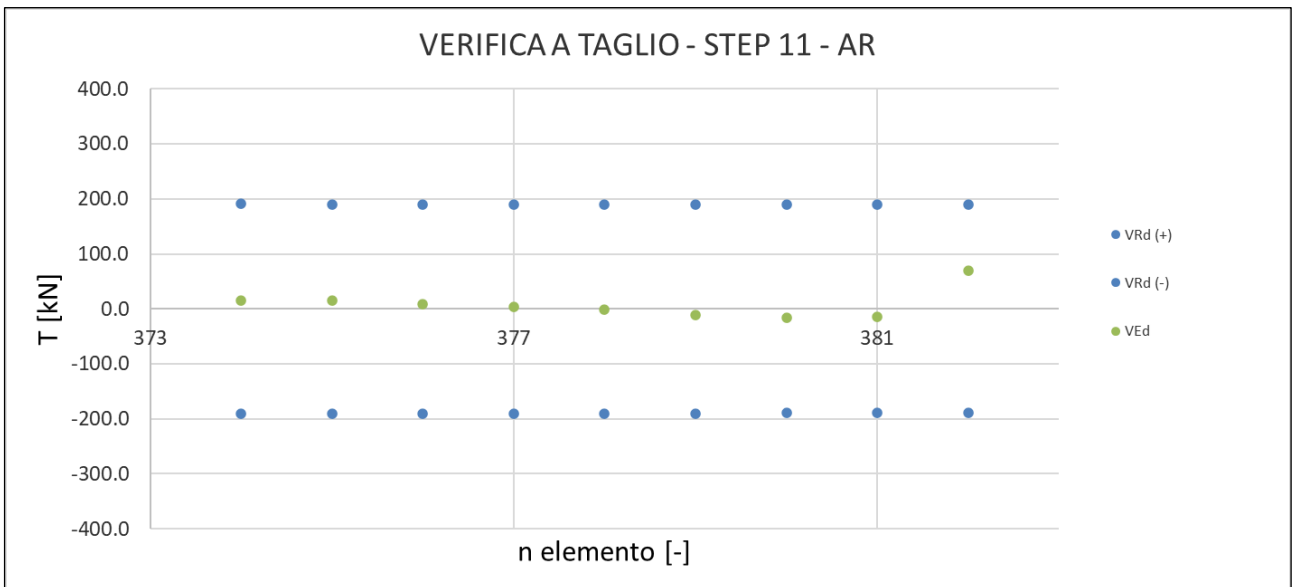
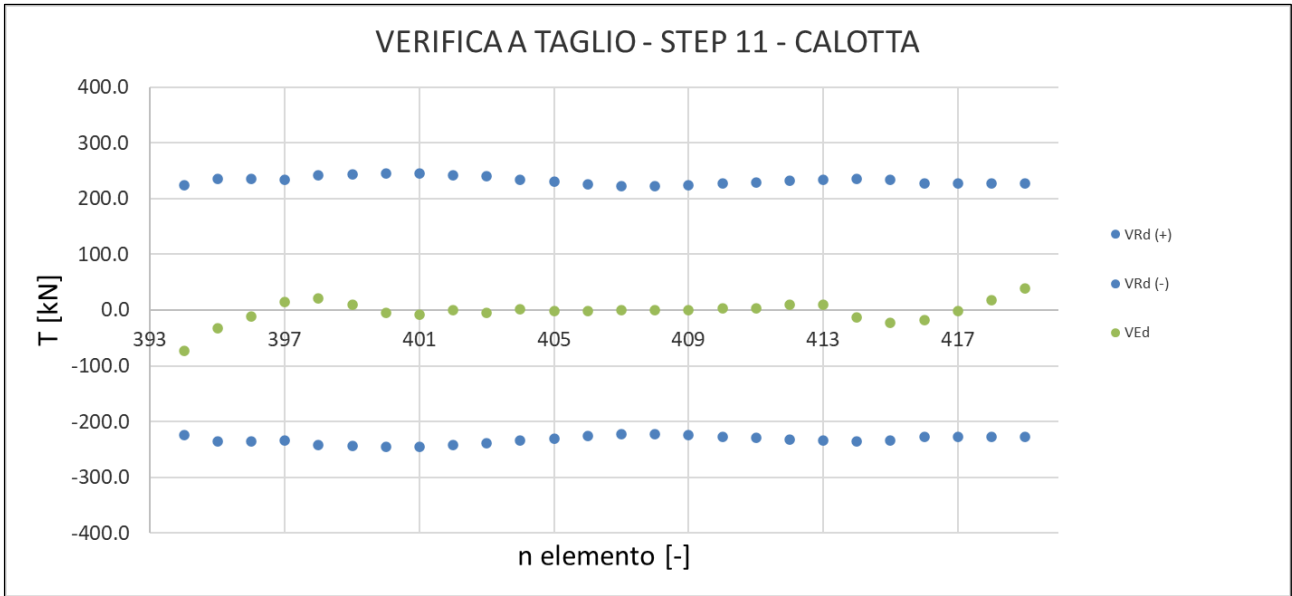
La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

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.

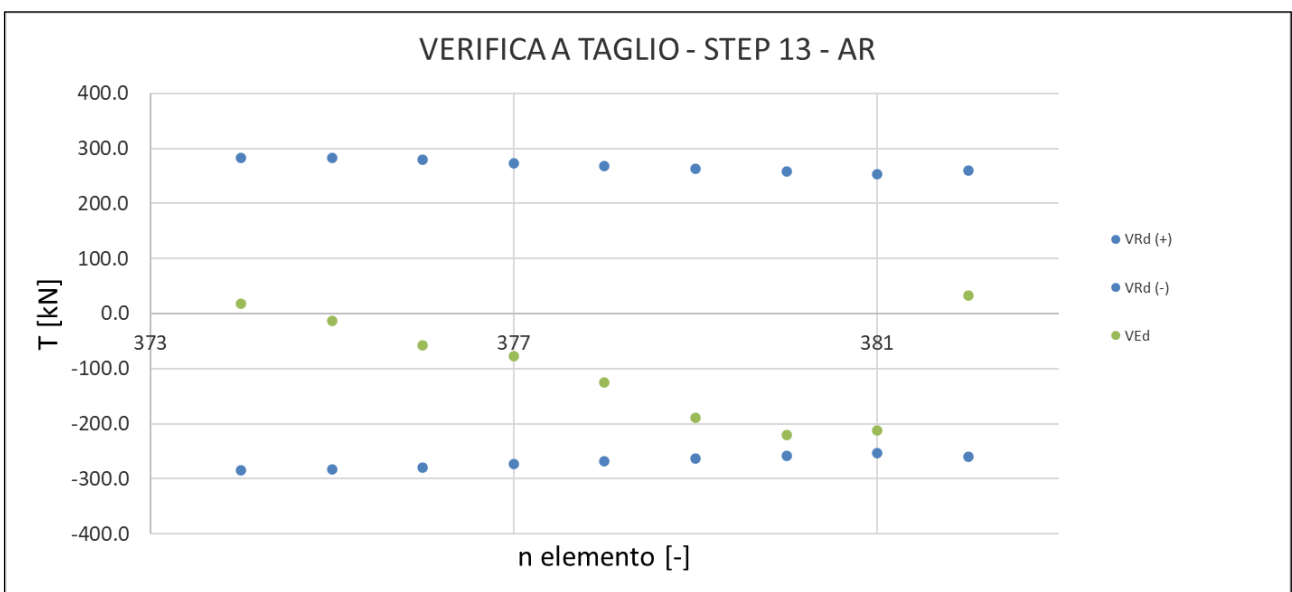
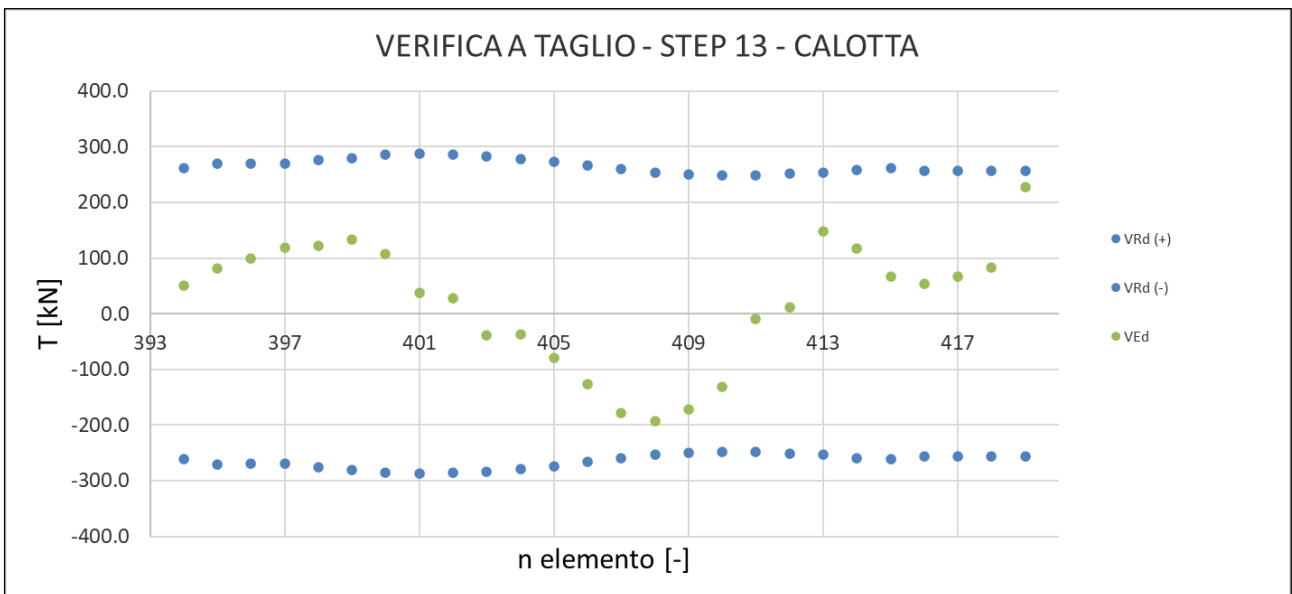
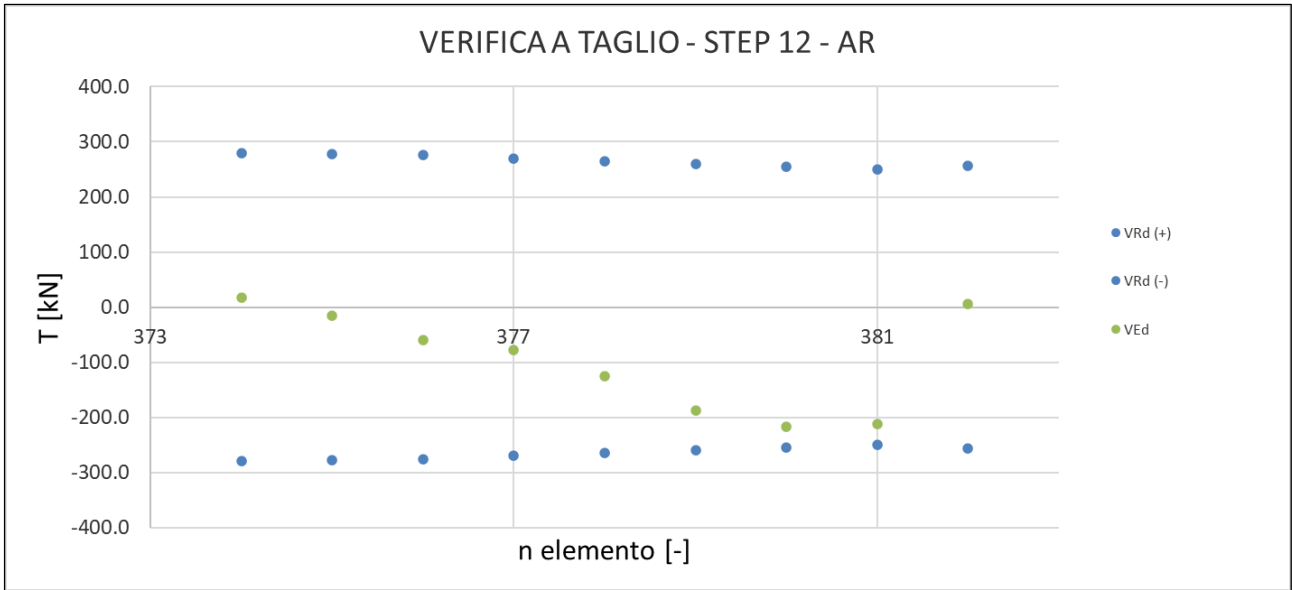












### 14.3.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo del Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

#### 14.3.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

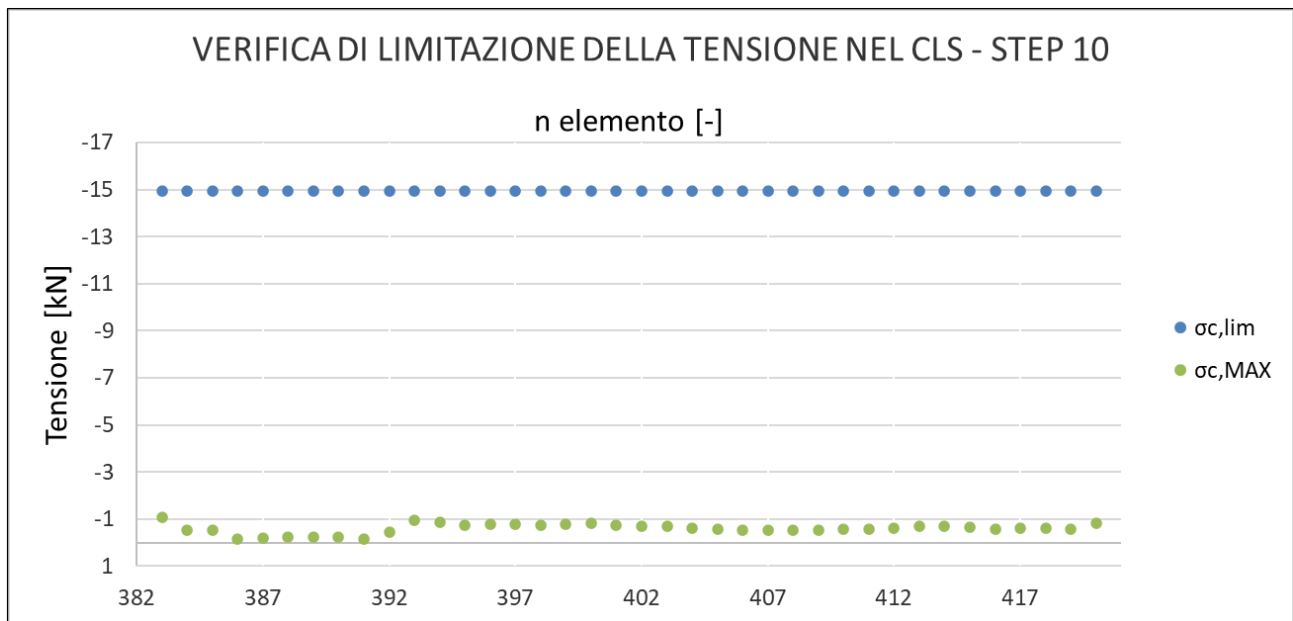
Le verifiche alla limitazione delle tensioni sono effettuate secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC 2018. Per le sezioni non armate sottoposte a pressoflessione nel caso in cui una porzione dell'elemento sia sottoposto a trazione si fa riferimento alla sezione parzializzata. Il calcolo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

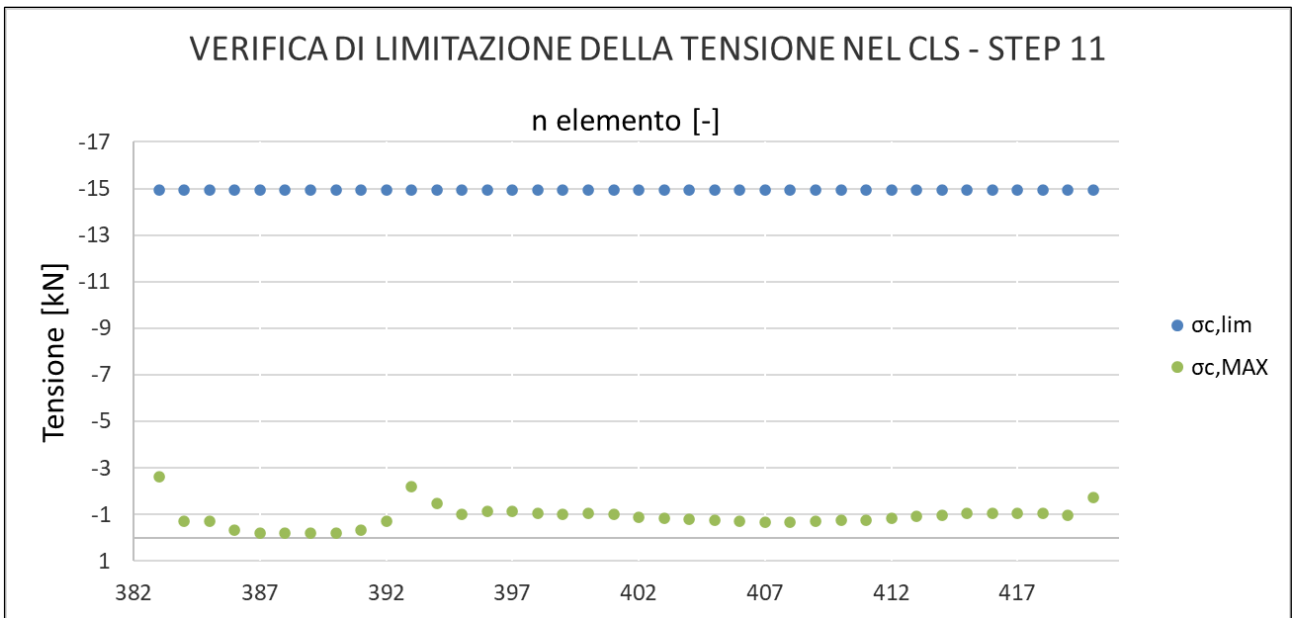
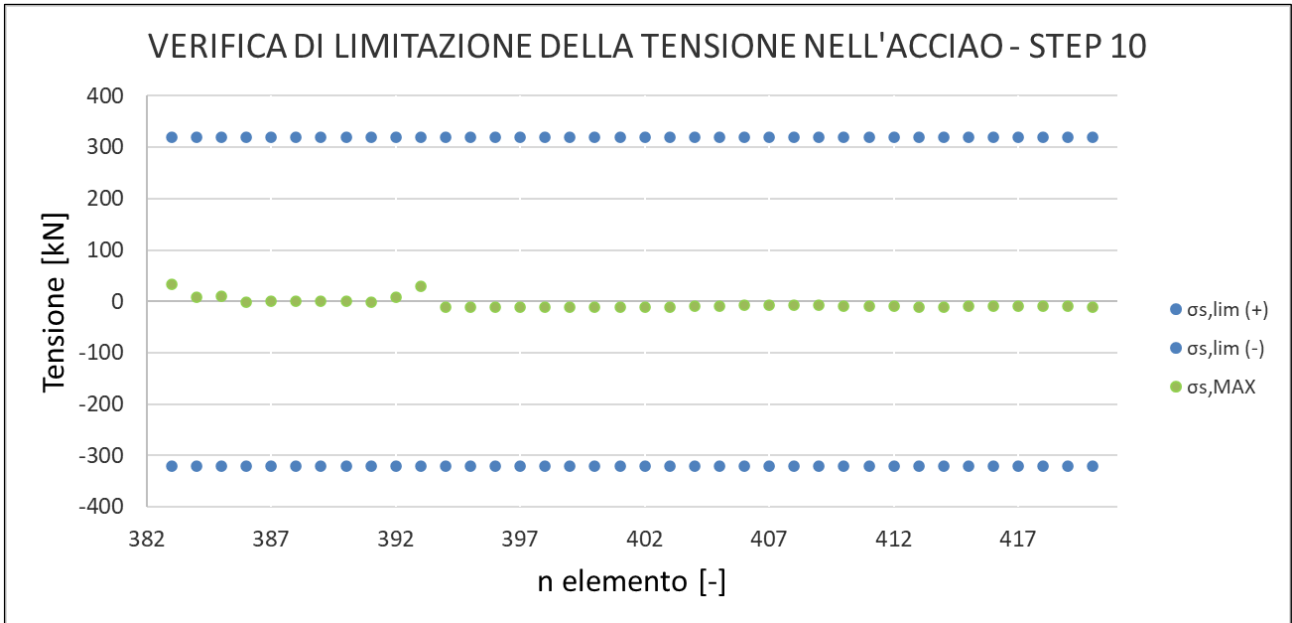
$$\sigma_{c,max} = \frac{2N}{3 \cdot u \cdot b}$$

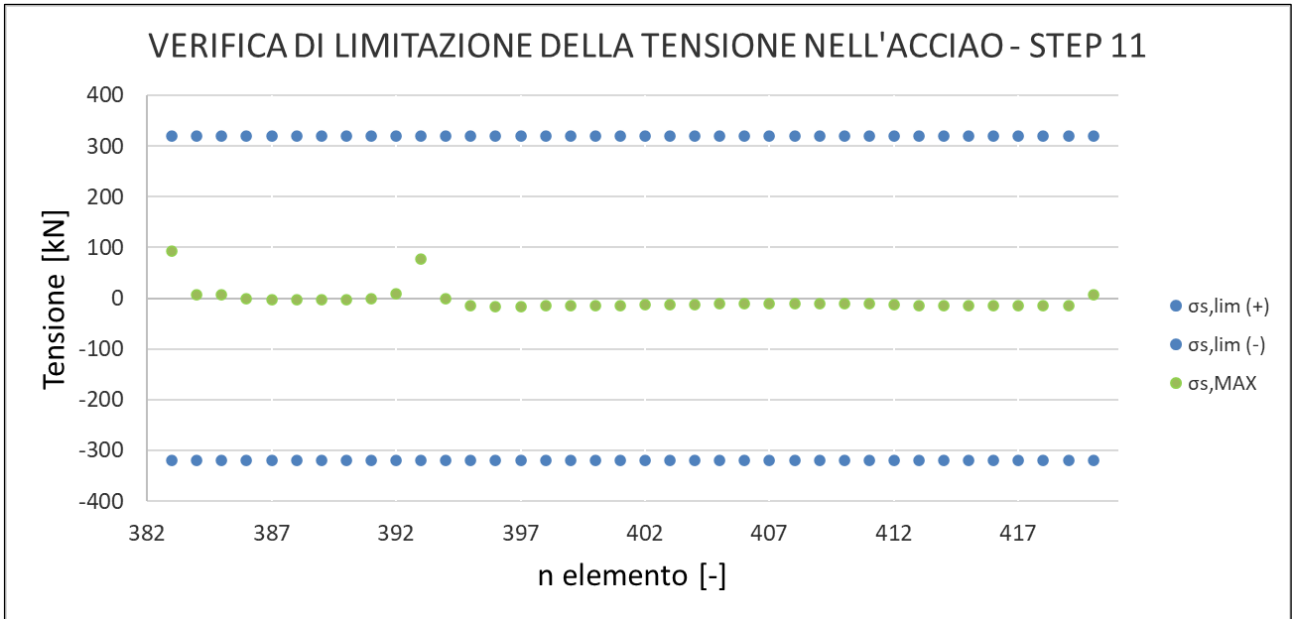
Dove  $u = h/2 - e$  corrisponde alla lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia della sezione parzializzata mentre  $b$  allo spessore della sezione (1 m).

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

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



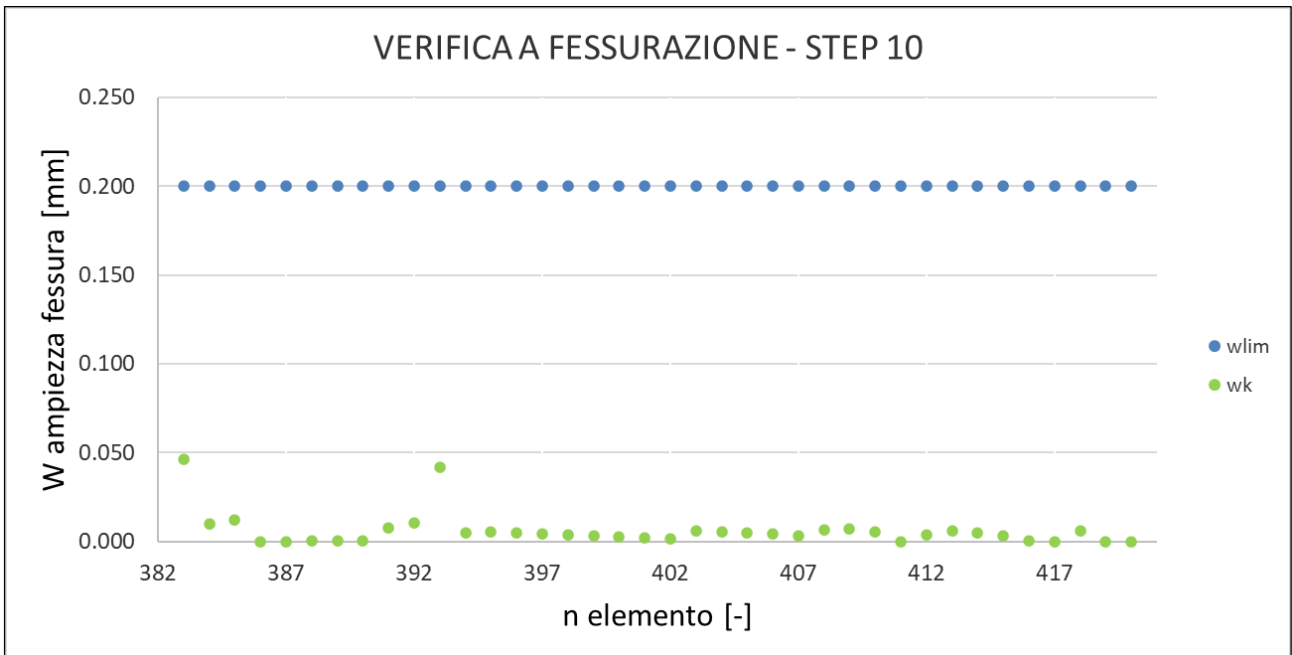


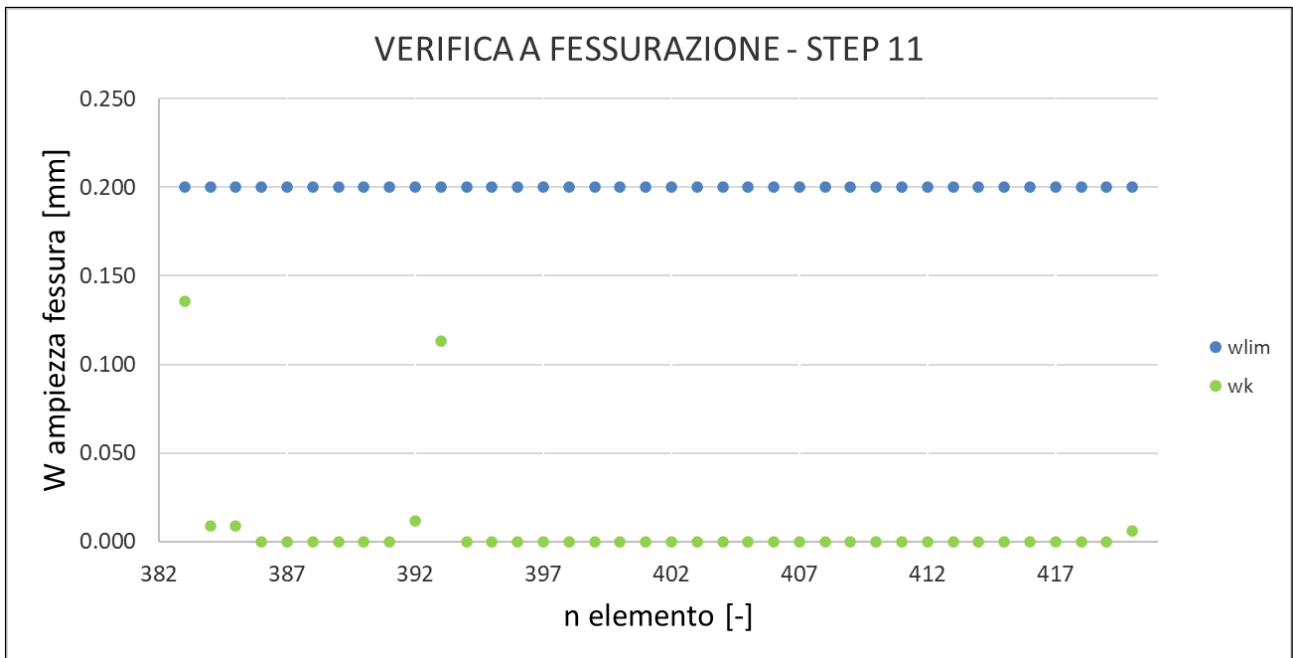


#### 14.3.2.2 Verifica dello stato limite di fessurazione

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.





## 15 ALLEGATO 4 – VERIFICA DEGLI INNESTI CON LA GALLERIA PRINCIPALE

### 15.1 Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo - Fasi di lavorazione

Nelle fasi di lavorazione (Fase 1-4 al Paragrafo 6.1.1) i ritti laterali sono sollecitati da uno stato di pressoflessione amplificato alla porzione di ammasso non supportato. In particolare, le azioni nei ritti laterali sono calcolate amplificando quelle presenti nella sezione corrente per il coefficiente

$$R = 1 + \frac{b/2}{L}$$

Considerando la larghezza di porzione non supportata  $b$  pari a 6.5 m (pari alla larghezza del bypass di 4.5m, estesa di 1 m a monte e a valle dell'innesto), e la lunghezza della fascia di ripartizione del carico d'ammasso, cautelativamente ipotizzata pari a 1 m, il coefficiente di amplificazione dei carichi risulta uguale a

$$R = 4.25$$

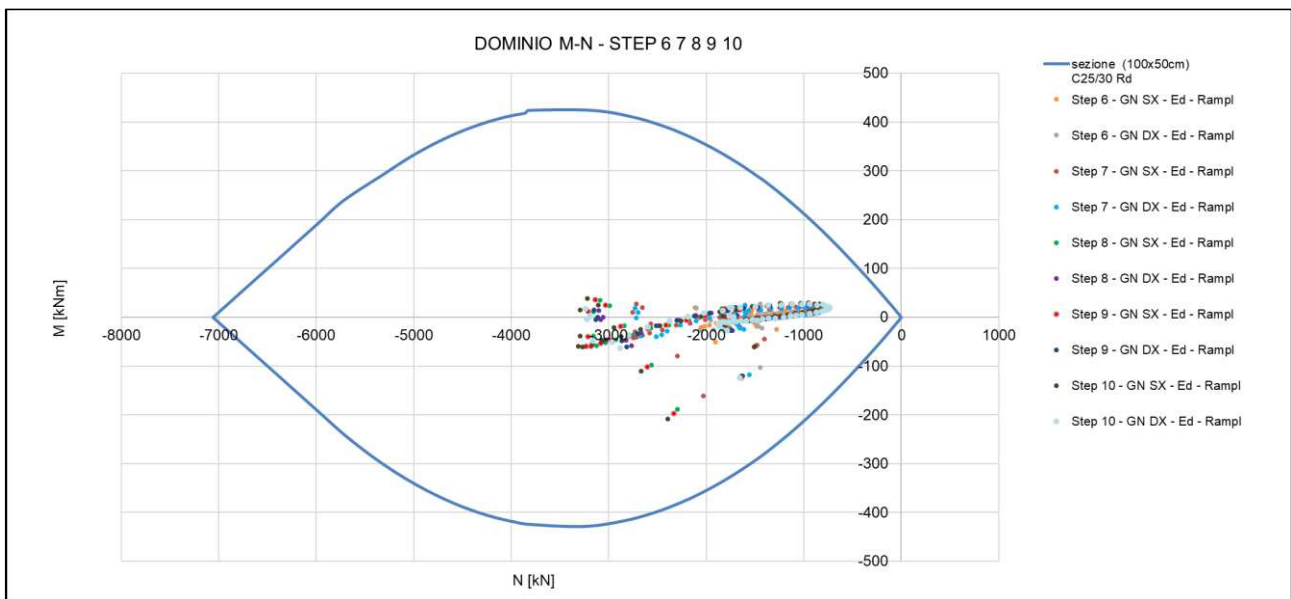
Sono di seguito riportate le verifiche dei rivestimenti definitivi delle gallerie di linea in corrispondenza degli innesti.

#### 15.1.1 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 6 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, scavo del Bypass;
- Step 7 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, avanzamento dello scavo del Bypass)
- Step 8 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento di prima fase nel Bypass;
- Step 9 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio nel Bypass
- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass

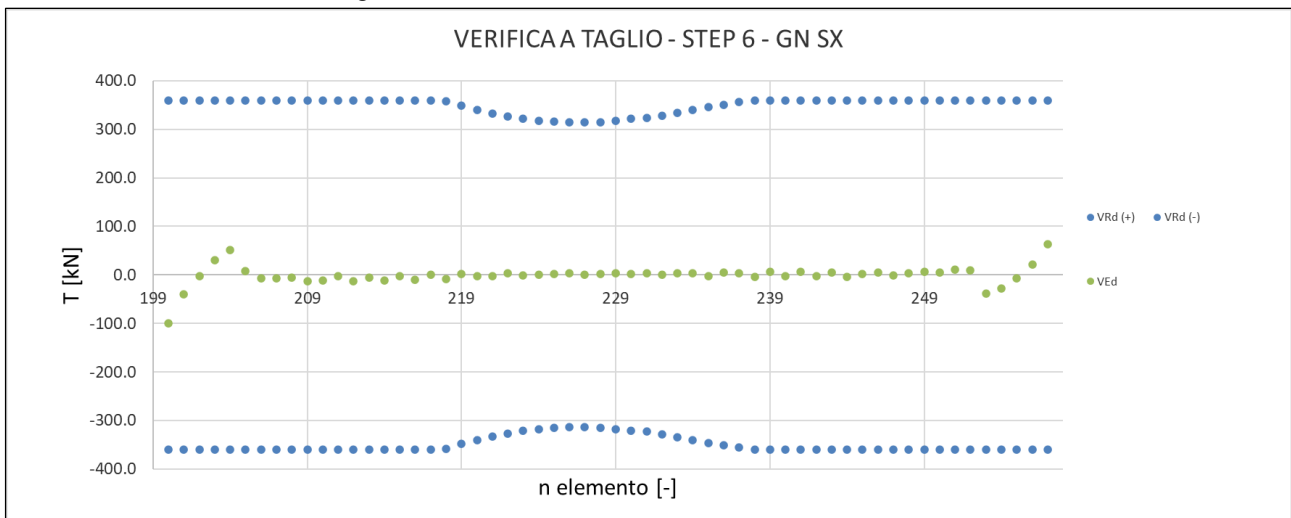
### 15.1.1.1 Verifiche a pressoflessione

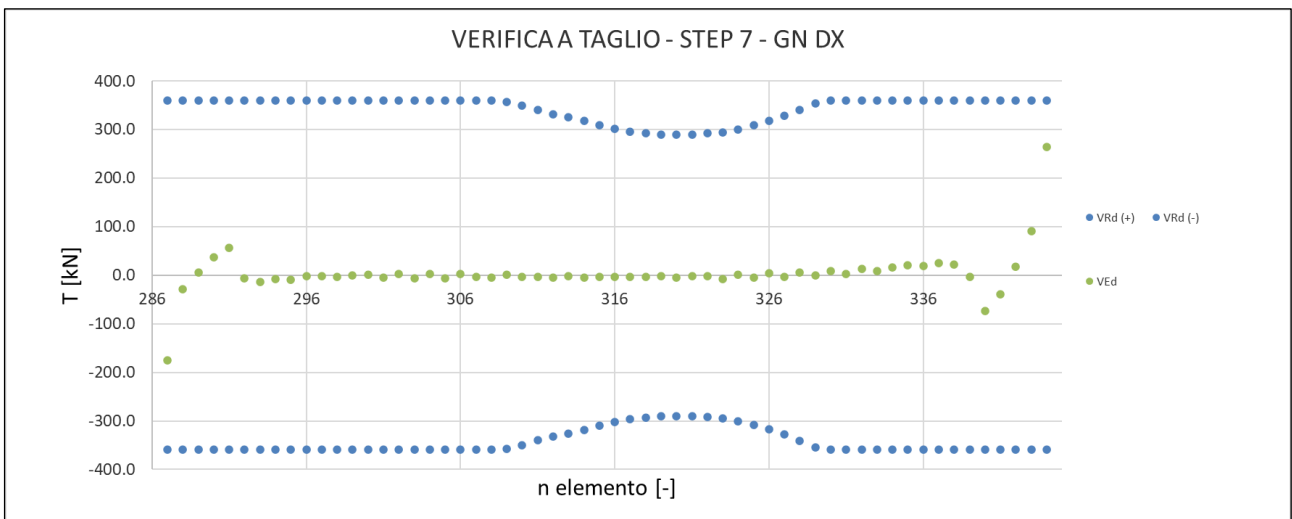
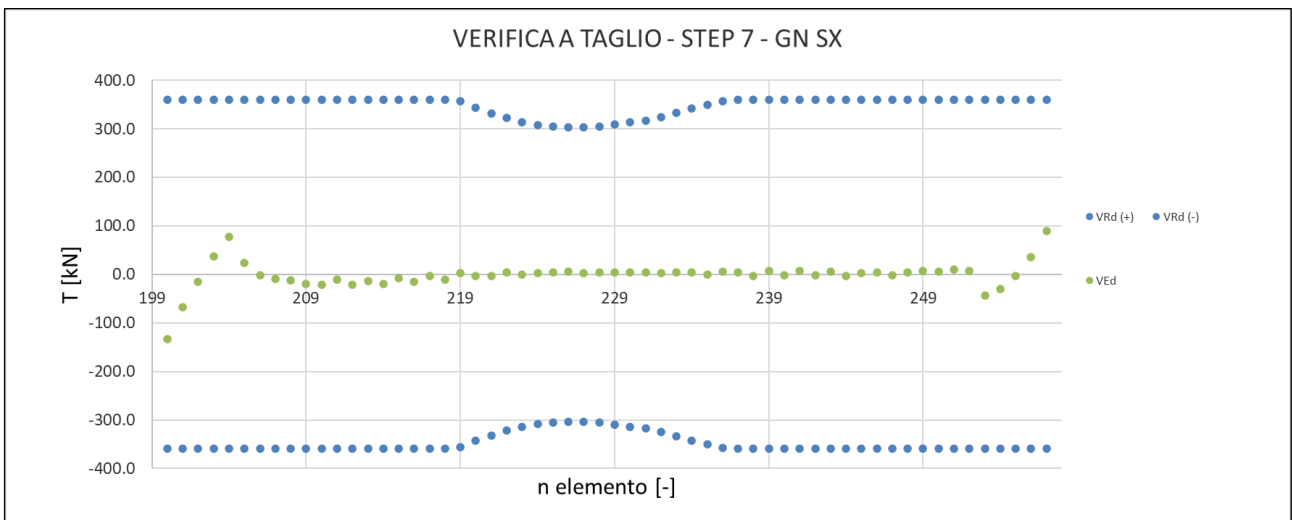
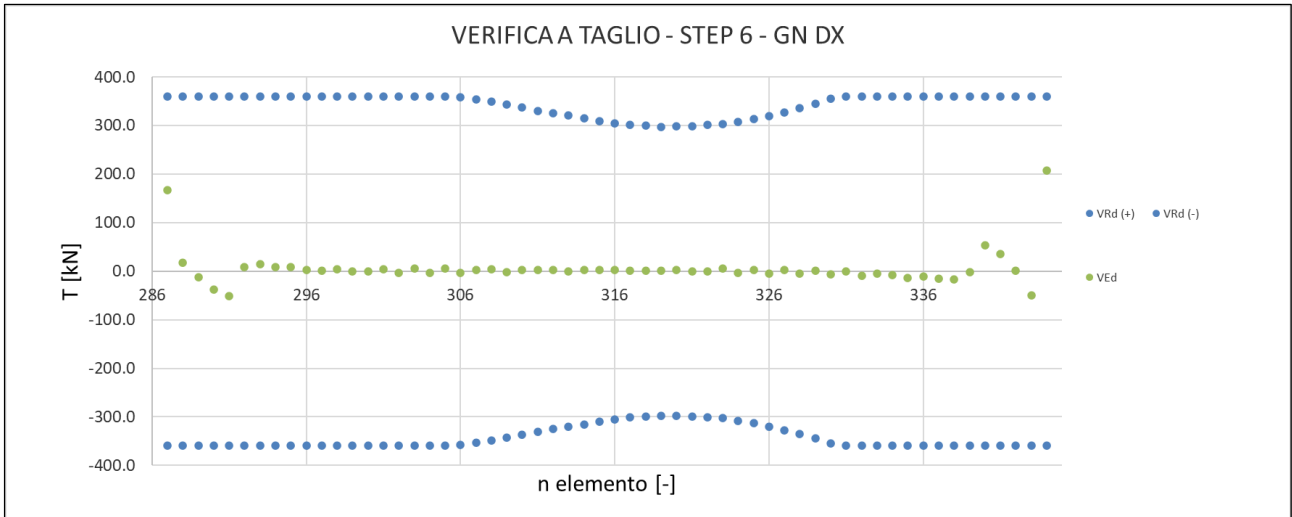


### 15.1.1.2 Verifiche a taglio

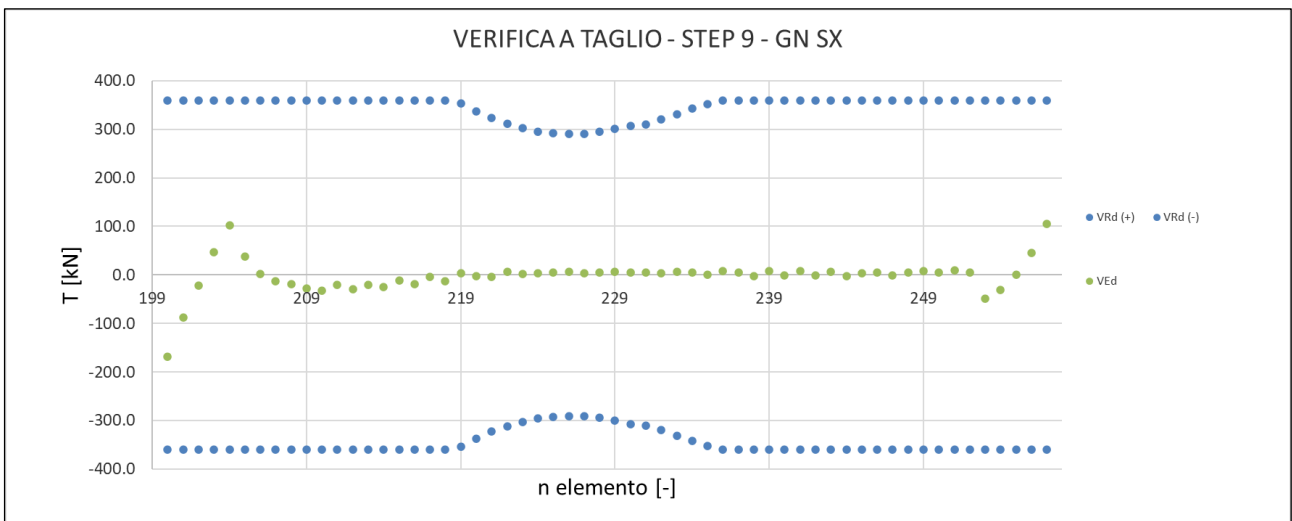
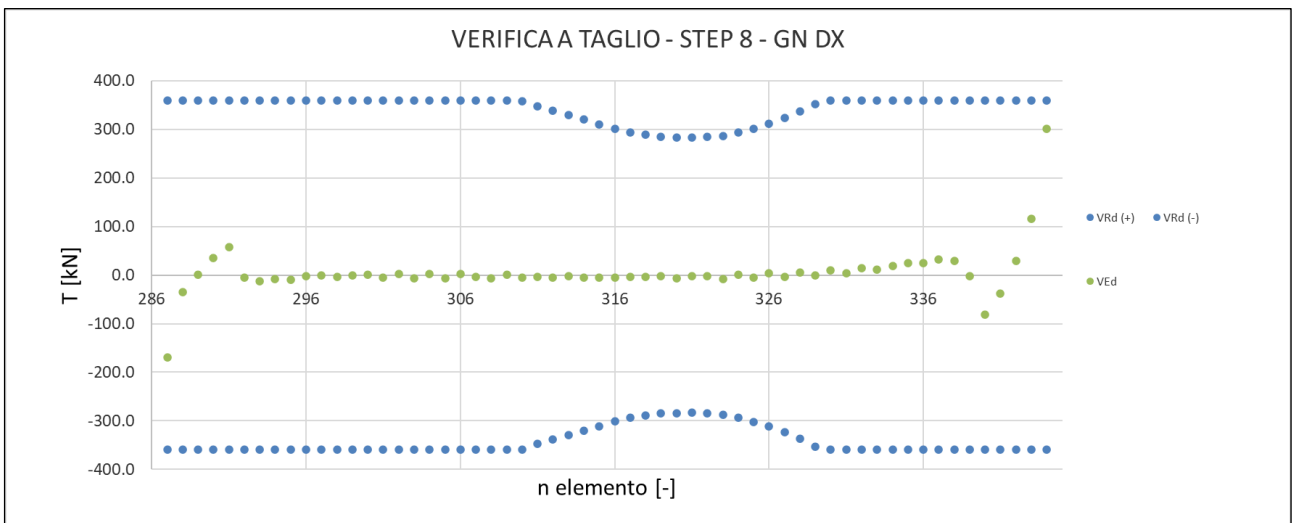
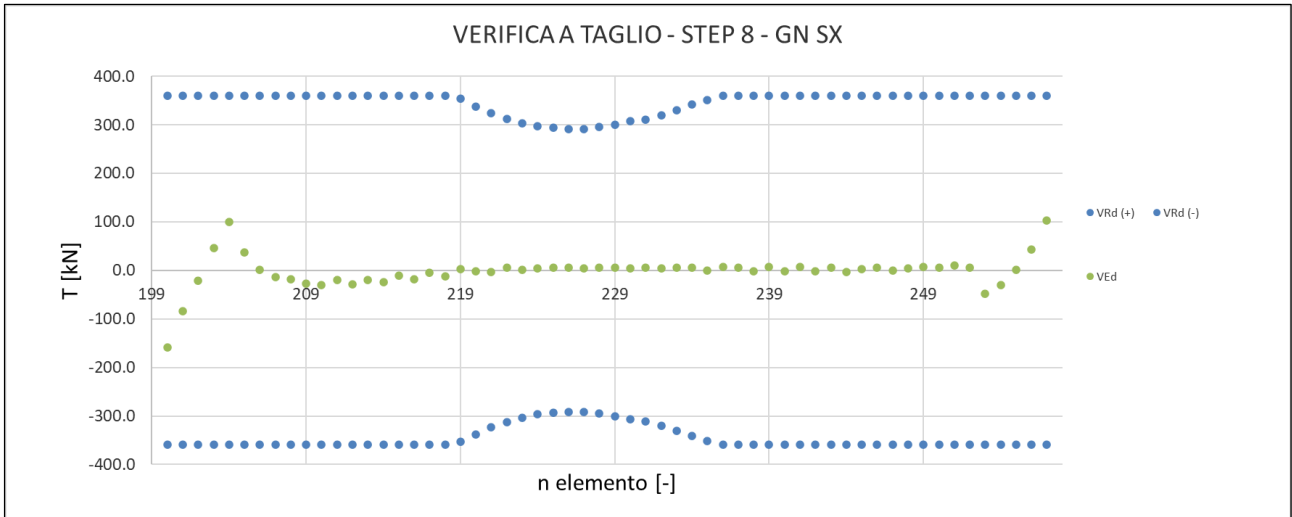
La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

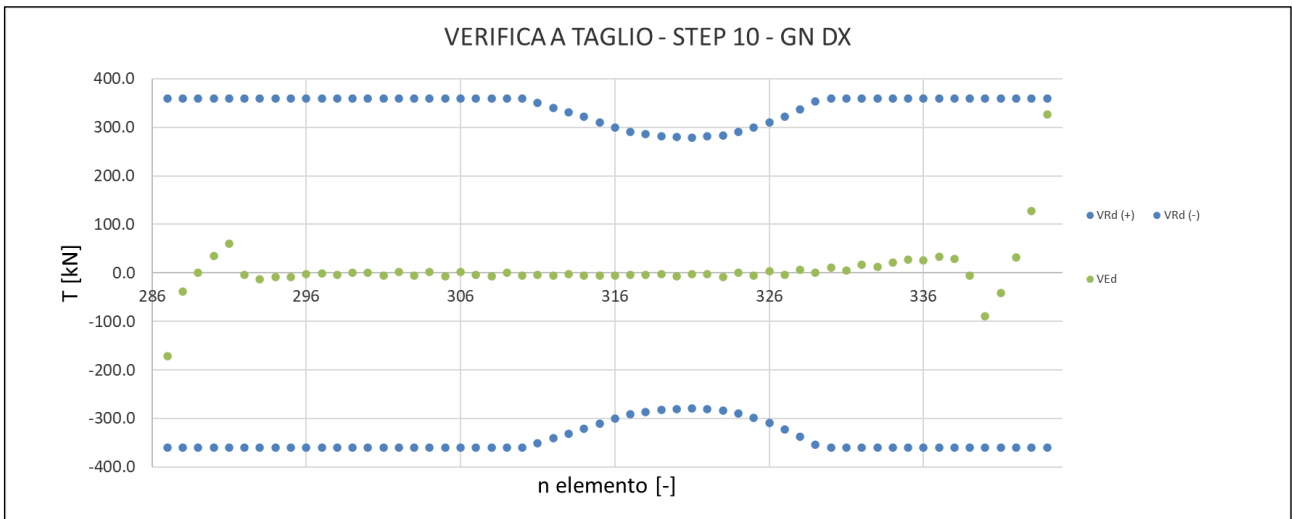
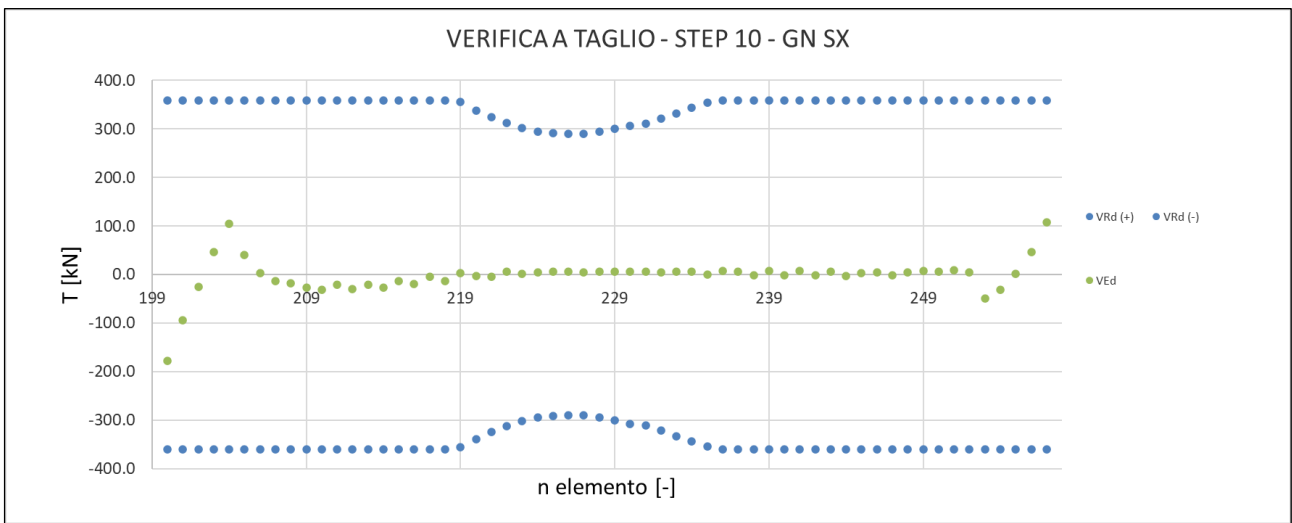
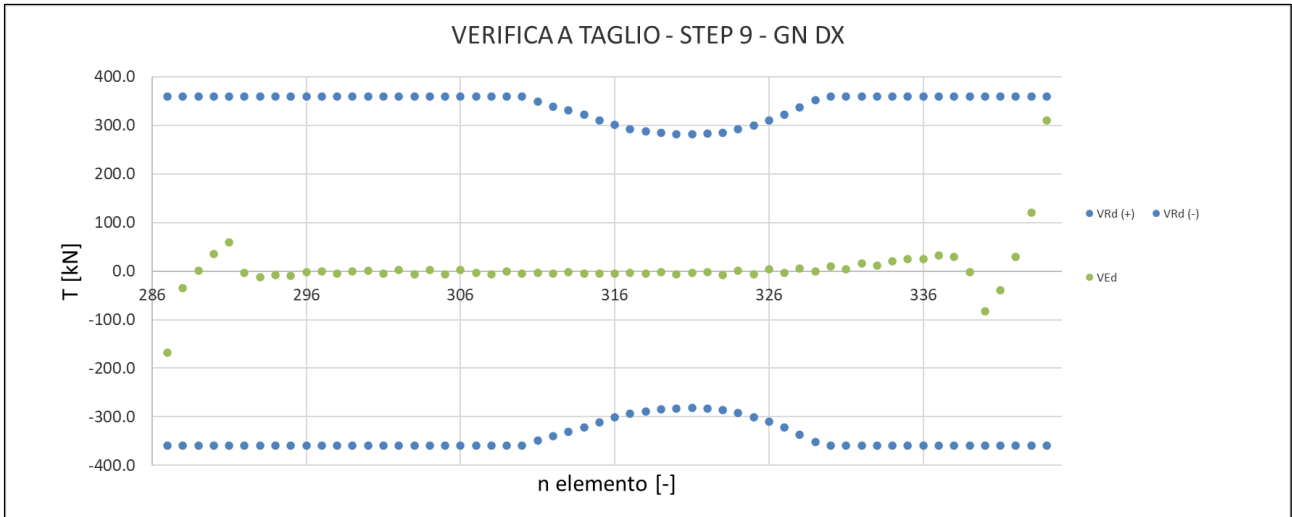
Nei seguenti diagrammi sono riportate le verifiche a taglio del rivestimento definitivo di calotta e arco rovescio. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'elemento in cui viene effettuata la verifica e sull'asse delle ordinate, il relativo valore di taglio.











### 15.1.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Considerata la natura temporanea delle fasi di lavorazione, in questo step il rivestimento definito delle gallerie naturali non viene verificato allo SLE

## 15.2 Sezione d'innesto della galleria naturale - Rivestimento definitivo

A lungo termine si ipotizza che ritti laterali siano sollecitati da uno stato di pressoflessione dovuto alla reazione normale d'appoggio dell'architrave oltre allo stato di sforzo (N, M) presente nel rivestimento integro.

Le azioni nei ritti laterali sono calcolate amplificando quelle presenti nella sezione corrente per il coefficiente

$$R = 1 + \frac{b/2}{L}$$

Considerando la larghezza di porzione non supportata  $b$  di 4.5 m (pari alla larghezza del bypass) e la lunghezza della zona rinforzata pari a 1 m, il coefficiente di amplificazione dei carichi risulta uguale a

$$R = 3.25$$

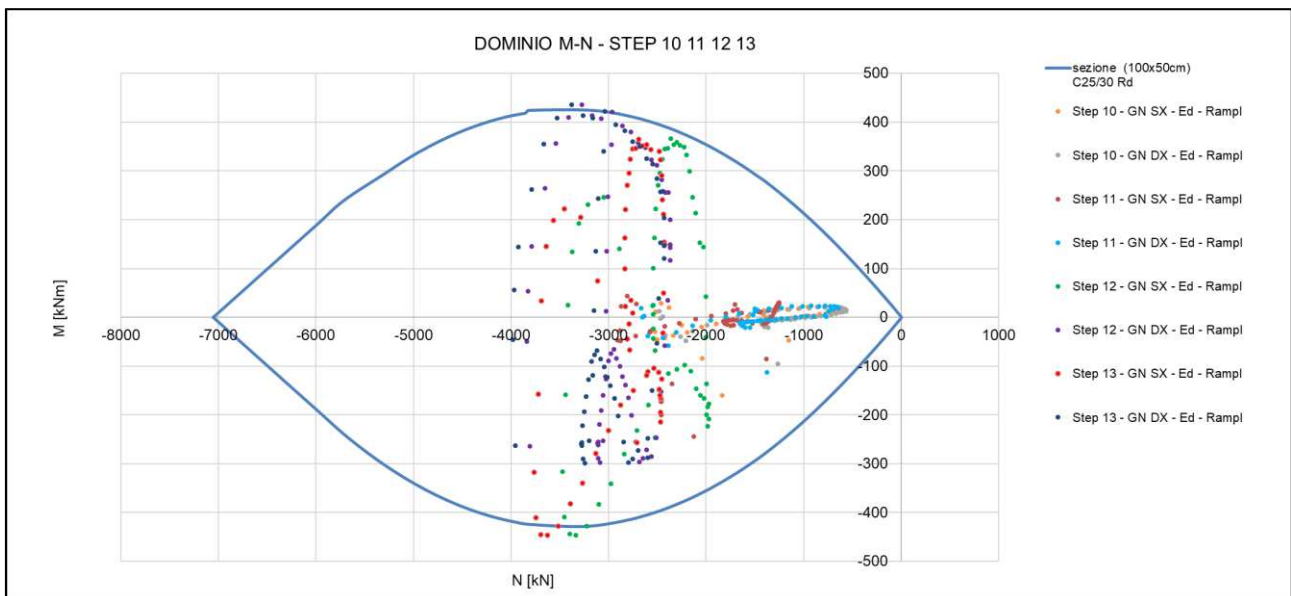
Sono di seguito riportate le verifiche dei rivestimenti definitivi delle gallerie di linea in corrispondenza degli innesti.

### 15.2.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

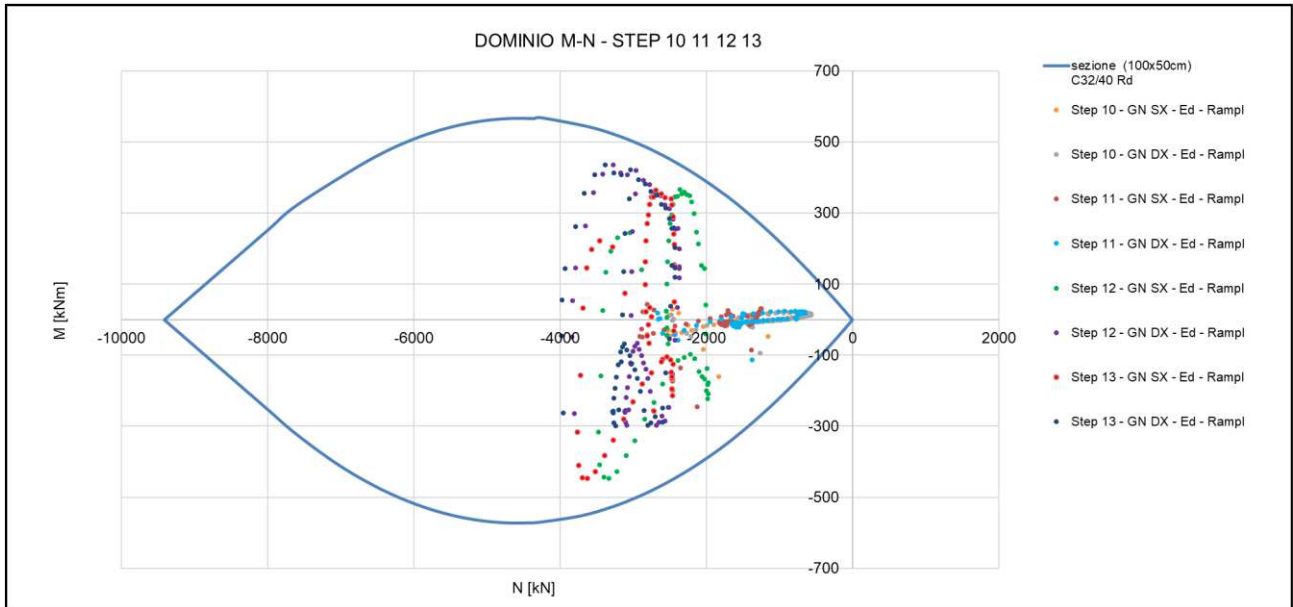
Di seguito si riportano le verifiche a pressoflessione (dominio M-N) e a taglio del rivestimento definitivo nella seguente condizione:

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda
- Step 12 - Condizioni presenti allo Step 10 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;
- Step 13 - Condizioni presenti allo Step 11 + azione sismica calcolata con analisi numerica pseudo-statica;

#### 15.2.1.1 Verifiche a pressoflessione



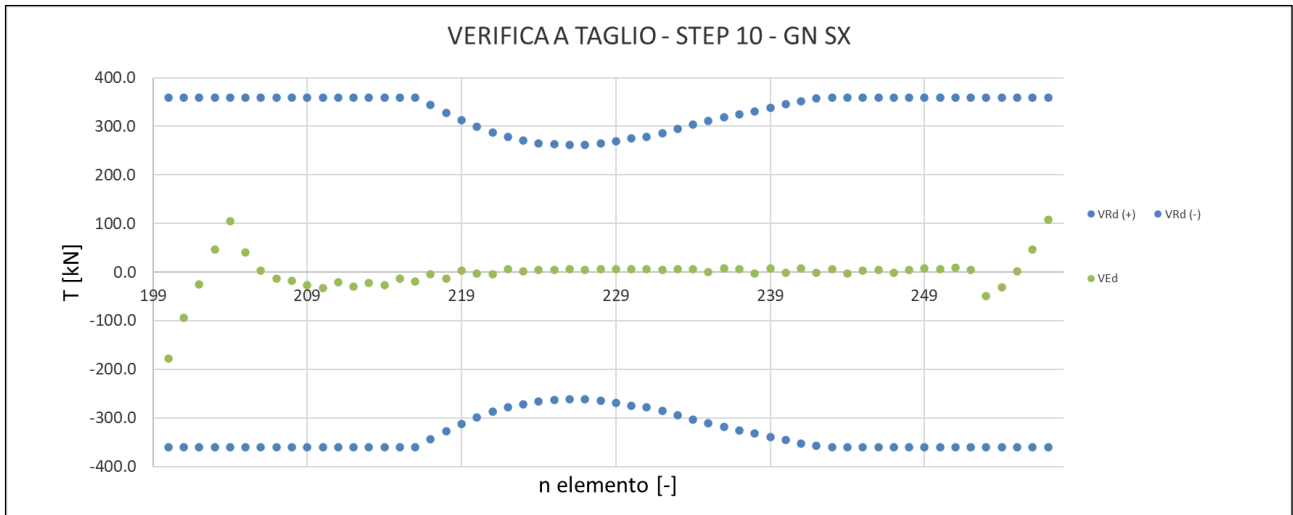
Come evidenziato in figura, alcuni punti M-N sono al di fuori del dominio di resistenza a pressoflessione. Il dominio cautelativamente è stato calcolato considerando la porzione di calotta non demolita, realizzata con cls C25/30 non armato. I punti in esame corrispondono tuttavia agli stati di sollecitazione agenti sui ritti rinforzati, costituiti da cls C32/40. Quegli stessi punti, posti all'interno del dominio di una sezione 100x50cm C32/40 risultano verificati.

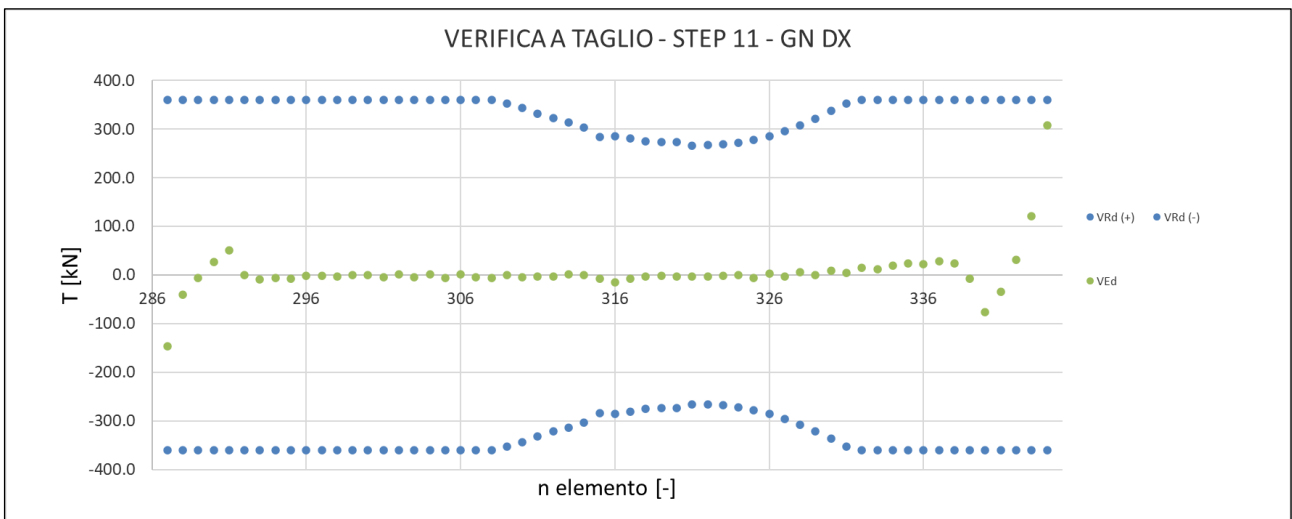
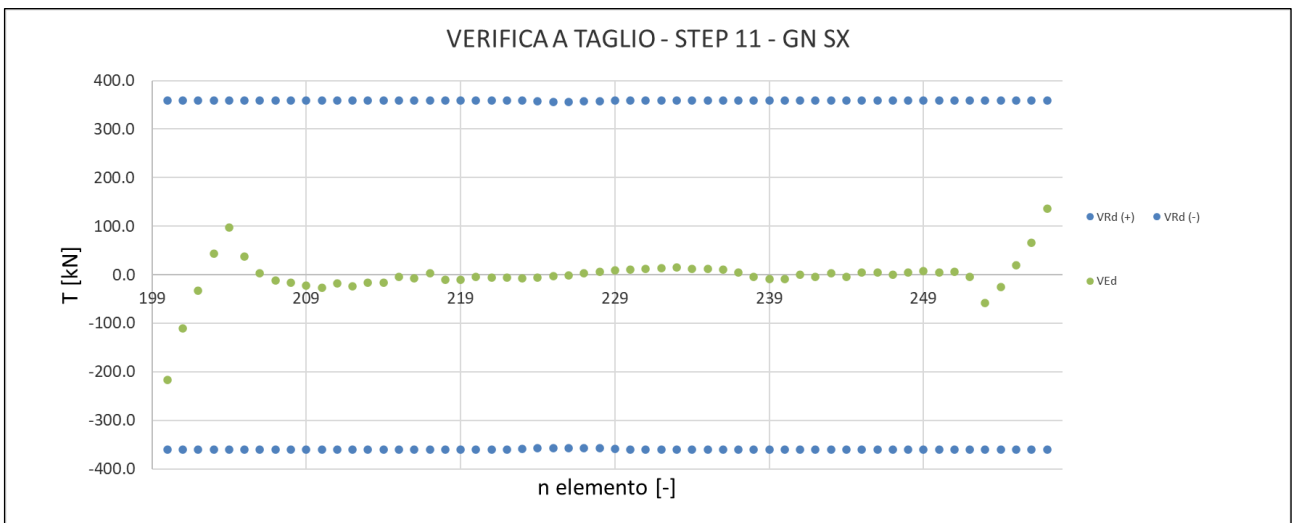
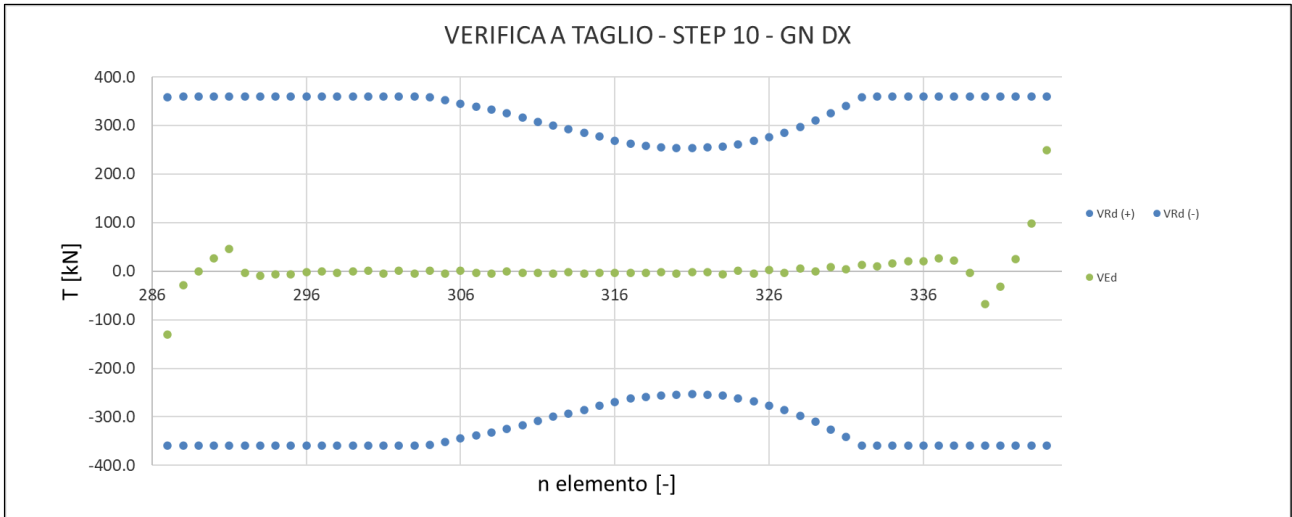


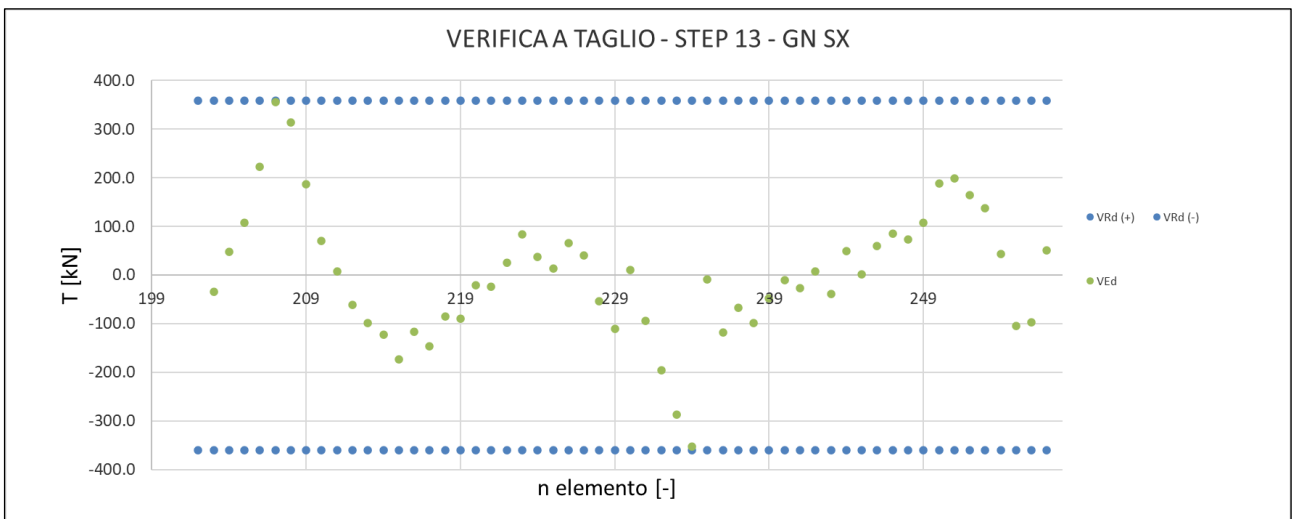
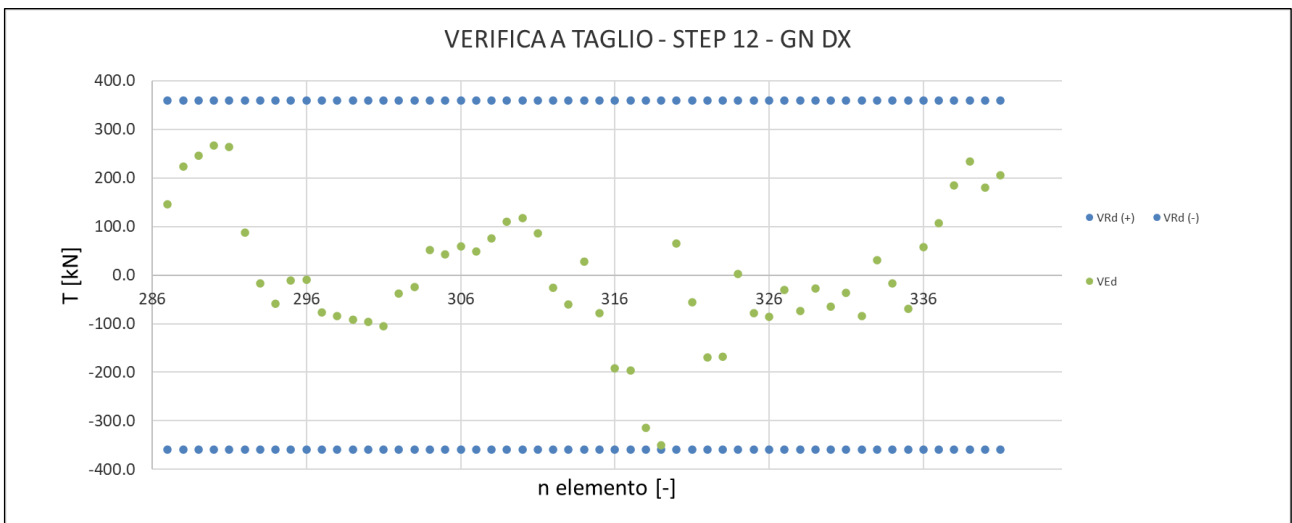
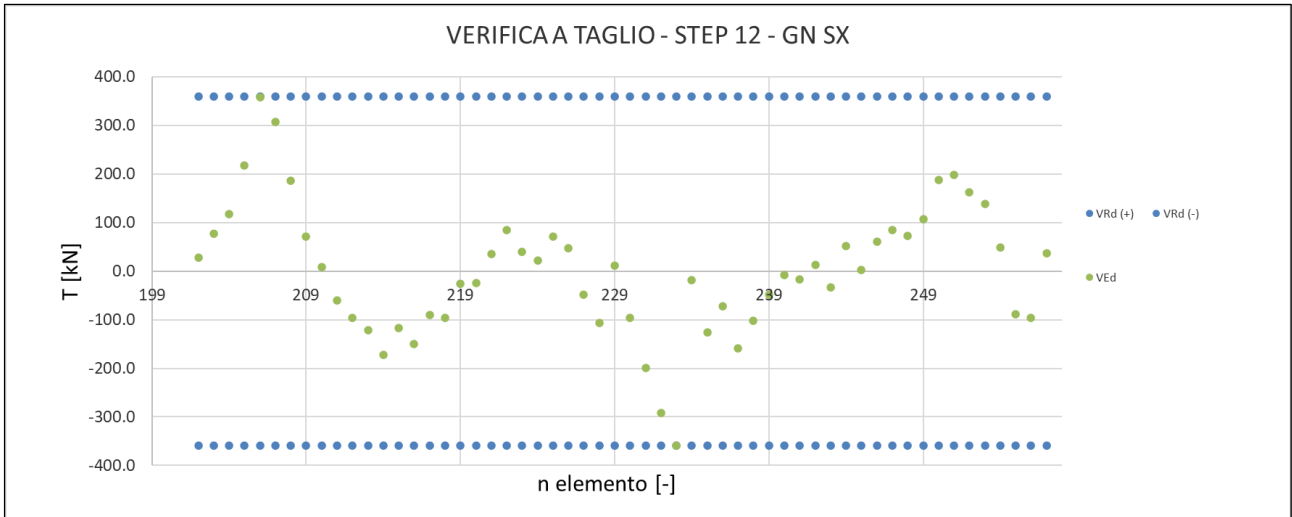
### 15.2.1.2 Verifiche a taglio

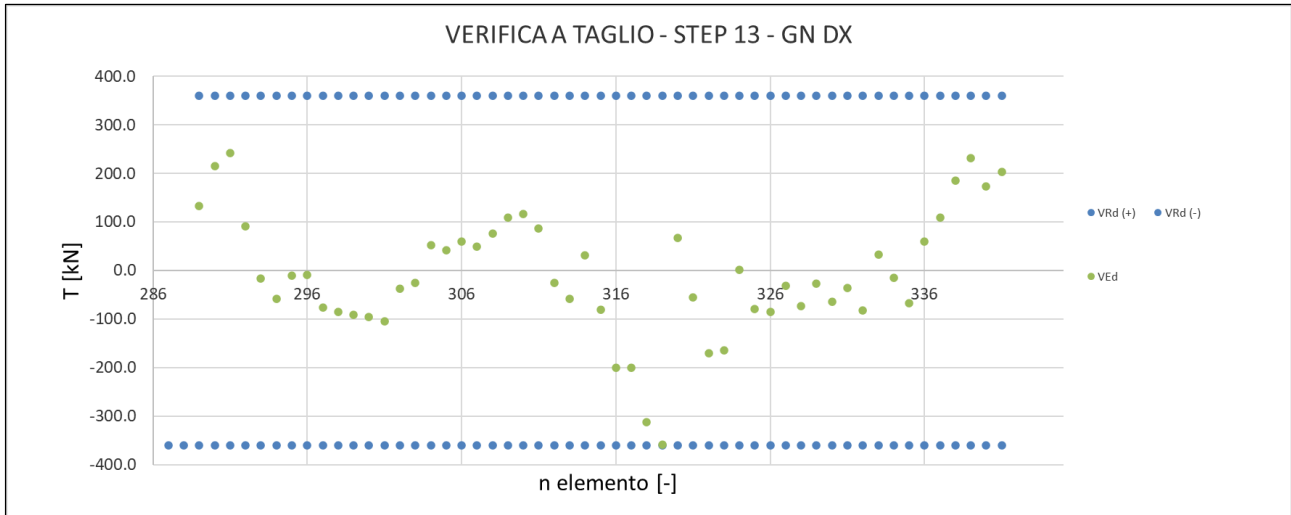
La verifica è stata svolta calcolando la resistenza  $V_{Rd}$  per sezioni non armate a taglio, mediante la formula di cui al Paragrafo 4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018.

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.









### 15.2.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

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

- Step 10 – Carico del terreno sul rivestimento definitivo delle Gallerie Naturali, installazione del rivestimento definitivo in calotta e piedritti nel Bypass
- Step 11 – Applicazione del carico di falda

#### 15.2.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni

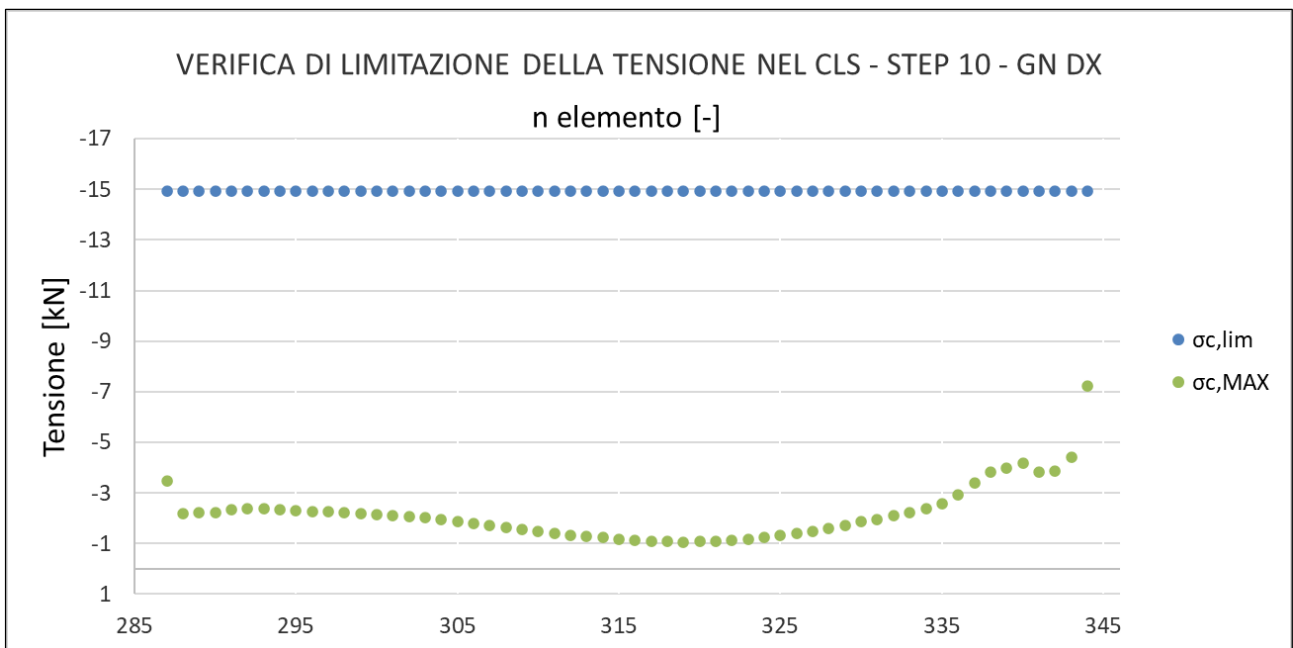
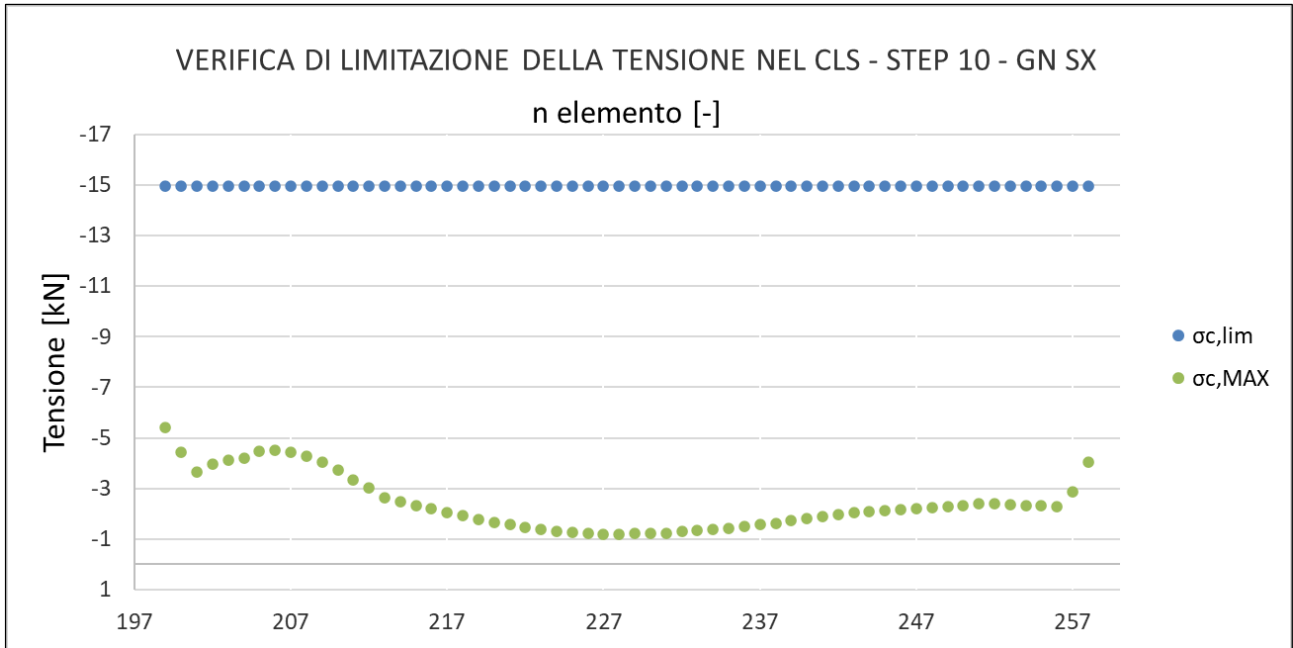
Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle sole tensioni nel calcestruzzo, trattandosi di sezioni non armate, secondo quanto prescritto al Paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC 2018. Per le sezioni non armate sottoposte a pressoflessione nel caso in cui una porzione dell'elemento sia sottoposto a trazione si fa riferimento alla sezione parzializzata. Il calcolo della sollecitazione massima avviene come segue

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

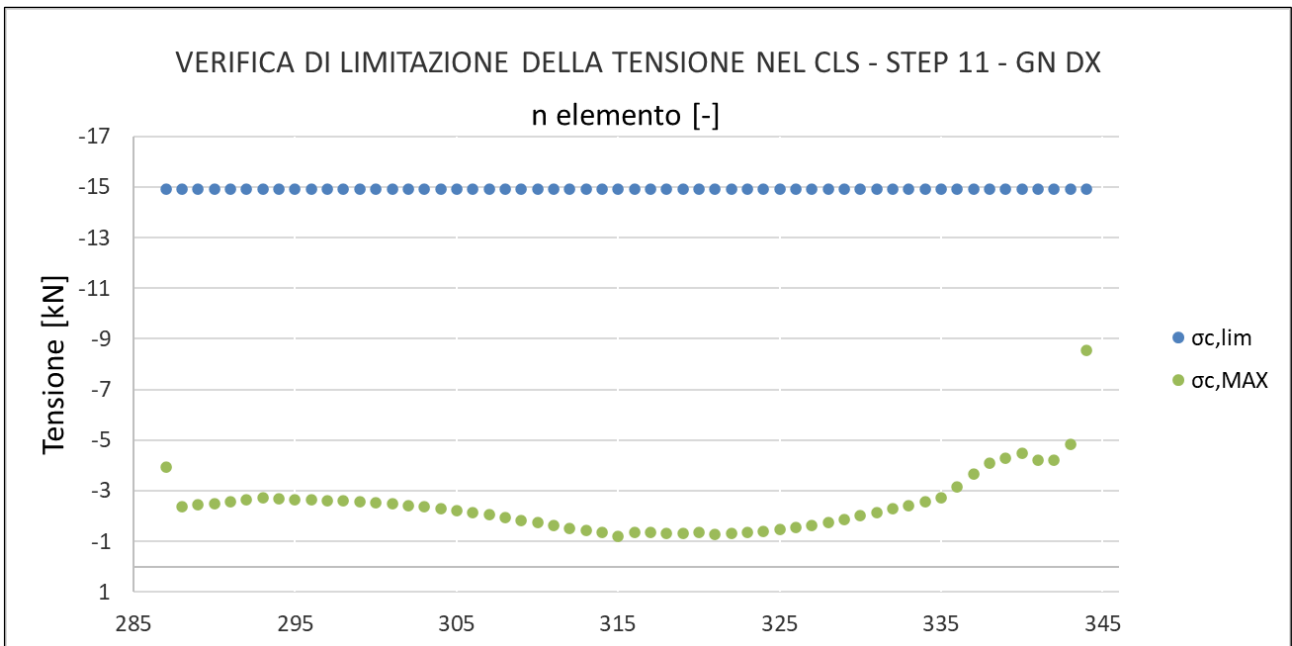
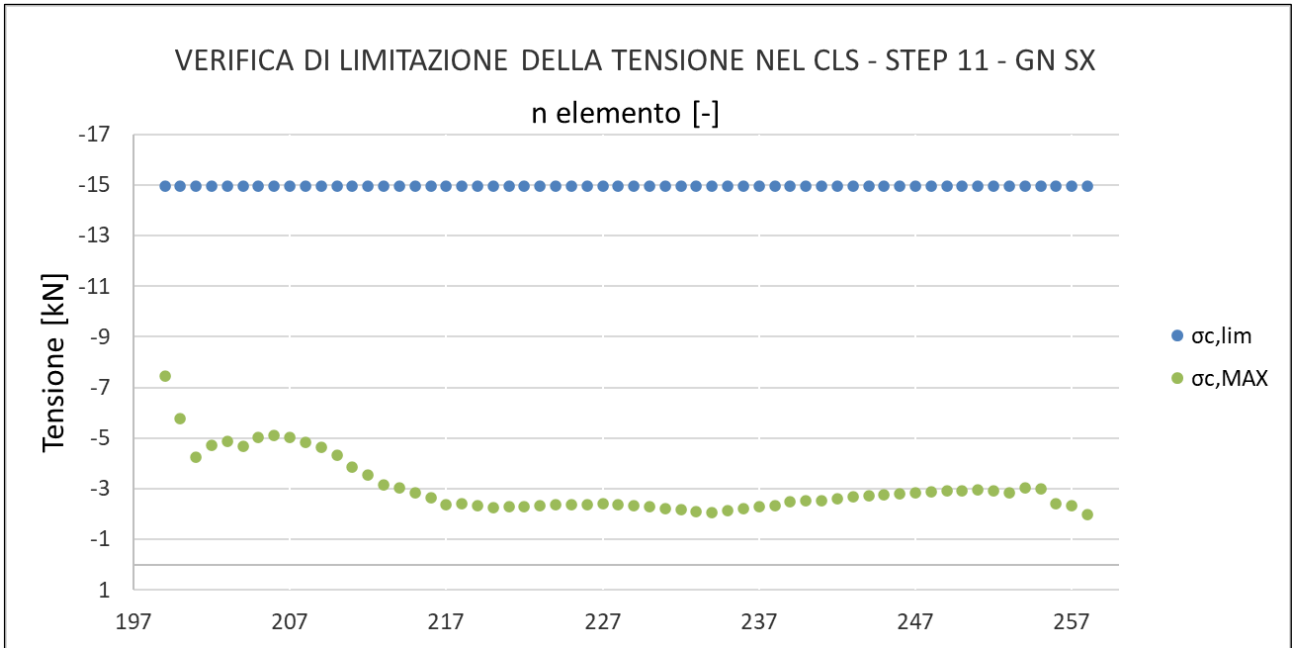
Dove  $u = h/2 - e$  e corrisponde alla lunghezza del nocciolo centrale d'inerzia della sezione parzializzata mentre  $b$  allo spessore della sezione (1 m).

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

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







### 15.3 Dimensionamento dell'architrave

Il dimensionamento dell'architrave si esegue a partire dalle sollecitazioni assiali più gravose nel rivestimento definitivo in corrispondenza dell'innesto, riportate in tabella

|     | STEP | N [kN] |
|-----|------|--------|
| SLU | 11   | 963    |
| SLE | 13   | 499    |

considerando la luce dell'architrave, pari a  $L = 4.5$  m le sollecitazioni all'incastro e in mezzeria risultano pari a

$$\begin{cases} M_{inc} = \frac{N \cdot L^2}{12} \\ V_{inc} = \frac{N \cdot L}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{mezz} = \frac{N \cdot L^2}{24} \\ V_{mezz} = 0 \end{cases}$$

| Posizione | M [kN/m] | V [kN] |
|-----------|----------|--------|
| Incastro  | 0        | 0      |
| Mezzeria  | 0        | 0      |

Le sollecitazioni sono verificate con le seguenti dimensioni e armature dell'architrave

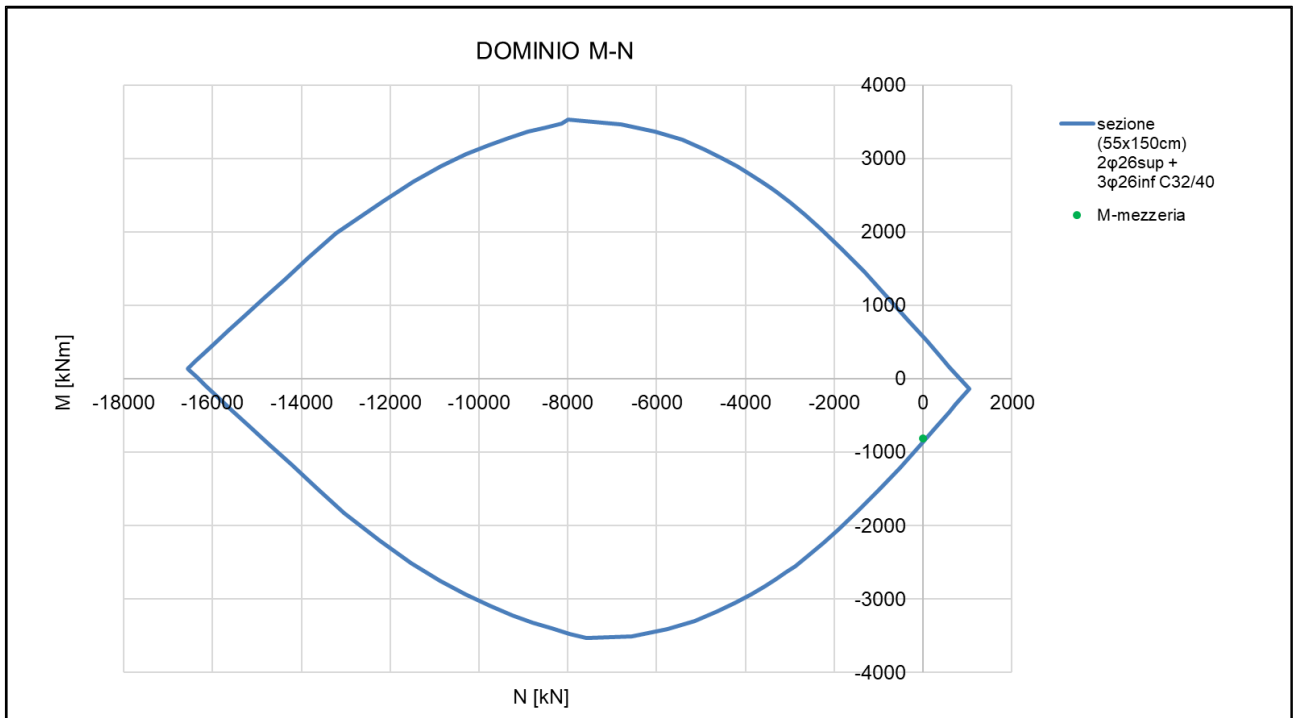
| Posizione | b x h  | Armatura         |                  |                     |
|-----------|--------|------------------|------------------|---------------------|
|           | [m]    | A <sub>sup</sub> | A <sub>inf</sub> | A <sub>taglio</sub> |
| Mezzeria  | 55x150 | 2φ26/20          | 3φ26/20          | 2φ12/25             |
| Incastro  | 55x350 | 2φ26/20          | 3φ26/20          | 2φ12/25             |

Vengono di seguito riportate le verifiche.

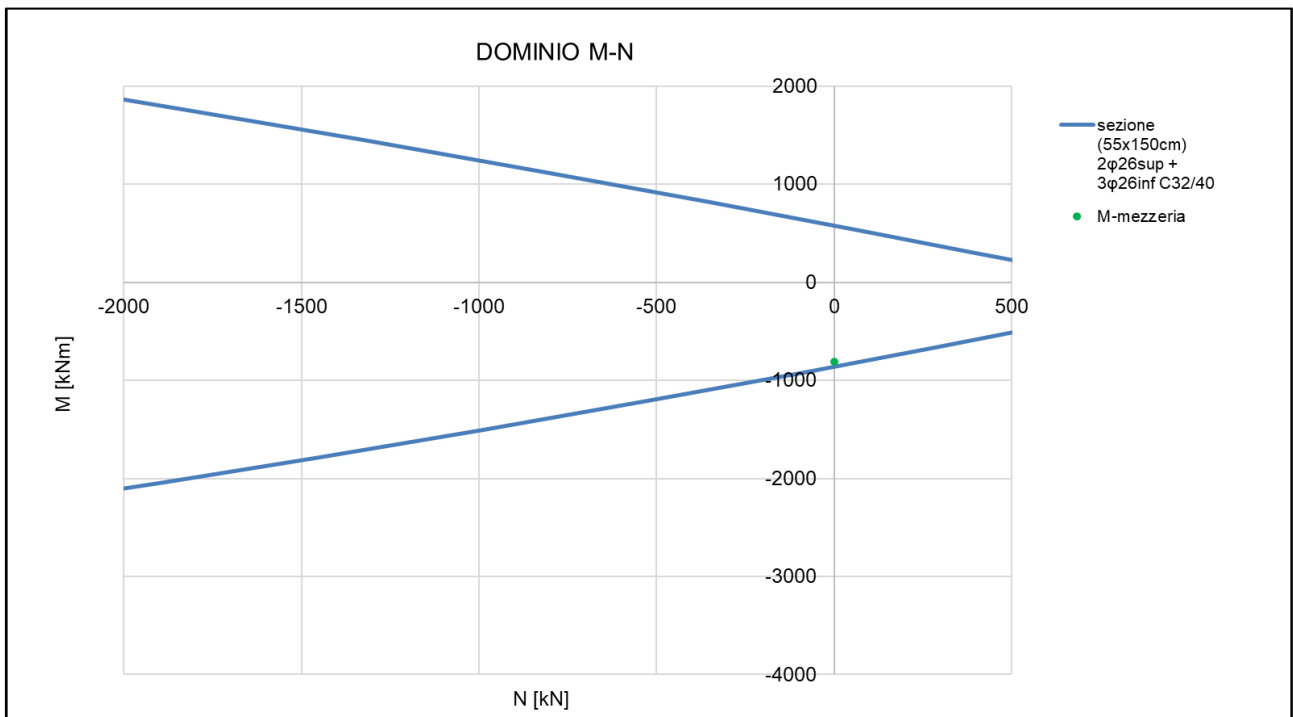
### 15.3.1 Verifiche a Stato Limite Ultimo

#### 15.3.1.1 Verifiche a pressoflessione

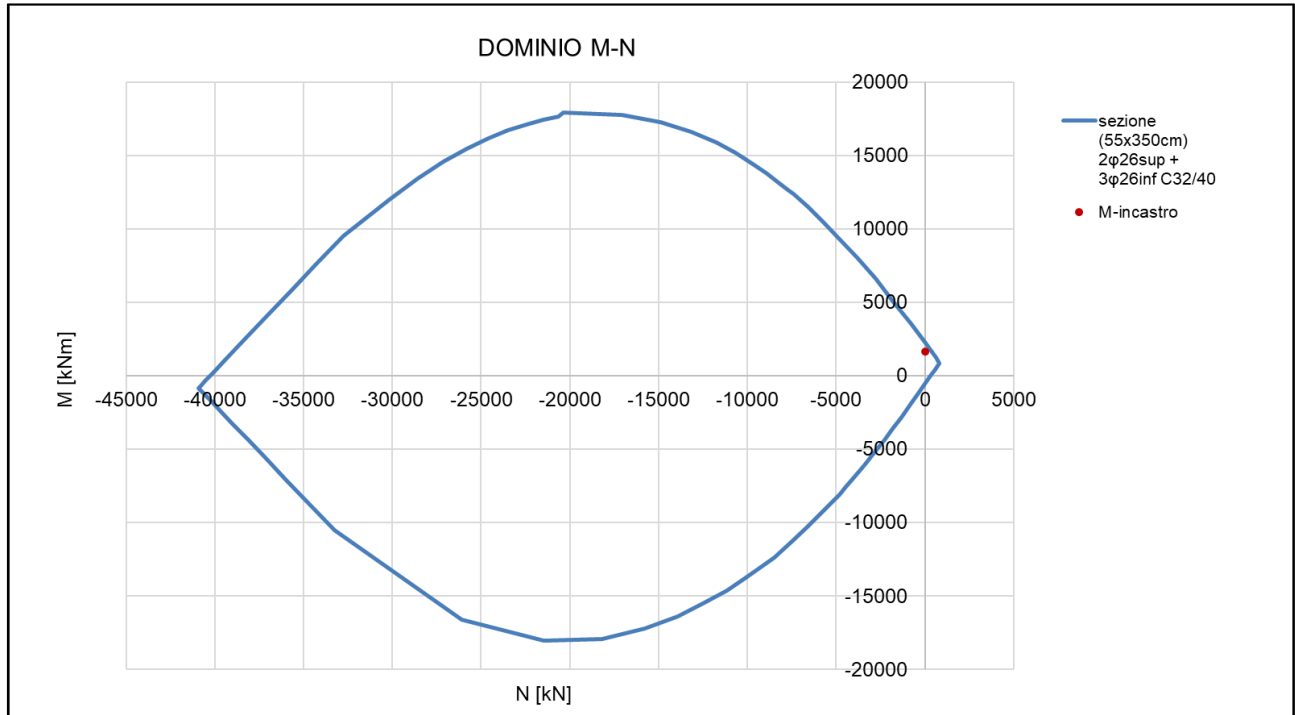
Mezzeria dell'architrave



Mezzeria dell'architrave, zoom



Incastro dell'architrave



### 15.3.1.2 Verifiche a taglio

| VERIFICATIONS UNDER BREAK DUE TO SHEARING STRESS                                       |   |
|--|---|
| <b>Material properties</b>   |   |
| Concrete characteristic cube strength  | $R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$                    |
| Concrete characteristic cylinder strength  | $f_{ck} = 33 \text{ N/mm}^2$                    |
| Concrete design compressive strength   | $f_{cd} = 18.81 \text{ N/mm}^2$                 |
| Structural steel tensile strength  | $f_{yd} = 391.30 \text{ N/mm}^2$                |
| <b>Design forces and moments (S.L.U.):</b>   |   |
| Design shear force   | $V_{Ed} = 2167.09 \text{ kN}$                   |
| Design axial force corresponding to $V_{Ed}$   | $N(V_{Ed}) = 0.00 \text{ kN}$                   |
| Design bending moment corresponding to $V_{Ed}$  | $M(V_{Ed}) = 0.00 \text{ kNm}$                  |
| <b>Section geometry</b>  |   |
| Depth from rebar centroid to extreme compression fiber                                 | $d = 3482 \text{ mm}$                           |
| Section width (minimum)  | $b_w = 550 \text{ mm}$                          |
| <b>Section reinforcement (subject to tensile stress):</b>                              |   |
| Rebar diameter   | $\varnothing = 0 \text{ mm}$                    |
| Number of rebars in longitudinal reinforcement   | $n = 4$   |
| Area of longitudinal reinforcement subject to tensile stress                           | $A_{sl} = 0 \text{ mm}^2$                       |
| Longitudinal reinforcement ratio $\rho_s (\leq 0.02)$                                  | $\rho_l = 0.0000$                               |
| VERIFICATION WITHOUT TRANSVERSAL REINFORCEMENT (§ 4.1.2.1.3.1)                         |   |
| Factor dependent on d  | $k = 1.24$                                      |
| Stress dependent on k and concrete strength  | $v_{min} = 0.28 \text{ N/mm}^2$                 |
| Section mean compressive stress ( $\leq 0.2 \times f_{cd}$ )                           | $\sigma_{cp} = 0.00 \text{ N/mm}^2$             |
| Minimum ultimate shear strength  | $V_{Rd,min} = 533.07 \text{ kN}$                |
| <b>Ultimate shear strength (<math>V_{Rd} \geq V_{Rd,min}</math>)</b>                   | <b><math>V_{Rd} = 533.07 \text{ kN}</math></b>  |
| <b>NEGATIVE VERIFICATION RESULT:</b><br><b>transversal shear reinforcement needed.</b> |   |
| VERIFICATION WITH TRANSVERSAL REINFORCEMENT (§ 4.1.2.1.3.1)                            |   |
| <b>Transversal reinforcement for shear strength:</b>                                   |   |
| Angle between stirrups and structural element axis                                     | $\alpha = 90^\circ$                             |
| Transversal reinforcement rebar diameter   | $\varnothing_{sw} = 12 \text{ mm}$              |
| Number of stirrup edges in transversal section   | $n_{sw} = 2$                                    |
| Distance between two stirrups along structural element axis                            | $s = 250 \text{ mm}$                            |
| Total area of transversal shear reinforcement  | $A_{sw} = 226 \text{ mm}^2$                     |
| <b>Compressive strength factors:</b>   |   |
| Concrete rafter inclination angle  | $\theta = 22^\circ$                             |
| Concrete reduced compressive strength  | $f'_{cd} = 9.41 \text{ N/mm}^2$                 |
| Section mean compressive stress  | $\sigma_{cp} = 0.00 \text{ N/mm}^2$             |
| Increasing factor for elements subject to compressive stress                           | $\alpha_c = 1.00$                               |
| Reinforcement "shear-tensile" design strength  | $V_{Rsd} = 2743.75 \text{ kN}$                  |
| Concrete "shear-compressive" design strength   | $V_{Rcd} = 5631.33 \text{ kN}$                  |
| <b>Ultimate shear strength</b>   | <b><math>V_{Rd} = 2743.75 \text{ kN}</math></b> |
| <b>POSITIVE VERIFICATION RESULT.</b>   |   |

### 15.3.2 Verifiche a Stato Limite di Esercizio

Di seguito si riportano, in formato grafico, le verifiche di limitazione delle sole tensioni nel calcestruzzo, trattandosi di sezioni non armate, 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).

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

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

| STRESS CHARACTERISTICS SLS  |                                 |                      | INCASTRO  | MEZZERIA  |
|---|---------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
| Design value of Axial Force   | $N_{Sd}$                        | [kN]                 | 0         | 0         |
| Design value of Bending Moment  | $M_{Sd}$                        | [kNm]                | 843       | -420      |
| Design value of Shear Force   | $T_{Sd}$                        | [kN]                 | 0.00      | 0.00      |
| STRESS LIMITATION SERVICEABILITY LIMIT STATE  |                                 |                      | INCASTRO  | MEZZERIA  |
| Overall depth of the cross section  | $h$                             | [mm]                 | 3500      | 1500      |
| Minimum width of the cross section in the tensile area  | $b_w$                           | [mm]                 | 550       | 550       |
| Effective depth of the cross section  | $d$                             | [mm]                 | 3437.0    | 1437.0    |
| Neutral axis depth  | $x$                             | [mm]                 | 776.7     | 395.8     |
| Maximum concrete stress (- = compression)   | $\sigma_c$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | -0.53     | -0.81     |
| Minimum concrete stress (- = compression)   | $\sigma_{c1}$                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0.00      | 0.00      |
| Maximum steel stress (+ = tension)  | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 17.92     | 18.47     |
| Minimum steel stress (+ = tension)  | $\sigma_{s1}$                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0.00      | 0.00      |
| Concrete limit stress   | $\sigma_{c,lim}$                | [N/mm <sup>2</sup> ] | -14.94    | -14.94    |
| Steel limit stress  | $\sigma_{s,lim}$                | [N/mm <sup>2</sup> ] | 360.00    | 360.00    |
| <b>VERIFICATION RESULT</b>  |                                 |                      | <b>OK</b> | <b>OK</b> |
| STRESS LIMITATION SERVICEABILITY LIMIT STATE  |                                 |                      | INCASTRO  | MEZZERIA  |
| Characteristic compressive cylinder strength of concrete at 28 days                           | $f_{ck}$                        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 33.20     | 33.20     |
| Mean value of axial tensile strength of concrete ( $=0.3f_{ck}^{2/3}$ per $C \leq C50/60$ )   | $f_{ctm}$                       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3.099     | 3.099     |
| Characteristic axial tensile strength of concrete ( $=0.7f_{ctm}$ )                           | $f_{ctk}$                       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2.169     | 2.169     |
| Partial factor of concrete  | $\gamma_c$                      | [-]                  | 1.000     | 1.000     |
| Design tensile resistance of concrete   | $f_{ctd}$                       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2.169     | 2.169     |
| Main value of tensile strength of the concrete in the effective tension area ( $f_{ct,eff}$ ) | $f_{ct,eff}$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3.099     | 3.099     |
| Elastic modulus of reinforcing steel  | $E_s$                           | [N/mm <sup>2</sup> ] | 210000    | 210000    |
| Secant elastic modulus of concrete  | $E_{cm}$                        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 32588     | 32000     |
| $= E_s/E_{cm}$  | $\alpha_e$                      | [-]                  | 6.44      | 6.56      |
| Factor depending on the duration of the load (0.60: short term - 0.40: long term)             | $k_t$                           | [-]                  | 0.40      | 0.40      |
| Effective tension area of concrete  | $A_{c,eff}$                     | [mm <sup>2</sup> ]   | 86625     | 86625     |
| Number of rebar in tension area   | $n_l$                           | [-]                  | 5.0       | 6.7       |
| Rebar main diameter   | $\phi_l$                        | [mm]                 | 20        | 16        |
| Cross section area of reinforcement in $A_{c,eff}$  | $A_{sl}$                        | [mm <sup>2</sup> ]   | 1571      | 1340      |
| $= A_s/A_{c,eff}$   | $\rho_{p,eff}$                  | [-]                  | 0.0181    | 0.0155    |
| Main strain   | $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ | ‰                    | 0.051     | 0.053     |
| Rebar cover   | $c$                             | [mm]                 | 50        | 60        |
| Rebar spacing   | $s$                             | [mm]                 | 200       | 150       |
| Bond factor (0.80: high bond bars - 1.60: plain bars)   | $k_1$                           | [-]                  | 0.80      | 0.80      |
| Factor which takes account of the distribution of strain (0.50 bending - 1.00 tension)        | $k_2$                           | [-]                  | 0.50      | 0.50      |
| Coefficient for $S_{r,max}$   | $k_3$                           | [-]                  | 3.40      | 3.40      |
| Coefficient for $S_{r,max}$   | $k_4$                           | [-]                  | 0.425     | 0.425     |
| Maximum crack spacing   | $S_{r,max}$                     | [mm]                 | 357.50    | 379.78    |
| Crack width   | $w_k$                           | [mm]                 | 0.018     | 0.020     |
| Crack width limit   | $w_{lim}$                       | [mm]                 | 0.300     | 0.300     |
| <b>VERIFICATION RESULT</b>  |                                 |                      | <b>OK</b> | <b>OK</b> |

**RTP di progettazione:**

**Mandataria:**



**Mandanti:**



**sinergo**