

# AUTOSTRADA VALDASTICO

## A31 NORD

### 1° LOTTO

### Piovene Rocchette - Valle dell'Astico

## PROGETTO DEFINITIVO

CUP G21B1 30006 60005  
WBS B25.A31N.L1  
COMMESSA J16L1

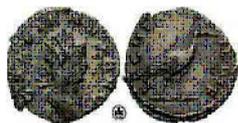
#### COMMITTENTE



S.p.A. AUTOSTRADA BRESCIA VERONA VICENZA PADOVA  
Area Costruzioni Autostradali

CAPO COMMESSA  
PER LA PROGETTAZIONE  
Dott. Ing. Gabriella Costantini

PRESTATORE DI SERVIZI:  
**CONSORZIO RAETIA**



RAPPRESENTANTE: Dott. Ing. Alberto Scotti

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE  
TRA LE PROVAZIONI SPECIALISTICHE:  
Technita S.p.A. - Dott. Ing. Andrea Renso



PROGETTAZIONE:

**ROCKSOIL** S.p.A.

Il Responsabile  
Dott. Ing. Giovanni Cassani



ELABORATO: **OPERE D'ARTE MAGGIORI**  
**OPERE IN SOTTERANEO**  
**GALLERIA S. PIETRO**  
**GALLERIE ARTIFICIALI E PORTALI - RELAZIONE DI CALCOLO**

Progressivo Rev.  
**07 02 06 002 02**

Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Controllo	Approvazione	SCALA: --
00	MARZO 2017	PRIMA EMISSIONE	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	NOME FILE: J16L1_07_02_06_002_0101_OPD_02.doc
01	GIUGNO 2017	REVISIONE PER VERIFICA	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	CM. PROGR. FG. LIV. REV. J16L1_07_02_06_002_0101_OPD_02
02	LUGLIO 2017	RECEPIMENTO OSSERVAZIONI	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	

**AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD**  
**1° LOTTO**  
**PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL’ASTICO**

*Committente:*



*Progettazione:*

CONSORZIO RAETIA



**PROGETTO DEFINITIVO**

RELAZIONE TECNICA

Opere in sotterraneo

Galleria San Pietro

Gallerie artificiali e portali - Relazione di calcolo

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>SOFTWARE UTILIZZATI</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>FLAC 8.0</b>	<b>12</b>
3.1.1	<i>Analisi alle differenze finite</i>	12
3.1.2	<i>Leggi di comportamento e parametri del materiale</i>	13
3.1.3	<i>Rivestimento</i>	14
<b>4</b>	<b>DESCRIZIONE DELL’INTERVENTO</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Imbocco sud</b>	<b>15</b>
4.1.1	<i>Fasi esecutive</i>	16
<b>4.2</b>	<b>Imbocco nord</b>	<b>16</b>
4.2.1	<i>Fasi esecutive</i>	17
<b>5</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</b>	<b>20</b>
<b>6.1</b>	<b>RESISTENZA DEI MATERIALI</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI</b>	<b>21</b>
<b>7.1</b>	<b>SPINTA DEL TERRENO</b>	<b>21</b>
<b>7.2</b>	<b>CARICO IDRAULICO</b>	<b>21</b>
<b>7.3</b>	<b>CARICO SISMICO</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>CRITERI DI VERIFICA</b>	<b>24</b>
<b>8.1</b>	<b>Stati limite ultimi (S.L.U.)</b>	<b>24</b>
8.1.1	<i>Verifica a Pressoflessione</i>	25
8.1.2	<i>Verifica al Taglio</i>	26
<b>8.2</b>	<b>Stati limite di esercizio (S.L.E.)</b>	<b>27</b>
8.2.1	<i>Verifica a Fessurazione</i>	28
	Stato limite di apertura delle fessure	28
<b>9</b>	<b>ANALISI NUMERICHE</b>	<b>30</b>
<b>9.1</b>	<b>FASI DI CALCOLO</b>	<b>30</b>
<b>9.2</b>	<b>PARAMETRI GEOTECNICI</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>MODELLO 1 – GA asim - sud</b>	<b>38</b>
<b>10.1</b>	<b>Palificata</b>	<b>38</b>
<b>10.2</b>	<b>Spostamenti</b>	<b>39</b>

<b>10.3</b>	<b>Verifiche a pressoflessione</b>	<b>39</b>
10.3.1	<i>Stato Limite Ultimo</i>	42
10.3.2	<i>Stato Limite di Esercizio</i>	45
<b>10.4</b>	<b>Verifiche a taglio</b>	<b>47</b>
<b>10.5</b>	<b>Veletta</b>	<b>49</b>
<b>11</b>	<b>MODELLO 2 – GA asim - nord</b>	<b>51</b>
11.1	<b>Palificata</b>	<b>51</b>
11.2	<b>Spostamenti</b>	<b>51</b>
11.3	<b>Verifiche a pressoflessione</b>	<b>52</b>
11.3.1	<i>Stato Limite Ultimo</i>	55
11.3.2	<i>Stato Limite di Esercizio</i>	58
11.4	<b>Verifiche a taglio</b>	<b>60</b>
11.5	<b>Veletta</b>	<b>62</b>
<b>12</b>	<b>VERIFICA AL FUOCO</b>	<b>64</b>
12.1	<b>Software di calcolo</b>	<b>65</b>
12.2	<b>Schematizzazione del problema</b>	<b>66</b>
12.3	<b>Proprietà termiche dei materiali</b>	<b>68</b>
12.4	<b>Output del programma</b>	<b>72</b>
12.5	<b>Verifica strutturale</b>	<b>73</b>
<b>13</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>75</b>
	<b>ALLEGATI</b>	<b>77</b>
13.1	<b>MODELLO 1 – GA asim sud</b>	<b>77</b>
13.2	<b>MODELLO 2 – GA asim nord</b>	<b>96</b>

### Indice delle tabelle

Tabella 1: Carico sismico SLV – Modello 1 – GA .....	33
Tabella 2: Carico sismico SLD – Modello 1 – GA .....	33
Tabella 3: Carico sismico SLV – Modello 2 – GA .....	34
Tabella 4: Carico sismico SLD – Modello 2 – GA .....	34
Tabella 5: Stratigrafia per San Pietro .....	35
Tabella 6: Spostamento verticale [mm] .....	39
Tabella 7: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3 .....	42
Tabella 8: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4 .....	43
Tabella 9: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5 .....	44

Tabella 10: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3 .....	46
Tabella 11: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4 .....	46
Tabella 12: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b .....	47
Tabella 13: Verifica a taglio – Step 3 .....	47
Tabella 14: Verifica a taglio – Step 3 – con spilli.....	47
Tabella 15: Verifica a taglio – Step 4 .....	48
Tabella 16: Verifica a taglio – Step 4 – con spilli.....	48
Tabella 17: Verifica a taglio – Step 5 .....	48
Tabella 18: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli.....	48
Tabella 19: Verifica a taglio .....	49
Tabella 20: Spostamento verticale [mm] .....	52
Tabella 21: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3.....	55
Tabella 22: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4.....	56
Tabella 23: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5.....	57
Tabella 24: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3 .....	59
Tabella 25: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4 .....	59
Tabella 26: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b .....	60
Tabella 27: Verifica a taglio – Step 3 .....	60
Tabella 28: Verifica a taglio – Step 3 – con spilli.....	60
Tabella 29: Verifica a taglio – Step 4 .....	61
Tabella 30: Verifica a taglio – Step 4 – con spilli.....	61
Tabella 31: Verifica a taglio – Step 5 .....	61
Tabella 32: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli.....	62
Tabella 33: Verifica a taglio .....	63
Tabella 34: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria .....	66
Tabella 35 – Analisi al fuoco – Modello 2 .....	74

### **Indice delle figure**

<b>Figura 1 - Planimetria imbocco sud .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2 - Profili imbocco sud .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3 - Planimetria imbocco nord .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 4 - Profili imbocco nord.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 7 - Galleria artificiale.....</b>	<b>15</b>

Figura 8 - Dima + Galleria artificiale .....	16
Figura 9 - Galleria artificiale.....	17
Figura 10 - Stratigrafia imbocco San Pietro sud .....	18
Figura 11 - Stratigrafia imbocco San Pietro nord .....	19
Figura 12 - Definizione del carico sismico .....	32
Figura 13 - Modello “GA asim -sud” .....	35
Figura 14 - Modello “GA asim - sud” - particolare .....	36
Figura 15 - Modello “GA asim - nord” .....	36
Figura 16 - Modello “GA asim - nord” - particolare .....	37
Figura 17 - Comportamento della palificata .....	38
Figura 18 - Diagrammi N e M – Step 3.....	40
Figura 19 - Diagrammi N e M – Step 4.....	40
Figura 20 - Diagrammi N e M – Step 5.....	41
Figura 21 - Diagrammi N e M – Step 5.....	41
Figura 22 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3 .....	43
Figura 23 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4 .....	44
Figura 24 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5 .....	45
Figura 25 - Pressione del terreno sulla veletta .....	49
Figura 26 - Verifica a pressoflessione SLU .....	50
Figura 27 - Verifica a pressoflessione SLE.....	50
Figura 28 - Comportamento della palificata .....	51
Figura 29 - Diagrammi N e M – Step 3.....	53
Figura 30 - Diagrammi N e M – Step 4.....	53
Figura 31 - Diagrammi N e M – Step 5.....	54
Figura 32 - Diagrammi N e M – Step 5b.....	54
Figura 33 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3 .....	56
Figura 34 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4 .....	57
Figura 35 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5 .....	58
Figura 36 - Pressione del terreno sulla veletta .....	62
Figura 37 - Verifica a pressoflessione SLU .....	63
Figura 38 - Verifica a pressoflessione SLE.....	63
Figura 39 – Sezione di calcolo – Modello 2 .....	67
Figura 40 – Mesh di calcolo –Modello 2.....	67
Figura 41 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7) .....	68
Figura 42 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a) .....	69

<b>Figura 43 –Fattore di riduzione del valore di resistenza <math>f_{ck}</math> per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)</b> .....	69
<b>Figura 44 –Fattore di riduzione del valore di <math>\epsilon_{c1}</math> per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)</b> .....	70
<b>Figura 45 – Fattore di riduzione del valore di <math>\epsilon_{cu}</math> per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)</b> .....	70
<b>Figura 46 – Fattore di riduzione del valore di resistenza <math>f_{yk}</math> per le barre d’armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)</b> .....	71
<b>Figura 47 – Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d’armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)</b> .....	71
<b>Figura 48 – Analisi termica – Modello 2</b> .....	73
<b>Figura 49 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato”</b> .....	76

## 1 INTRODUZIONE

Oggetto della presente Relazione di Calcolo sono le gallerie artificiali previste per la realizzazione degli imbocchi della galleria “San Pietro”, nell’ambito del Progetto Definitivo dell’Autostrada A 31 Nord Trento Rovigo – Tronco Trento - Valdastico – Piovene Rocchette.

All’imbocco sud, le 2 gallerie artificiali si sviluppano parietalmente al versante per 15 m in canna nord e 22m in canna sud, più 5 m di concio d’attacco su entrambe le canne.

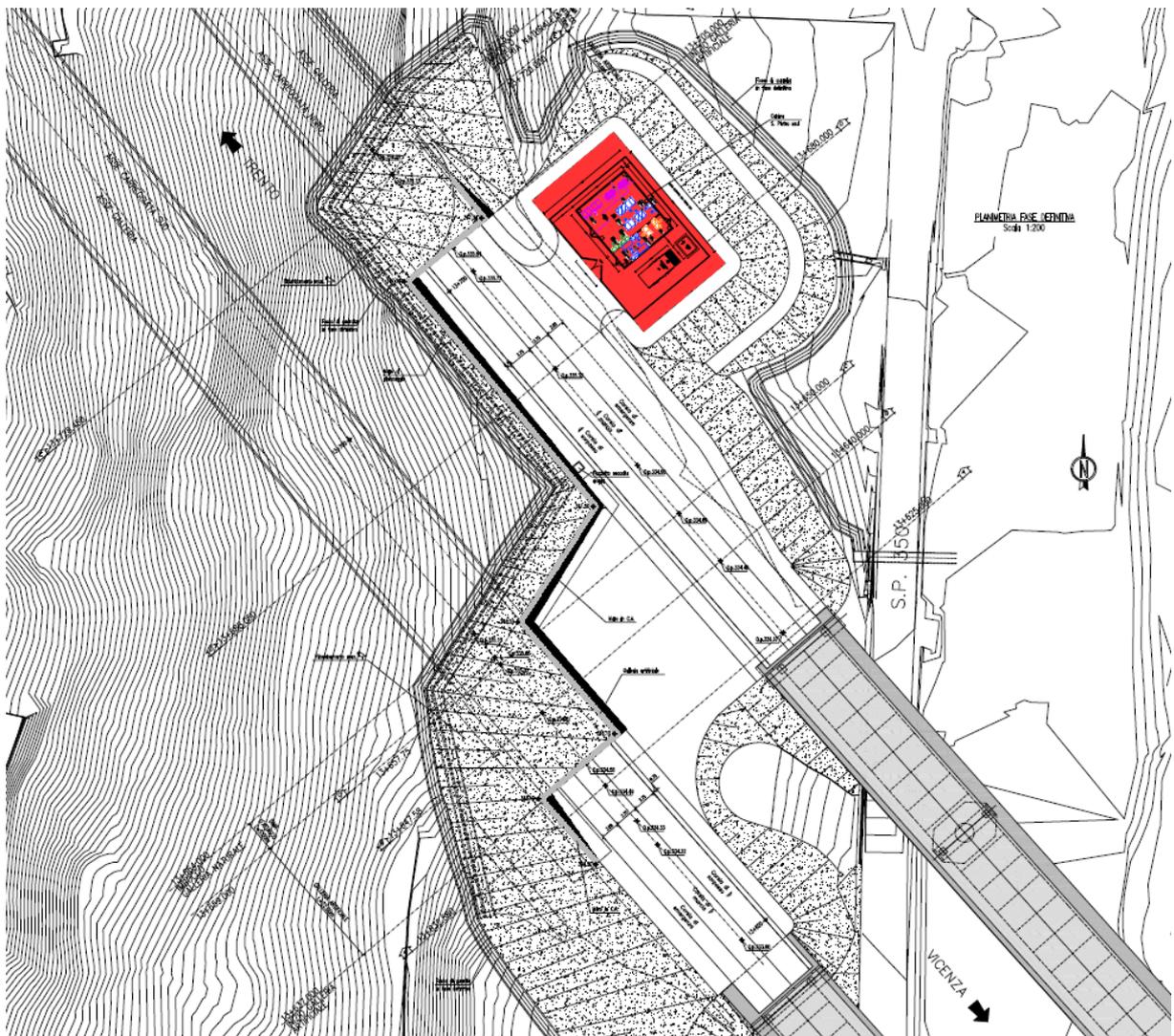
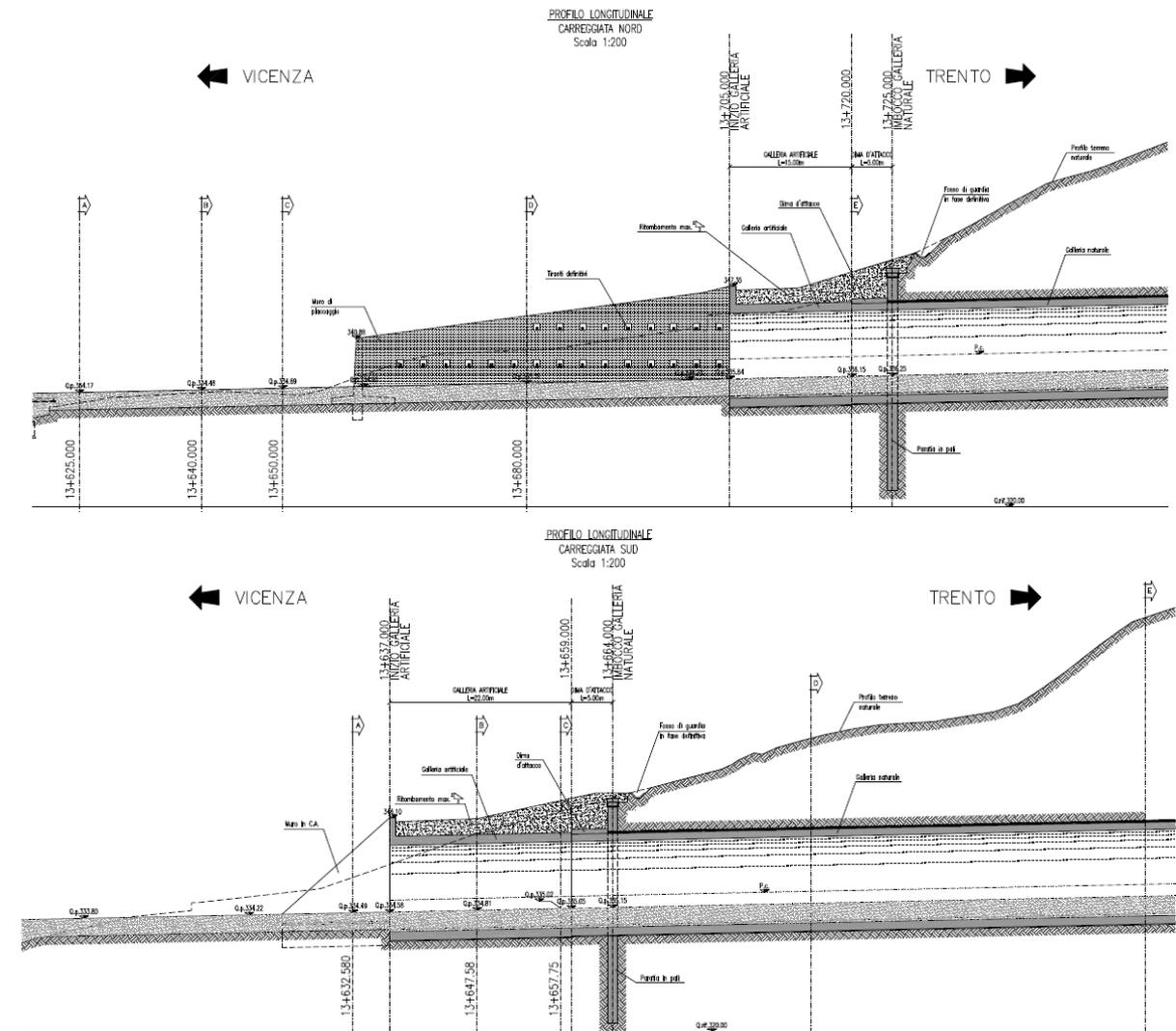


Figura 1 - Planimetria imbocco sud

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

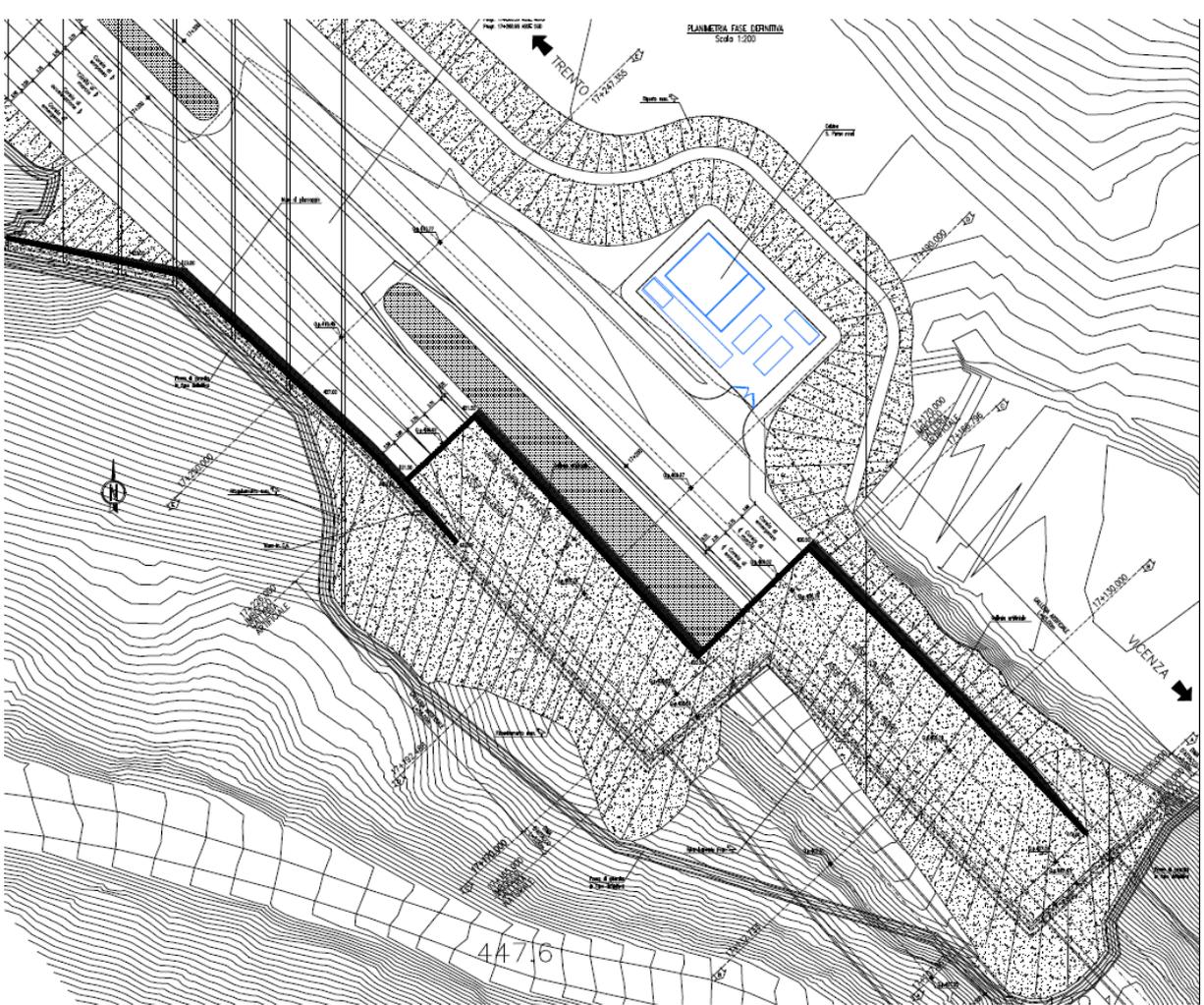


**Figura 2 - Profili imbocco sud**

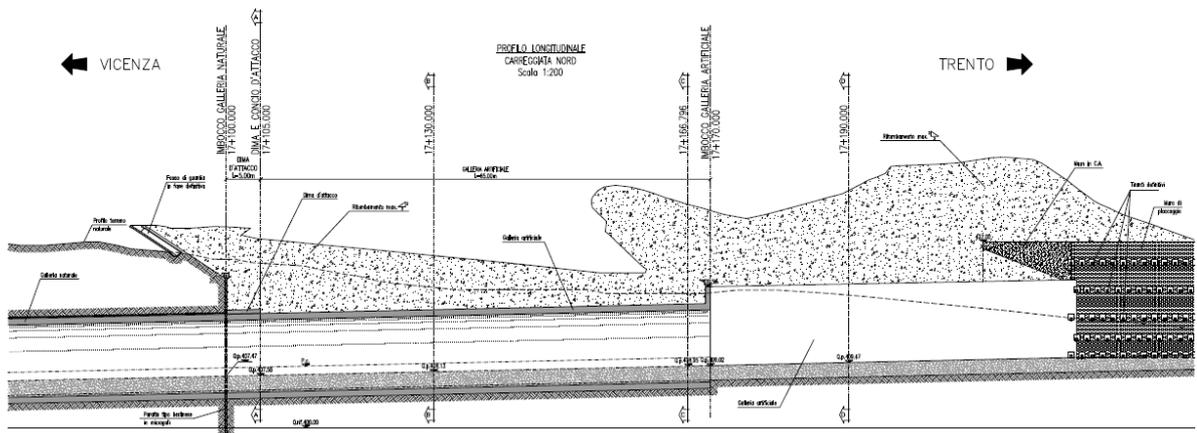
All'imbocco nord, le 2 gallerie artificiali si sviluppano parietalmente al versante per 65 m in canna nord e 55 m in canna sud, più 5 m di concio d'attacco su entrambe le canne.

Lo scavo in naturale della canna sud intercetta una fila di tiranti della paratia a carattere provvisorio tra le due gallerie. Per assicurare la stabilità del versante, la realizzazione della galleria artificiale in canna nord ed il relativo ritombamento devono essere completati prima della partenza dello scavo in naturale della canna sud.

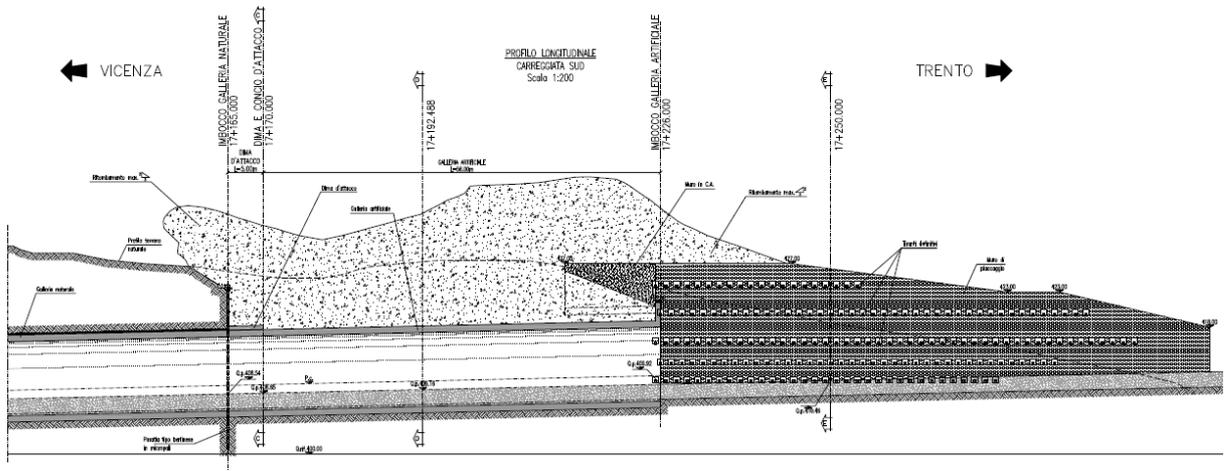
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



**Figura 3 - Planimetria imbocco nord**



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



**Figura 4 - Profili imbocco nord**

Nel seguito vengono descritte in dettaglio le fasi esecutive per la realizzazione delle opere, si forniscono le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati e si riportano i risultati delle verifiche statiche condotte.

## **2   NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Le verifiche statiche degli interventi, la redazione della presente relazione e degli elaborati tecnici allegati sono state effettuate nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune Raccomandazioni.

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- D.M. 14/01/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” (pubblicato sulla G.U. n.29 – Suppl. Ordinario n.30 – del 4 febbraio 2008);
- EC2\_UNI-ENV-1992: “Progettazione Strutture in c.a.”;
- EC3\_UNI-ENV-1993: “Progettazione delle strutture in acciaio”;
- EC7\_UNI-ENV-1997: “Progettazione geotecnica”;
- EC8\_UNI-ENV-1998: “Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture”;
- Ancoraggi nei Terreni e nelle Rocce, Raccomandazioni AGI-AICAP, AGI, Roma, 2012;
- UNI-EN 1537, Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Tiranti di ancoraggio;
- Circolare 617 – 2/2/2009.

### 3 SOFTWARE UTILIZZATI

Nella presente relazione di calcolo si è fatto uso dei seguenti codici di calcolo:

- FLAC 8.0. Programma per il calcolo dell’interazione opere-terreno.

#### 3.1 FLAC 8.0

Le analisi tenso-deformative, presentate nel seguito, sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 8.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L’algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato “esplicito per integrazione diretta nel tempo” (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l’invertibilità di matrici). L’adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l’approccio di Wilkins M.L..

##### 3.1.1 Analisi alle differenze finite

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatera, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E’ allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

Ad un certo istante  $t$  può assumersi una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u'_{i+1,j} - u'_{i,j}}{\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u'_{i+1,j} - u'_{i-1,j}}{2\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u'_{i,j} - u'_{i-1,j}}{\Delta x}.$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad  $y$ , e per le derivate di ordine superiore. La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “esplicito condizionatamente stabile”, la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa  $m$ , la risultante delle forze esterne  $F_e$  (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne  $F_i$ , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo  $F_u$  (unbalanced force  $F_u = F_e - F_i$ );
- per ogni gridpoint si scrive l’equazione di Newton  $F_u = m \cdot a$ , tramite la quale è possibile determinare l’accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l’accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la  $F_u$ , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.

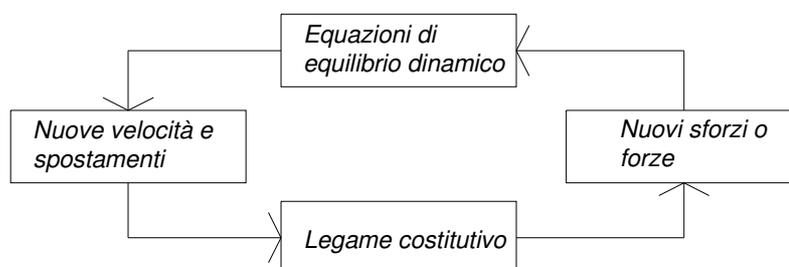


Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

### 3.1.2 Leggi di comportamento e parametri del materiale

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastico-perfettamente plastico basato sul criterio di rottura di Mohr-Coulomb, con legge di flusso associata.

La funzione di plasticizzazione  $F$  definita dal criterio di rottura consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite al di sotto del quale il materiale mantiene un comportamento elastico e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da

comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso.

Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

Tale criterio è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare avente, come asse, la trisettrice del primo ottante:

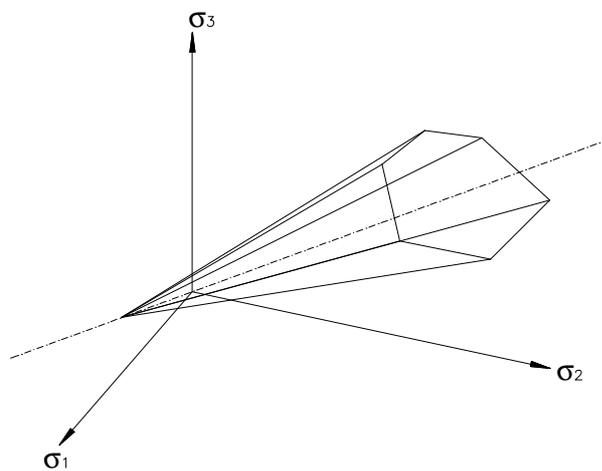


Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni

### 3.1.3 Rivestimento

I rivestimenti sono stati simulati tramite l'attivazione di zone con caratteristiche strutturali assimilabili a quelle del calcestruzzo, come meglio descritto nel seguito, e con legge costitutiva elastico lineare.

#### 4 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Nel seguito si fornisce una descrizione delle gallerie artificiali e le relative fasi esecutive; per ulteriori informazioni si rimanda agli appositi elaborati grafici.

##### 4.1 Imbocco sud

Nella zona di imbocco è prevista la realizzazione di una galleria artificiale (22 m in canna sud e 15 m in canna nord) in calcestruzzo C28/35, con arco rovescio di spessore minimo pari a 1.1 m e calotta di spessore minimo pari a 1.1 m. A contatto con la paratia è prevista una dima d'attacco a protezione temporanea degli scavi e la sezione del rivestimento definitivo si riduce a 0.9 m in calotta e a 1 m in arco rovescio.

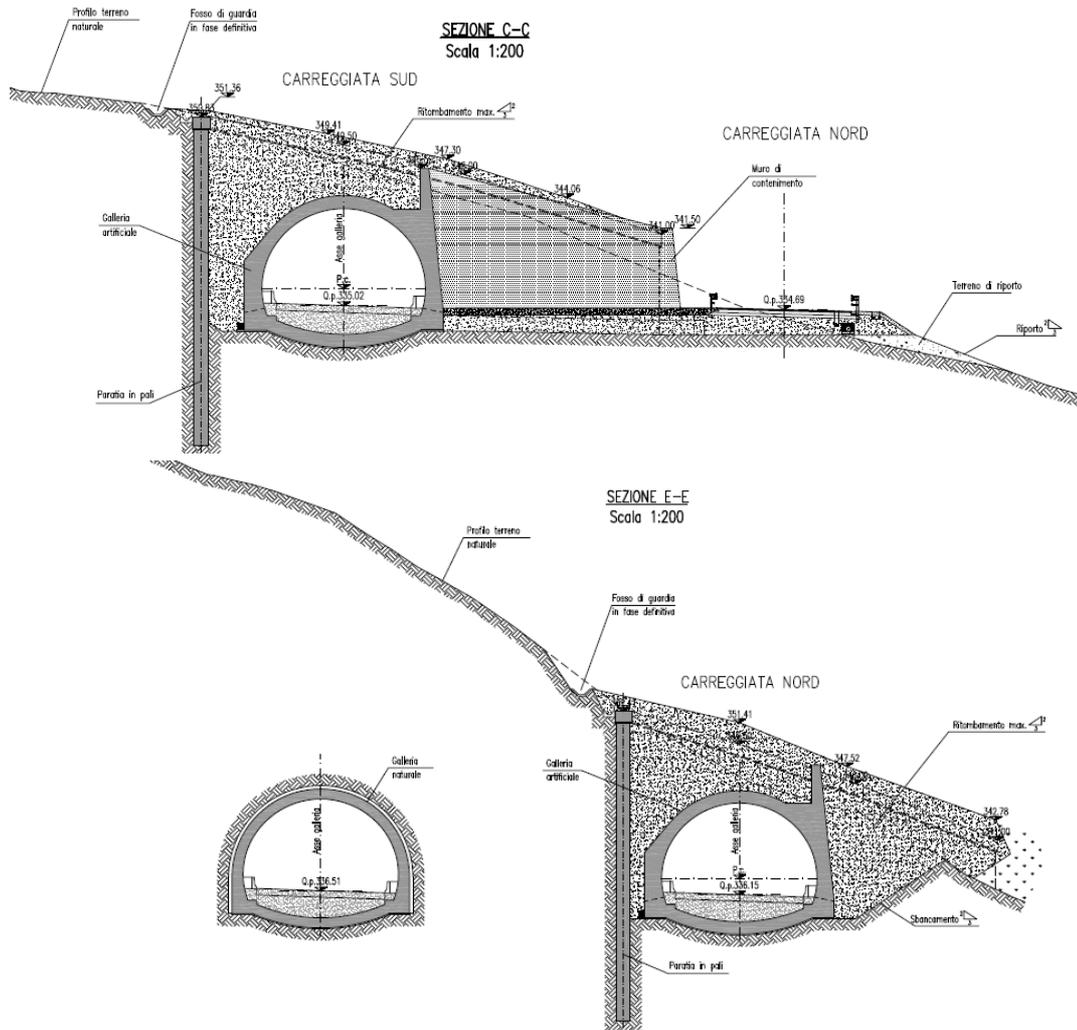


Figura 7 - Galleria artificiale

#### 4.1.1 Fasi esecutive

Per l'area di imbocco, sono state individuate 4 macro fasi:

- Fase 1: realizzazione della paratia in pali e scavo;
- Fase 2: realizzazione della dima e scavo delle due canne;
- Fase 3: realizzazione delle gallerie artificiali;
- Fase 4: ritombamento finale.

#### 4.2 Imbocco nord

Nella zona di imbocco è prevista la realizzazione di una galleria artificiale in calcestruzzo C28/35, con arco rovescio di spessore minimo pari a 1.1 m e calotta di spessore minimo pari a 1.1 m. A contatto con la paratia in micropali è prevista una dima d'attacco a protezione temporanea degli scavi e la sezione del rivestimento definitivo si riduce a 0.9 m in calotta e a 1.0 m in arco rovescio.

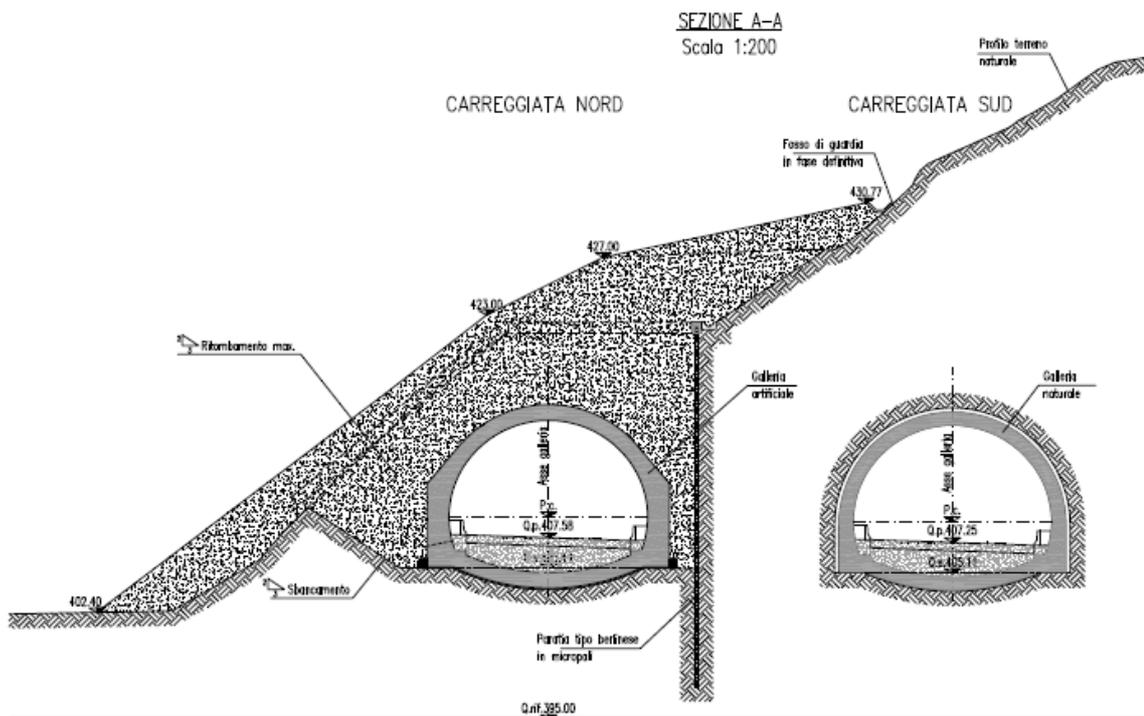


Figura 8 - Dima + Galleria artificiale

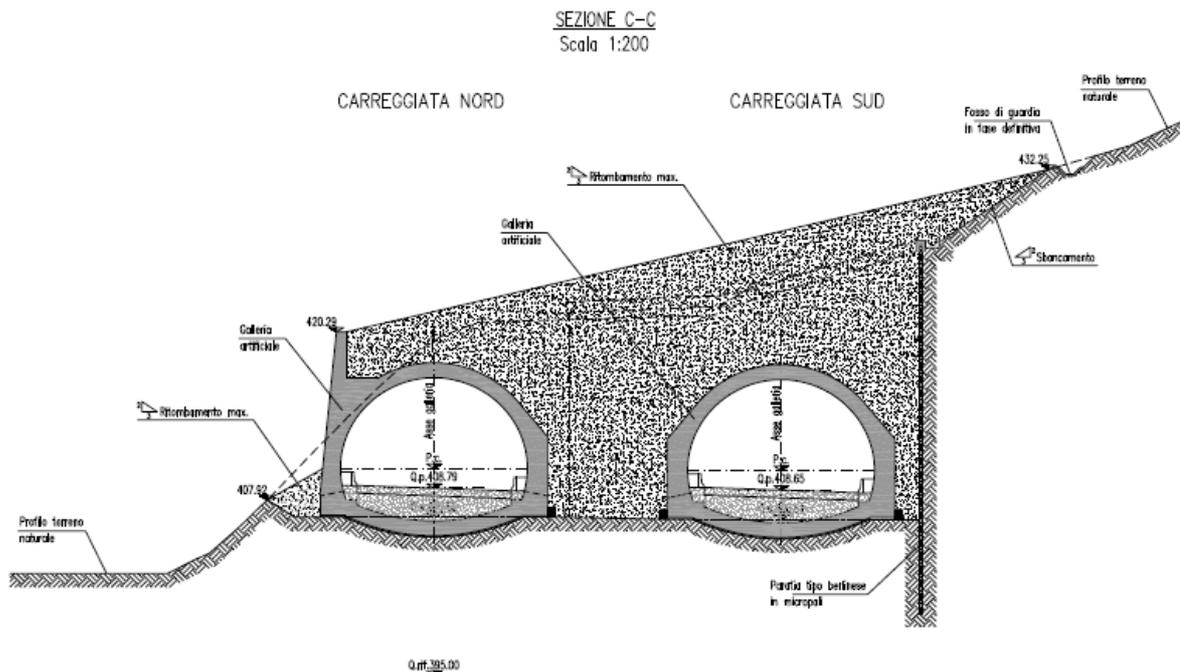


Figura 9 - Galleria artificiale

#### 4.2.1 Fasi esecutive

Per l'area di imbocco, sono state individuate 4 macro fasi:

- Fase 1: realizzazione della paratia in micropali e scavo;
- Fase 2: realizzazione della dima e scavo delle due canne;
- Fase 3: realizzazione delle gallerie artificiali;
- Fase 4: ritombamento finale.

## 5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO

L’imbocco sud della Galleria “San Pietro” interessa completamente detriti di versante.

Dalla sintesi dei dati raccolti durante le campagne di indagine si evince un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità.

Si riporta di seguito un quadro di sintesi della stratigrafia e per un approfondimento, si rimanda alla relazione geologica.

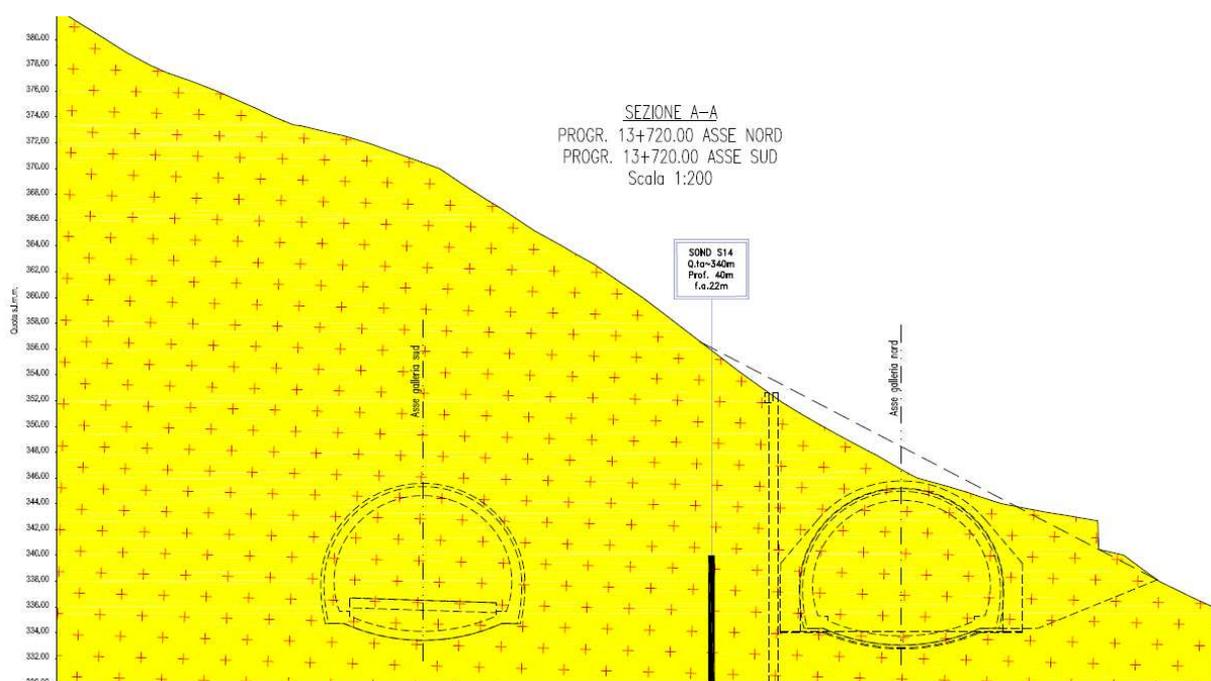


Figura 10 - Stratigrafia imbocco San Pietro sud

L’imbocco nord della Galleria “San Pietro” interessa per intero detriti di frana.

Dalla sintesi dei dati raccolti durante le campagne di indagine si evince un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità.

Si riporta di seguito un quadro di sintesi della stratigrafia e per un approfondimento, si rimanda alla relazione geologica.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

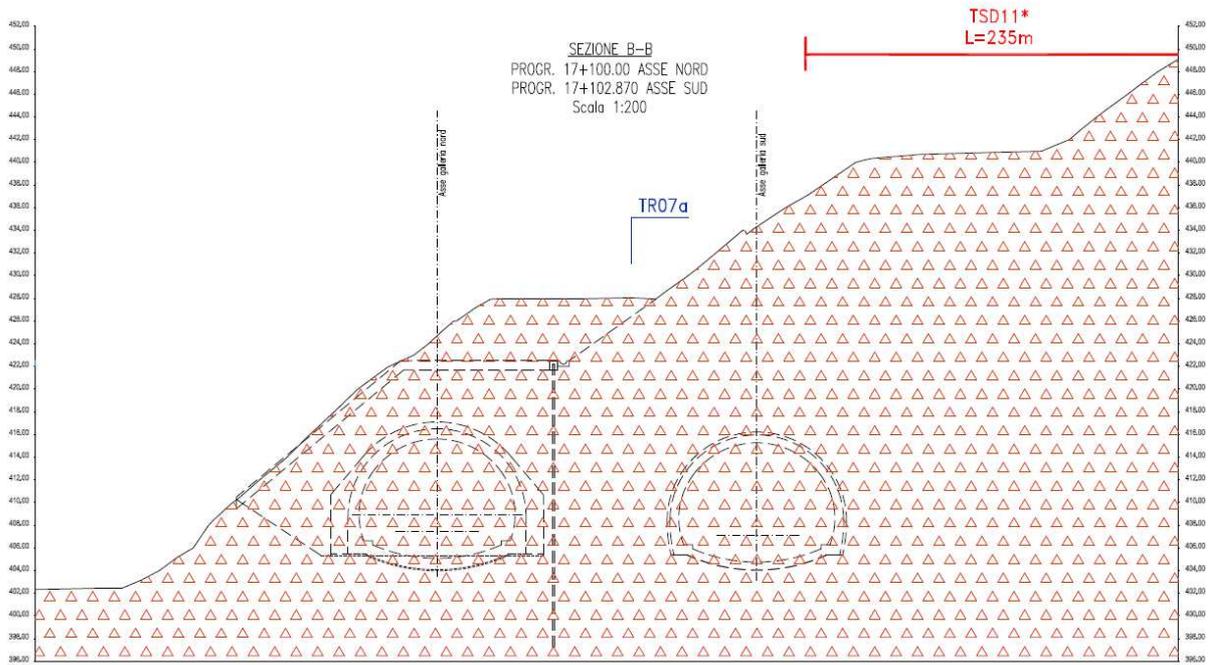


Figura 11 - Stratigrafia imbocco San Pietro nord

## 6 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Per la progettazione della sella e delle gallerie artificiali, si sono utilizzati i seguenti materiali:

- calcestruzzo per galleria artificiale C28/35;
- acciaio per armatura: B 450 C.
- 

La scelta della classe del calcestruzzo dipende dalle classe di esposizione, in questo caso definita come XD1-XC3-XF2. In accordo con il par. C.4.1.6.1.3 del D.M. 14 gennaio 2008 e la circolare 02 febbraio 2009 UNI 11104:2004 e UNI EN 206-1:2006, per rispettare la condizione ambientale aggressiva data da XD1 e XF2, risulta necessaria una classe di resistenza minima C28/35 ed il copriferro minimo risulta pari a 50mm (per elementi a piastra  $c_{min}$  è pari a 30mm, da incrementare di 10mm per le tolleranze costruttive e di ulteriori 10mm perché la vita nominale dell'opera è di 100 anni).

- Massimo rapporto a/c 0.5
- Cemento CEMIV 32.5R – 42.5R
- Minimo contenuto in cemento 340kg/m<sup>3</sup>
- Contenuto minimo in aria 3%
- Classe di consistenza S3-S4
- Diametro massimo degli aggregati 22mm

### 6.1 RESISTENZA DEI MATERIALI

Le caratteristiche di resistenza dei materiali considerati nelle analisi sono le seguenti:

- Calcestruzzo: C 28/35  
Resistenza a compressione:  $f_{ck} = 28 \text{ MPa}$   
Resistenza di progetto:  $f_{cd} = 15.8 \text{ MPa}$
  
- Acciaio per armatura ordinaria: B 450 C  
Tensione di rottura  $f_{tk} = 540 \text{ MPa}$   
Tensione di snervamento  $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$   
Resistenza di progetto  $f_{yd} = 391 \text{ MPa}$

## **7 DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI**

Le opere di sostegno sono state verificate applicando i carichi indicati nel seguito.

A livello di calcolo, non si è considerato l’effetto positivo del peso del ritombamento, che riduce il momento flettente in mezzera dell’arco rovescio, con trazione nella zona di intradosso.

Per quanto riguarda il ritiro, la realizzazione della galleria prevede 2 fasi di getto: il getto dell’arco rovescio e delle murette in prima fase e quello della calotta a seguire; in questo modo si permette lo sviluppo delle deformazioni da ritiro per le 2 parti dell’opera prima del ritombamento della galleria.

In riferimento alle variazioni termiche, dopo la scasseratura la struttura della galleria è libera di deformarsi a causa della temperatura esterna; una volta ritombata, l’escursione termica sarà contenuta e non comporterà variazioni significative dello stato tensionale nel rivestimento.

### *7.1 SPINTA DEL TERRENO*

Il carico principale a cui è soggetta la galleria artificiale risulta essere la spinta del terreno di ritombamento. La pressione trasmessa dal terreno viene calcolata automaticamente dal programma di calcolo.

All’imbocco sud, il ritombamento ha un’altezza massima di circa 4.2 m sulla galleria artificiale e di 5 m su concio d’attacco.

All’imbocco nord la copertura ha un’altezza variabile da un minimo di 3 m ad un massimo di 9m circa in asse alla canna.

Data la complessità degli imbocchi, entrambi verranno analizzati nel dettaglio.

### *7.2 CARICO IDRAULICO*

Nella zona degli imbocchi, il livello di falda è mantenuto sia in fase di scavo che a lungo termine al di sotto delle gallerie, che fungono esse stesse da dreno.

### *7.3 CARICO SISMICO*

L’azione di un ipotetico sisma è stata valutata considerando l’incremento di spinta del terreno e le forze inerziali.

L’incremento di spinta del terreno, applicata lateralmente ad un solo lato della struttura

come pressione equivalente, è stato stimato utilizzando la seguente formula, in cui compaiono il peso del terreno  $\gamma$ , l'altezza del calotta  $H_{cal}$  e l'altezza del ricoprimento  $H_{cop}$ :

$$P_h = k_h \cdot \gamma \cdot (H_{cal} + H_{cop})^2$$

Per determinare l'azione sismica, con riferimento alla galleria Pedescala che si sviluppa interamente nel comune di San Pietro Valdastico, si utilizza il foglio excel Spettri-NTC ver 1.03, disponibile sul sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

In accordo a quanto dichiarato nella relazione sismica J16L1\_03\_09\_01\_001\_0101\_0PD, all'SLV il valore di  $k_h$  è stato definito in accordo al DM2008, determinando i seguenti valori:

- Vita nominale =  $V_N = 100$  anni (opera definitiva);
- Classe d'uso =  $c_u = 2$  (classe IV);
- Periodo di riferimento =  $V_R = \max(V_N c_u; 35) = 200$ ;
- Probabilità di superamento =  $P_{VR} = 10\%$ ;
- Tempo di ritorno =  $T_R = 1898$  anni.
- Accelerazione orizzontale di picco su suolo di riferimento rigido  $a_g = 0.205$  g.

In SLD,  $a_g = 0.089$  g.

Il coefficiente sismico orizzontale ( $k_h$ ) viene calcolato come:

$$k_h = S_S S_T \frac{a_g}{g}$$

dove:

$S_S$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica, in funzione della categoria di sottosuolo;

$S_T$  = coefficiente di amplificazione topografica, in funzione della categoria topografica.

All'imbocco sud, con sottosuolo di tipo B,  $S_S$  è pari a 1.2, mentre  $S_T$  è pari a 1; all'imbocco nord, con sottosuolo di tipo B,  $S_S$  è pari a 1.2, mentre  $S_T$  è considerato pari a 1.2.

L'azione sismica porta anche ad un sovraccarico verticale  $P_v$ , pari alla pressione del terreno ( $\gamma * H_{cop}$ ) moltiplicata per  $k_v = 0.5 * k_h$ .

Nel calcolo si tiene conto anche delle azioni inerziali sul rivestimento della galleria, dovute al contributo sismico in orizzontale  $PP_h$  e verticale  $PP_v$ :

$$PP_h = PP \cdot k_h$$

$$PP_v = PP \cdot k_v$$

## 8 CRITERI DI VERIFICA

La verifica della galleria artificiale è stata effettuata secondo un approccio agli Stati Limite, analizzando sia lo stato limite ultimo che lo stato limite di esercizio, con riferimento a quanto indicato nel Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14.01.2008 - Testo Unico “Norme Tecniche per le Costruzioni”. Il D.M. 2008 T.U. segue l’approccio agli Stati Limite degli Eurocodici: la sicurezza e la prestazione di un’opera devono essere valutati in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la sua vita nominale, Stati Limite Ultimi (S.L.U.) e Stati Limite di Esercizio (S.L.E.), secondo il metodo semiprobabilistico basato sull’impiego dei “coefficienti parziali di sicurezza”.

Le verifiche di interazione terreno struttura della cavità e le verifiche strutturali verranno condotte in accordo con gli stati limite ultimi STR Combinazione 1 dell’Approccio 1 (A1+M1+R1), nella quale i coefficienti sui parametri di resistenza (M1) e sulla resistenza globale del sistema (R1) sono unitari, mentre le azioni permanenti e le azioni variabili sono amplificate mediante i coefficienti del gruppo A1. E’ opportuno, in questo caso, applicare i coefficienti amplificativi delle azioni direttamente alle sollecitazioni. Nelle analisi di interazione ai fini della valutazione delle sollecitazioni delle strutture, dove il fattore dominante è rappresentato dalle rigidezze e dai rapporti relativi delle rigidezze di terreno e struttura, la modellazione eseguita con i valori caratteristici delle azioni e delle resistenze fornisce una descrizione realistica dello stato tensionale nel terreno e negli elementi strutturali. La procedura di riduzione dei parametri di resistenza del terreno è sconsigliabile perché introdurrebbe nel calcolo parametri tra loro non congruenti e quindi risultati non attendibili.

### 8.1 Stati limite ultimi (S.L.U.)

Secondo quanto disposto dalle NTC2008, la verifica della sicurezza agli stati limite ultimi per costruzioni di conglomerato cementizio si ritiene soddisfatta quando, per ogni elemento strutturale e per ciascuna delle combinazioni delle azioni prese in esame, risulti:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  è il valore di progetto dell’azione pari all’azione nominale moltiplicata per il coefficiente parziale per le azioni  $\gamma$ , mentre  $R_d$  è il valore di progetto della resistenza del sistema, valutato con riferimento ai coefficienti parziali per le resistenze, che variano in funzione dei materiali.

I fattori moltiplicativi delle azioni sono stati considerati pari a 1.3.

Le resistenze di calcolo dei materiali (NTC 2008), conglomerato cementizio e acciaio, si ottengono mediante l'espressione

$$f_{cd} = \frac{f_{ck} * \alpha_{cc}}{\gamma_c} = 15.8 MPa$$

Dove:

$f_{ck}$  = resistenza cilindrica caratteristica del materiale (28 MPa)

$\gamma_c$  = coefficiente parziale per la resistenza (1.50)

$\alpha_c = 0.85$

La tensione di snervamento di calcolo dell'acciaio risulta invece pari a:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391.3 MPa$$

dove

$f_{yk}$  = tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio (450 MPa)

$\gamma_s$  = coefficiente parziale per la resistenza (1.15)

Per ciascuna sezione è stato riportato il diagramma di interazione M-N, i cui i bordi rappresentano i limiti della resistenza di calcolo  $R_d$ .

Le ipotesi considerate per la costruzione del dominio di resistenza sono:

- conservazione delle sezioni piane;
- legame costitutivo del calcestruzzo tipo parabola-rettangolo con un range costante di deformazione compreso tra 0,2% e 0,35%;
- legame costitutivo dell'acciaio tipo elastico-perfettamente plastico, con deformazione limite di rottura dello 0,1%;
- perfetta aderenza calcestruzzo-acciaio;
- calcestruzzo non reagente a trazione.

### 8.1.1 Verifica a Pressoflessione

La verifica risulta soddisfatta quando i punti rappresentativi delle coppie di sollecitazioni sul rivestimento risultano all'interno del diagramma. Nelle tabelle di sintesi delle verifiche è riportato altresì il coefficiente di utilizzo della sezione ( $M_{Rd} / M_{Ed} > 1$ ), il quale deve risultare maggiore all'unità affinché la verifica risulti soddisfatta.

### 8.1.2 Verifica al Taglio

Per la valutazione delle resistenze ultime nei confronti di sollecitazioni taglianti (valido per elementi monodimensionali), è stato considerato quanto riportato di seguito.

#### Criterio di verifica - Sezioni senza armature trasversali resistenti a taglio

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$  degli elementi strutturali sprovvisti di specifica armatura a taglio è stata valutata, utilizzando formule di comprovata affidabilità, sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo.

La verifica di resistenza (SLU) si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove  $V_{Ed}$  è il valore di calcolo dello sforzo di taglio.

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza al taglio si valuta con:

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (4.1.14)$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

$d$  è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_1 = A_{s1} / (b_w \cdot d)$  è il rapporto geometrico di armatura longitudinale ( $\leq 0,02$ );

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$  è la tensione media di compressione nella sezione ( $\leq 0,2 f_{cd}$ );

$b_w$  è la larghezza minima della sezione (in mm).

Nelle tabelle di sintesi delle verifiche è riportato il coefficiente di utilizzo della sezione ( $V_{Rd}/V_{Ed} > 1$ ), il quale deve risultare maggiore all'unità affinché la verifica risulti soddisfatta.

#### Criterio di verifica - Sezioni con armature trasversali resistenti a taglio

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$  di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio è stata valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2,5$$

La verifica di resistenza (SLU) si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove  $V_{Ed}$  è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all’armatura trasversale, la resistenza di calcolo a “taglio trazione” si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$$

Con riferimento al calcestruzzo d’anima, la resistenza di calcolo a “taglio compressione” si calcola

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2\theta)$$

La resistenza al taglio della trave è la minore delle due sopra definite, dove  $d$ ,  $b_w$  e  $\sigma_{cp}$  hanno il significato già visto in precedenza e inoltre si è posto:

$A_{sw}$  area dell’armatura trasversale;

$s$  interasse tra due armature trasversali consecutive;

$\alpha$  angolo di inclinazione dell’armatura trasversale rispetto all’asse della trave;

$f'_{cd}$  resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d’anima ( $f'_{cd} = 0,5 f_{cd}$ );

$\alpha_c$  coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrature non compresse

1 +  $\sigma_{cp} / f_{cd}$  per  $0 \leq \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$

1,25 per  $0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$

2,5 (1 -  $\sigma_{cp} / f_{cd}$ ) per  $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < 0,5 f_{cd}$

## 8.2 Stati limite di esercizio (S.L.E.)

Le tensioni ricavate dalle sollecitazioni fornite dal codice di calcolo dovranno essere confrontate con le seguenti tensioni di riferimento, rispettivamente nel calcestruzzo (C28/35) e nell’acciaio (B450C):

$\sigma_c = 0,45 \times f_{ck} = 12,6$  MPa per combinazione quasi permanente

$\sigma_s = 0,80 \times f_{yk} = 360$  MPa

dove:

$f_{ck}$  = Resistenza caratteristica di compressione del calcestruzzo;

$f_{yk}$  = Tensione caratteristica di snervamento dell’acciaio.

Le verifiche a presso flessione sono state condotte per le combinazioni di sollecitazione ritenute più significative.

### 8.2.1 Verifica a Fessurazione

Per assicurare la funzionalità e la durata delle strutture si deve:

- garantire un sufficiente ricoprimento delle armature con calcestruzzo di buona qualità e compattezza, bassa porosità e bassa permeabilità;
- non superare uno stato limite di fessurazione adeguato alle condizioni ambientali, alle sollecitazioni ed alla sensibilità delle armature alla corrosione;
- tener conto delle esigenze estetiche.

In ordine di severità decrescente si distinguono i seguenti stati limite di fessurazione:

- stato limite di decompressione nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0;
- stato limite di formazione delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = \frac{f_{ctm}}{1.2}$$

dove  $f_{ctm}$  rappresenta la resistenza a trazione media del cls.

- stato limite di apertura delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$$w_1 = 0.2 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0.3 \text{ mm}$$

$$w_3 = 0.4 \text{ mm}$$

Lo stato limite di fessurazione è stato fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione.

Per armature poco sensibili e condizioni ambientali aggressive (XF2),  $w_d=w_1=0.2\text{mm}$ .

### *Stato limite di apertura delle fessure*

Il valore di calcolo di apertura delle fessure ( $w_d$ ) non deve superare i valori nominali  $w$  di progetto. Il valore di calcolo è dato da:

$$w_d = 1.7 w_m$$

dove  $w_m$ , rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

L'ampiezza media delle fessure  $w_m$  è calcolata come prodotto della deformazione media delle barre d'armatura  $\epsilon_{sm}$  per la distanza media tra le fessure  $\Delta_{sm}$ :

$$w_m = \epsilon_{sm} \times \Delta_{sm}$$

Per il calcolo di  $\epsilon_{sm}$ , e  $\Delta_{sm}$  vanno utilizzati criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica nel rispetto delle indicazioni fornite nel paragrafo C4.1.2.2.4.6 della Circolare 02/02/2009.

In assenza di dati più precisi, i parametri  $\Delta_{sm}$  e  $\epsilon_{sm}$  che definiscono  $w_m$ , possono valutarsi come segue, nell'ipotesi che le armature siano distribuite uniformemente sull'area efficace della sezione trasversale.

La distanza media fra le fessure  $\Delta_{sm}$  per la condizione di fessurazione stabilizzata in corrispondenza del livello baricentrico dell'armatura all'interno dell'area efficace è data da:

$$\Delta_{sm} = 2 (c+s/10)+k_2 k_3 \Phi/\rho_r$$

$c$  = copriferro netto armatura tesa (mm);

$s$  = interasse tra i ferri, se  $s > 14\Phi$  si adotterà  $s = 14\Phi$  (mm);

$\Phi$  = diametro delle barre (mm);

$k_2 = 0.4$ , per barre ad aderenza migliorata;

$k_3 = 0.125$ , per diagramma delle  $\sigma$  triangolare, dovuto a flessione o pressoflessione;

$\rho_r = A_s/A_{c,eff}$ ;

$A_s$  = area della sezione di acciaio posta nell'area  $A_{c,eff}$ .

La deformazione unitaria media dell'armatura  $\epsilon_{sm}$  può valutarsi secondo la seguente espressione che tiene conto della collaborazione del calcestruzzo teso che la circonda:

$$\epsilon_{sm} = \sigma_s/E_s (1-\beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr}/\sigma_s)^2) \geq (0.4 \sigma_s/E_s)$$

$\sigma_s$  = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la combinazione di azioni considerata;

$\sigma_{sr}$  = tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la sollecitazione corrispondente al raggiungimento della resistenza a trazione  $f_{ctm}$  nella fibra di calcestruzzo più sollecitata nella sezione interamente reagente;

$\beta_1 = 1.0$  per barre ad aderenza migliorata;

$\beta_2 = 0.5$  nel caso di azioni di lunga durata o ripetute.

## 9 ANALISI NUMERICHE

Per il dimensionamento delle gallerie artificiali, si considerano 2 modelli, rappresentativi delle condizioni più gravose dei 2 imbocchi della Galleria San Pietro.

Con riferimento all’imbocco sud, si analizza la condizione della galleria artificiale in canna sud, con terreno gravante solo dal lato di monte, mentre a valle, la presenza di una veletta sulla galleria stessa permette la creazione di un’area libera al piano della sede stradale della carreggiata nord. In corrispondenza del concio d’attacco, il ritombamento è completo e la condizione di carico è paragonabile a quella già verificata per il concio d’attacco della galleria Pedescala, a cui si rimanda.

Per quanto riguarda l’imbocco nord, si analizza la canna di monte, la sud, in corrispondenza della massima altezza di scavo, dove la spinta del terreno risulta fortemente asimmetrica. In corrispondenza del concio d’attacco, il ritombamento è completo e la condizione di carico è paragonabile a quella già verificata per il concio d’attacco della galleria Pedescala, a cui si rimanda.

### 9.1 FASI DI CALCOLO

Al fine di cogliere al meglio il comportamento della struttura nel suo complesso, vengono simulate anche le fasi antecedenti alla realizzazione della galleria artificiale, che includono la realizzazione della palificata, lo scavo e l’intervento di tirantatura.

Per la prima sezione di calcolo, per dettagli su queste fasi si rimanda alla sezione “San Pietro sud – 3” nella specifica relazione di calcolo dell’imbocco. Le fasi di calcolo sono le seguenti:

- step 0 geostatico: vengono inizializzati gli sforzi nel terreno, senza imporre il k, ma lasciando calcolare al programma automaticamente gli sforzi principali in funzione della pendenza del pendio.
- step a: simulazione della palificata per mezzo di elementi beam con le stesse proprietà utilizzate in Paratie 8.0 per il dimensionamento dei pali ( $A=0.8078$  m;  $I=0.0727$  m<sup>4</sup>/m;  $E=31$  GPa).
- step b: prima fase di ribasso.
- step c: simulazione I ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step d: seconda fase di ribasso.
- step e: simulazione II ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.

- step f: terza fase di ribasso.
- step g: simulazione III ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step h: ribasso finale.
- step 1: attivazione dell’arco rovescio.
- step 2: attivazione della calotta.
- step 3: ritombamento fino alla sistemazione definitiva.
- step 4: condizione di lungo termine, con rimozione della palificata e del tirante.
- step 5 applicazione delle spinte in fase sismica SLV.
- step 5b (dipendente da step 4): applicazione delle spinte in fase sismica SLD.

Per la seconda sezione di calcolo, per dettagli sulle fasi di realizzazione della paratia si rimanda alla sezione “San Pietro nord – 3” nella specifica relazione di calcolo dell’imbocco. Le fasi di calcolo sono le seguenti:

- step 0 geostatico: vengono inizializzati gli sforzi nel terreno, senza imporre il k, ma lasciando calcolare al programma automaticamente gli sforzi principali in funzione della pendenza del pendio.
- step a: simulazione della palificata per mezzo di elementi beam con le stesse proprietà utilizzate in Paratie 8.0 per il dimensionamento dei pali ( $A=0.0301 \text{ m}^2$ ;  $I=0.0002 \text{ m}^4/\text{m}$ ;  $E=32\text{GPa}$ ).
- step b: prima fase di ribasso.
- step c: simulazione I ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step d: seconda fase di ribasso.
- step e: simulazione II ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step f: terza fase di ribasso.
- step g: simulazione III ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step h: quarta fase di ribasso.
- step i: simulazione IV ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step l: quinta fase di ribasso.

- step m: simulazione V ordine di tiranti, inserendo nel modello una forza orizzontale equivalente alla quota del tirante stesso.
- step n: ribasso finale.
- step 1: attivazione dell'arco rovescio.
- step 2: attivazione della calotta.
- step 3: ritombamento fino alla sistemazione definitiva.
- step 4: condizione di lungo termine, con rimozione della palificata e del tirante.
- step 5 applicazione delle spinte in fase sismica SLV.
- step 4b (dipendente da step 3): applicazione delle spinte in fase sismica SLD.

Le azioni in fase sismica vengono definite in accordo a quanto definito in precedenza e risultano:

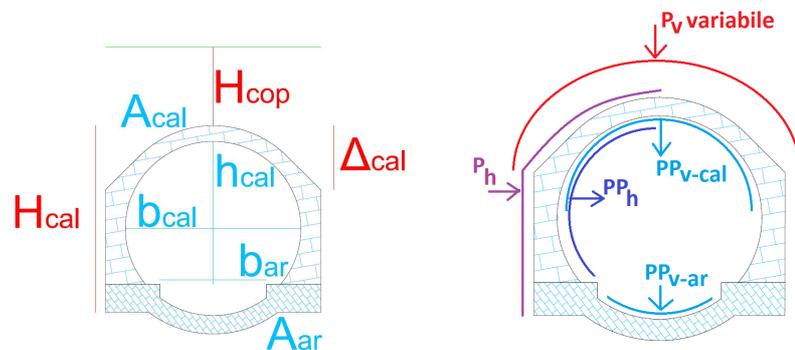


Figura 12 - Definizione del carico sismico

Spinta terreno orizzontale	Spinta terreno verticale
$H_{cal}$ 11.2 [m]	$P_v \times Flac$ 11.4 [kPa]
$H_{cop}$ 3.5 [m]	$\Delta_{cop}$ 5.5 [m]
$\gamma$ 22 [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Delta P_v \times Flac$ 17.9 [kPa]
$S_h$ 1403.4 [kN]	
<b><math>P_h \times Flac</math> 125.3 [kPa]</b>	
$A_{cal}$ 42.3 [m <sup>2</sup> ]	
$A_{AR}$ 21.3 [m <sup>2</sup> ]	
Inerzia riv. orizzontale	Inerzia riv. orizzontale
$PP_h$ 234.7 [kN]	$PP_{v-cal}$ 156.1 [kN]
$h_{cal}$ 9 [m]	$b_{cal}$ 13.5 [m]
<b><math>PP_h \times Flac</math> 26.1 [kPa]</b>	<b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math> 11.6 [kPa]</b>
	$PP_{v-ar}$ 78.6 [kN]
	$b_{ar}$ 11.2 [m]
	<b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math> 7.0 [kPa]</b>

Tabella 1: Carico sismico SLV – Modello 1 – GA

Spinta terreno orizzontale	Spinta terreno verticale
$H_{cal}$ 11.2 [m]	$P_v \times Flac$ 4.9 [kPa]
$H_{cop}$ 3.5 [m]	$\Delta_{cop}$ 5.5 [m]
$\gamma$ 22 [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Delta P_v \times Flac$ 7.8 [kPa]
$S_h$ 609.3 [kN]	
<b><math>P_h \times Flac</math> 54.4 [kPa]</b>	
$A_{cal}$ 42.3 [m <sup>2</sup> ]	
$A_{AR}$ 21.3 [m <sup>2</sup> ]	
Inerzia riv. orizzontale	Inerzia riv. orizzontale
$PP_h$ 101.9 [kN]	$PP_{v-cal}$ 67.8 [kN]
$h_{cal}$ 9 [m]	$b_{cal}$ 13.5 [m]
<b><math>PP_h \times Flac</math> 11.3 [kPa]</b>	<b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math> 5.0 [kPa]</b>
	$PP_{v-ar}$ 34.1 [kN]
	$b_{ar}$ 11.2 [m]
	<b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math> 3.0 [kPa]</b>

Tabella 2: Carico sismico SLD – Modello 1 – GA

Spinta terreno orizzontale		Spinta terreno verticale
$H_{cal}$	11.2 [m]	$P_v \times Flac$ 11.4 [kPa]
$H_{cop}$	3.5 [m]	$\Delta_{cop}$ 5.5 [m]
$\gamma$	22 [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Delta P_v \times Flac$ 17.9 [kPa]
$S_h$	1403.4 [kN]	
<b><math>P_h \times Flac</math></b>	<b>125.3 [kPa]</b>	
$A_{cal}$	42.3 [m <sup>2</sup> ]	
$A_{AR}$	21.3 [m <sup>2</sup> ]	
Inerzia riv. orizzontale		Inerzia riv. verticale
$PP_h$	234.7 [kN]	$PP_{v-cal}$ 156.1 [kN]
$h_{cal}$	9 [m]	$b_{cal}$ 13.5 [m]
<b><math>PP_h \times Flac</math></b>	<b>26.1 [kPa]</b>	<b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math></b> 11.6 [kPa]
		$PP_{v-ar}$ 78.6 [kN]
		$b_{ar}$ 11.2 [m]
		<b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math></b> 7.0 [kPa]

Tabella 3: Carico sismico SLV – Modello 2 – GA

Spinta terreno orizzontale		Spinta terreno verticale
$H_{cal}$	11.2 [m]	$P_v \times Flac$ 4.9 [kPa]
$H_{cop}$	3.5 [m]	$\Delta_{cop}$ 5.5 [m]
$\gamma$	22 [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Delta P_v \times Flac$ 7.8 [kPa]
$S_h$	609.3 [kN]	
<b><math>P_h \times Flac</math></b>	<b>54.4 [kPa]</b>	
$A_{cal}$	42.3 [m <sup>2</sup> ]	
$A_{AR}$	21.3 [m <sup>2</sup> ]	
Inerzia riv. orizzontale		Inerzia riv. verticale
$PP_h$	101.9 [kN]	$PP_{v-cal}$ 67.8 [kN]
$h_{cal}$	9 [m]	$b_{cal}$ 13.5 [m]
<b><math>PP_h \times Flac</math></b>	<b>11.3 [kPa]</b>	<b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math></b> 5.0 [kPa]
		$PP_{v-ar}$ 34.1 [kN]
		$b_{ar}$ 11.2 [m]
		<b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math></b> 3.0 [kPa]

Tabella 4: Carico sismico SLD – Modello 2 – GA

## 9.2 PARAMETRI GEOTECNICI

La stratigrafia considerata nei 2 modelli è costituita completamente da detriti; per il ritombamento si assume  $\gamma$  pari a  $22\text{kN/m}^3$  (sovrastimato), coesione nulla,  $\phi=30^\circ$  e modulo elastico pari a  $50\text{MPa}$ .

Terreno	Profondità da p.c. [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\phi$ [°]	$c'$ [kPa]
Detrito – a	0 - 10	22	100	35	0
Detrito - b	10 - 20	23	150	37	0
Detrito - c	> 20	23	200	37	0

Tabella 5: Stratigrafia per San Pietro

Le dimensioni dei modelli di calcolo devono essere tali da evitare fenomeni di bordo e da cogliere correttamente l’interazione terreno-struttura; in questo caso, con una galleria di circa 14m di diametro, il modello ha una larghezza di 140m e un’altezza di 60m.

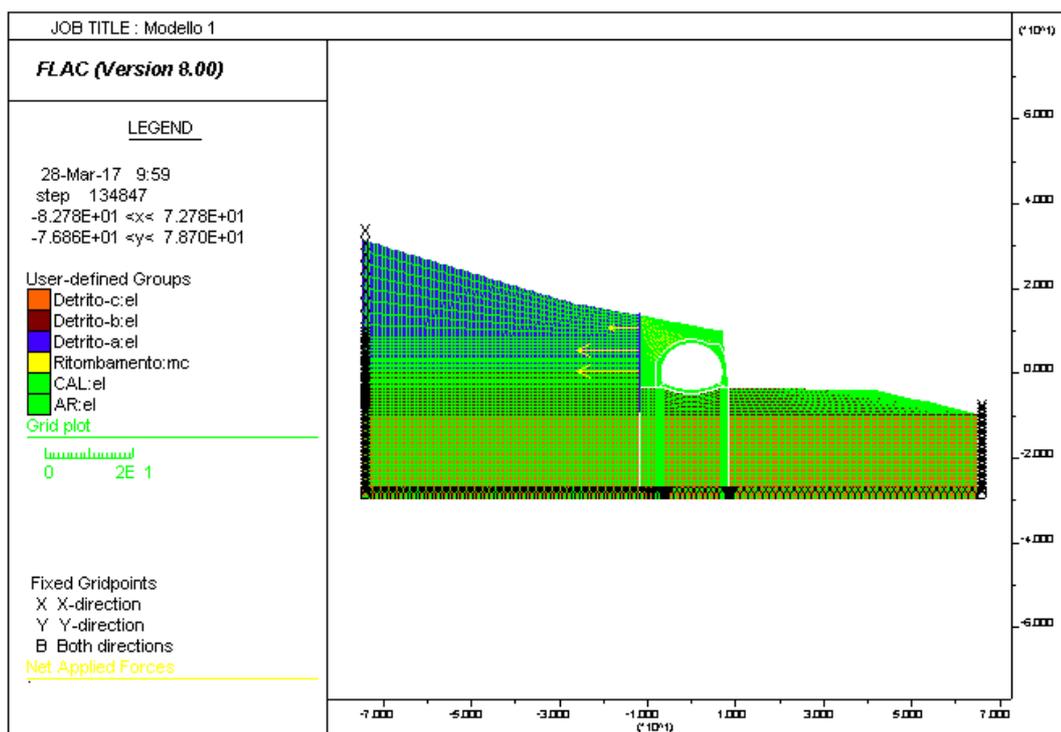


Figura 13 - Modello “GA asim -sud”

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

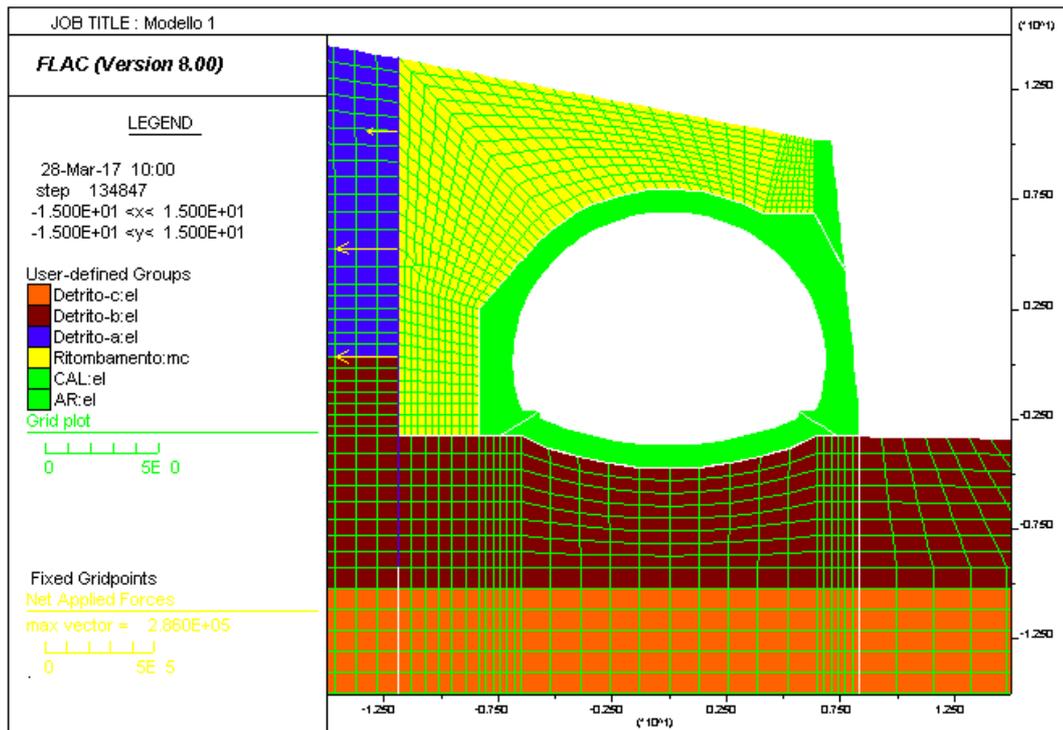


Figura 14 - Modello "GA asim - sud" - particolare

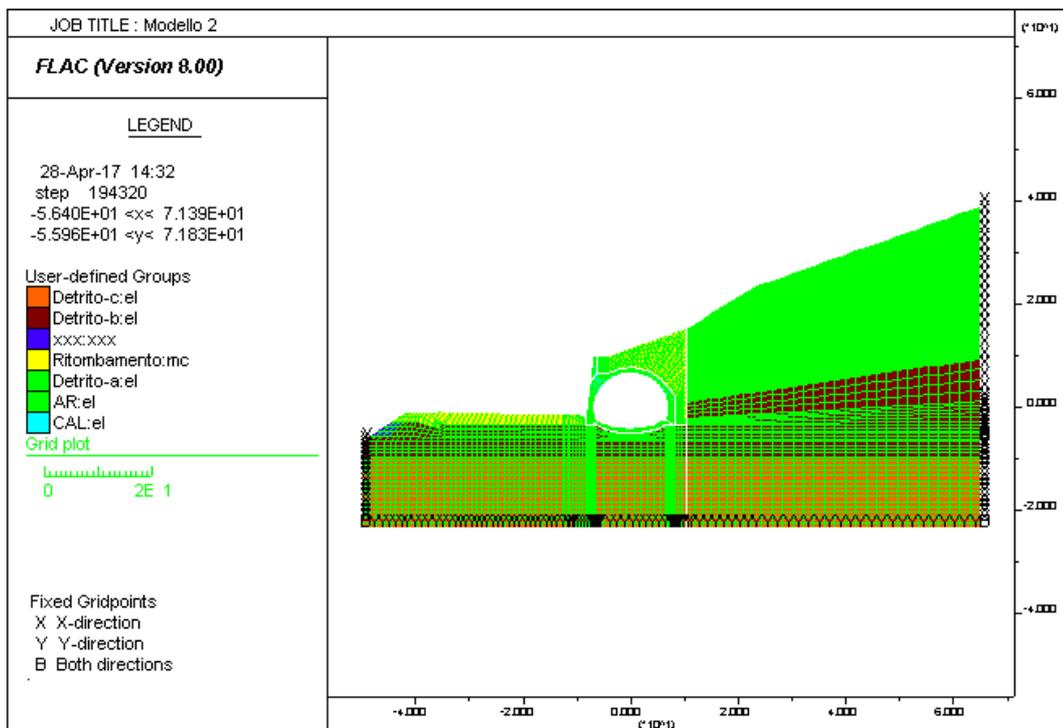


Figura 15 - Modello "GA asim - nord"

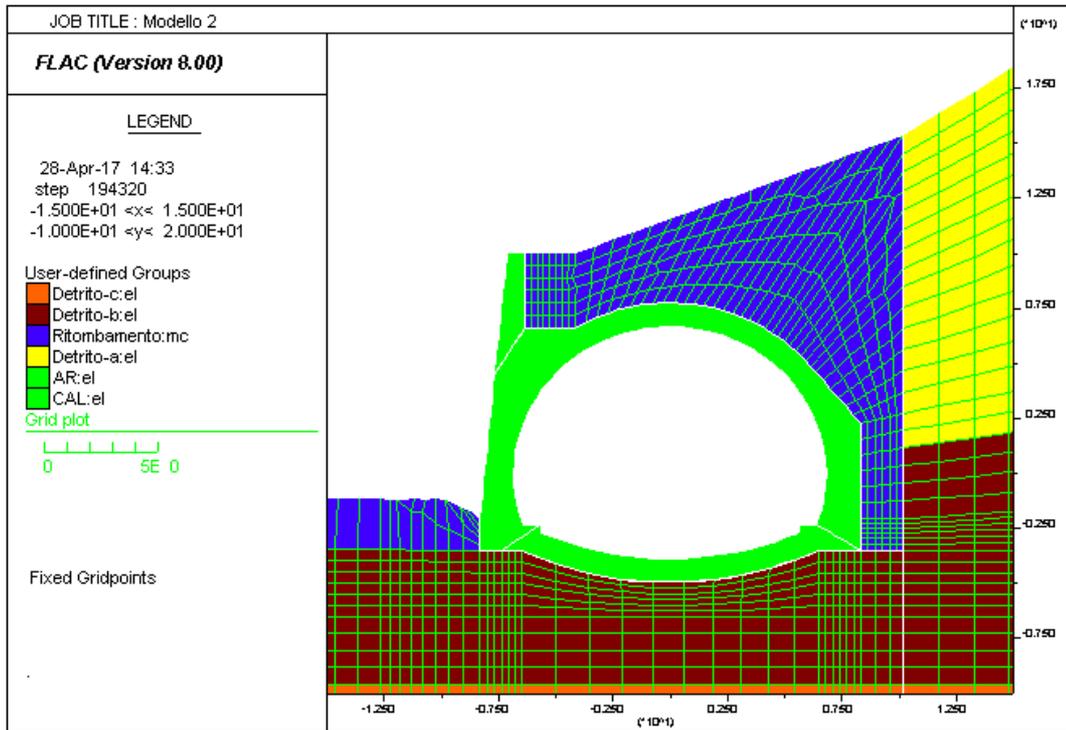


Figura 16 - Modello "GA asim - nord" - particolare

## 10 MODELLO 1 – GA asim - sud

### 10.1 Palificata

Grazie alla modellazione adottata e alla fasi costruttive analizzate, è possibile ottenere il corretto stato di sforzo e deformativo del terreno nella fase antecedente la realizzazione della galleria.

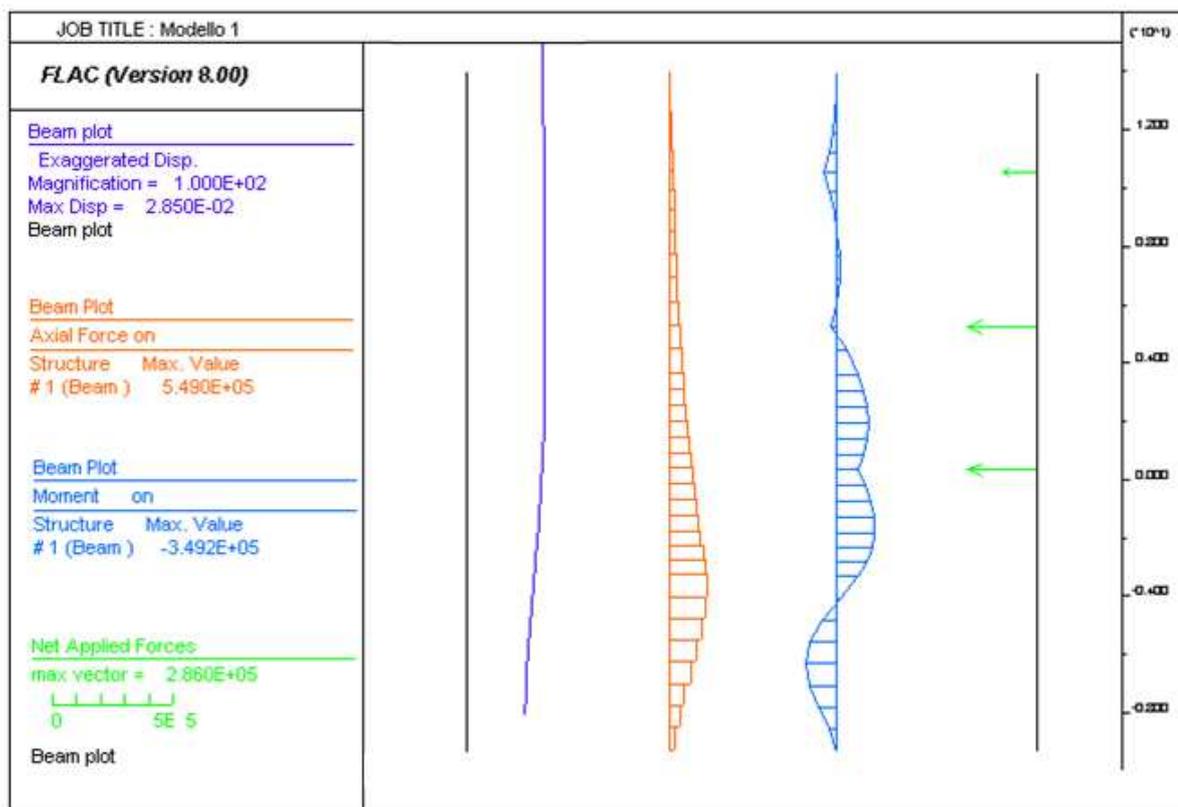


Figura 17 - Comportamento della palificata

A fondo scavo, la paratia di pali di grande diametro ha uno spostamento massimo di 28.5 mm, di cui 25.7 mm in orizzontale (paragonabili a quelli ottenuti con Paratie 8.0) ed il momento flettente arriva a 349kNm/m, ovvero 488.6kNm a palo (inferiore a 656.1kNm ottenuto con Paratie).

Considerando che i risultati sono paragonabili a quelli ottenuti per una sezione di calcolo simile con Paratie 8.0, è corretto proseguire con la simulazione delle fasi realizzative della galleria artificiale.

### 10.2 Spostamenti

Il codice di calcolo ha permesso di valutare il regime deformativo corrispondente ad ogni step di calcolo; la tabella seguente riporta gli spostamenti verticali assoluti della galleria (positivi verso il basso) nelle differenti fasi di calcolo. La convergenza diametrale, pari alla differenza di spostamento assoluto tra 2 punti, indica gli spostamenti relativi tra i due punti della struttura: risulta una convergenza millimetrica (di segno positivo indica avvicinamento dei 2 punti) e di conseguenza una deformazione praticamente nulla della struttura soggetta ai carichi d’esercizio e sismici:

Sezione	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Calotta	6.8	20.5	21.2	24.0
Arco rovescio	6.7	15.9	16.7	18.8
Convergenza radiale	0.1	4.6	4.5	5.2

Tabella 6: Spostamento verticale [mm]

Si rimanda agli output Flac in allegato per ulteriori informazioni sulle deformazioni nel modello di calcolo.

### 10.3 Verifiche a pressoflessione

In calotta e in arco rovescio si prevedono dei ferri  $\varnothing 30$  ogni 10cm su ambo i lati, con ripartitori  $\varnothing 14$  e spilli  $\varnothing 14$  a maglia 30x40 cm, localmente ridotta a 30x20 in corrispondenza della base dei piedritti e dell’attacco dell’arco rovescio.

Il valore del copriferro adottato nelle verifiche è di 5cm.

Le tensioni presenti nella galleria artificiale nelle successive fasi di calcolo vengono integrate per ottenere le sollecitazioni N, M e V.

Le seguenti figure mostrano l’andamento di N e di M nei diversi step di calcolo.

Segue la verifica strutturale delle sezioni maggiormente sollecitate nelle diversi parti della galleria.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

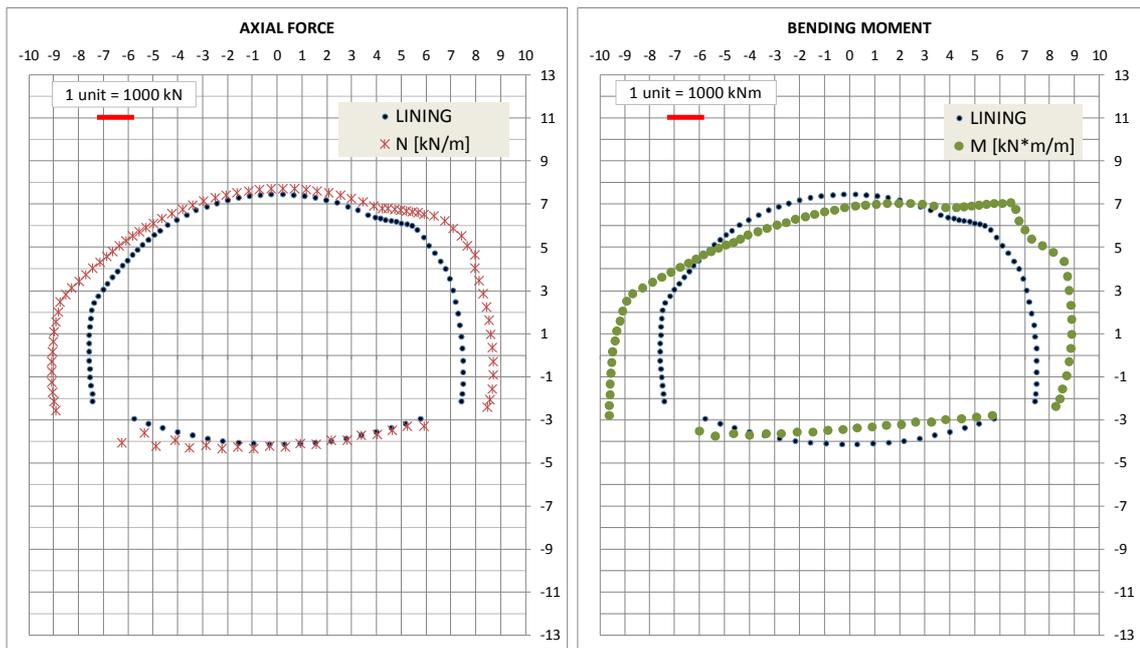


Figura 18 - Diagrammi N e M – Step 3

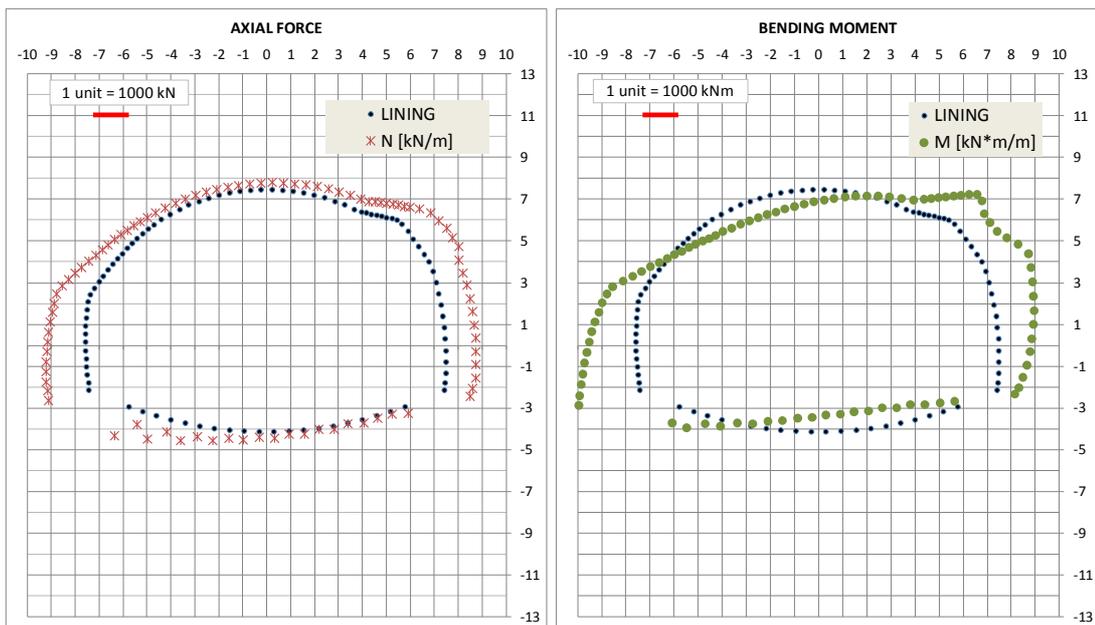


Figura 19 - Diagrammi N e M – Step 4

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

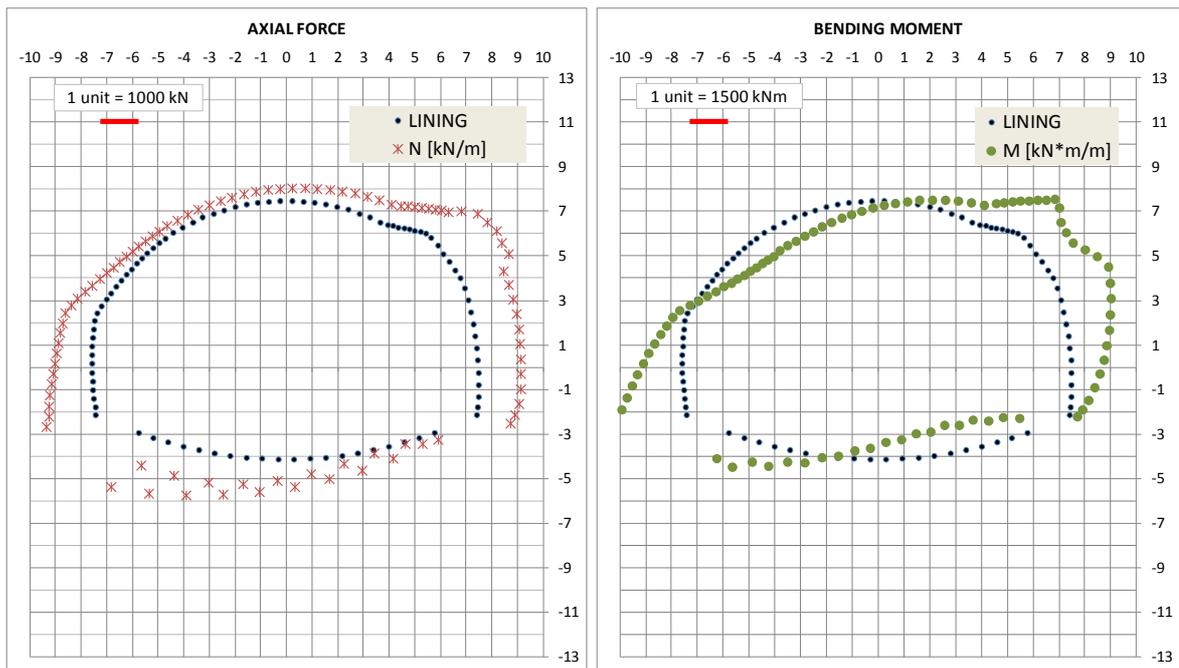


Figura 20 - Diagrammi N e M – Step 5

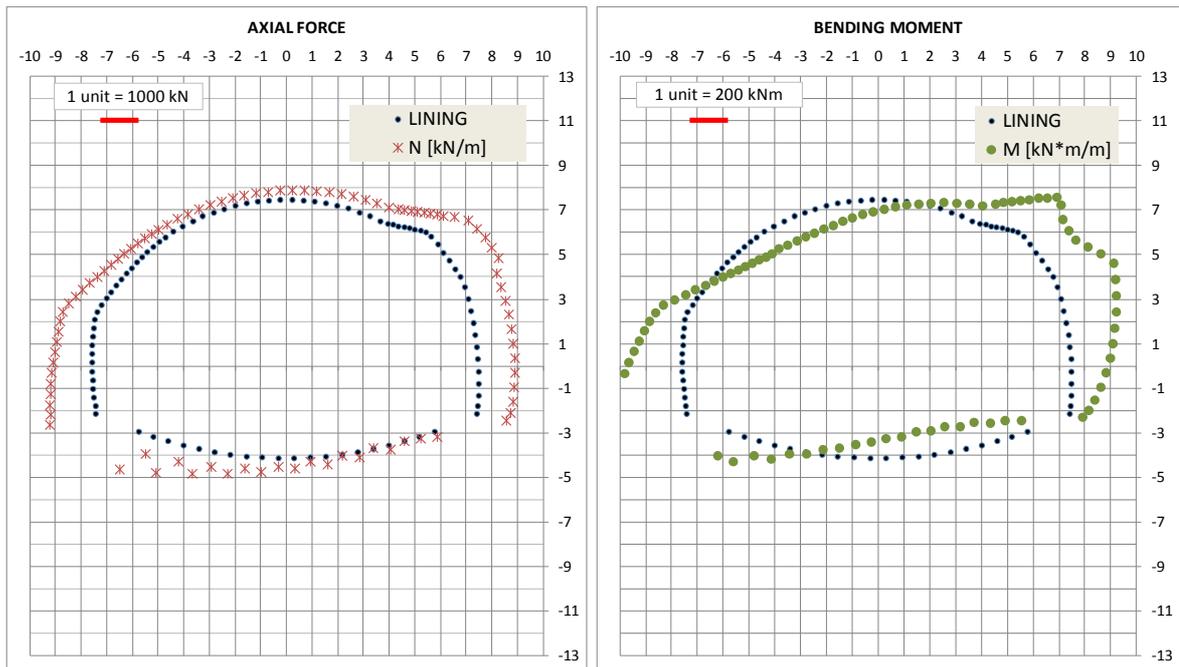


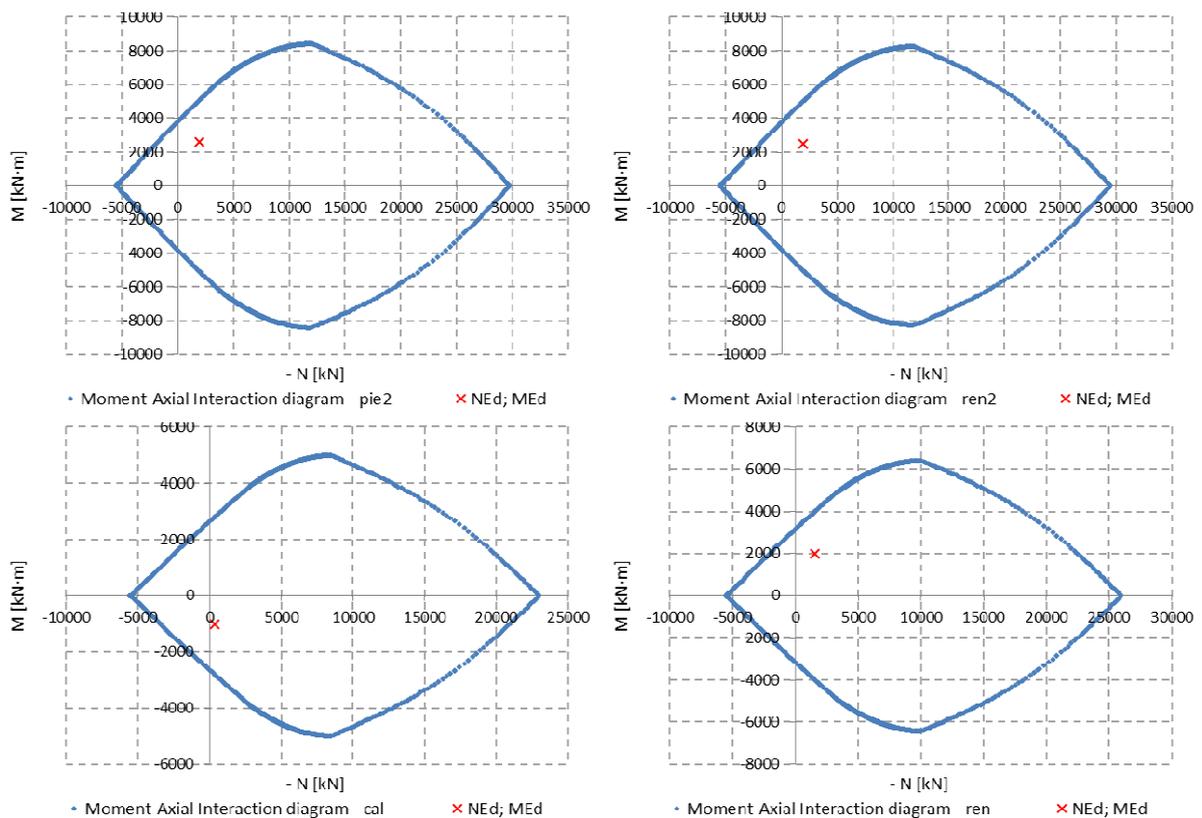
Figura 21 - Diagrammi N e M – Step 5

### 10.3.1 Stato Limite Ultimo

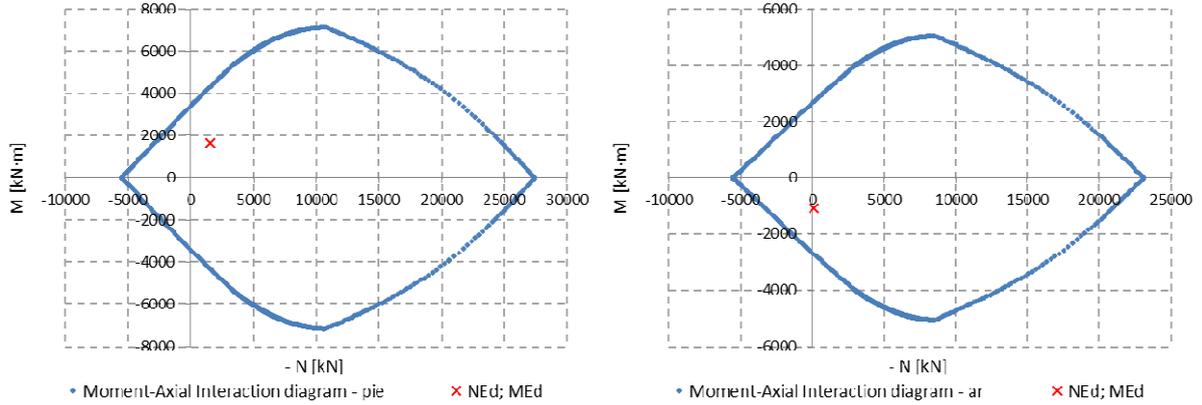
Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati principali delle verifiche condotte. Come è possibile osservare, le verifiche risultano soddisfatte.

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.53	70.69	70.69	7.90	7.90	-1968	2573	5098	2.0
ren2	1.51	70.69	70.69	7.90	7.90	-1923	2485	5006	2.0
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-334	-1011	-2798	2.8
ren	1.29	70.69	70.69	7.90	7.90	-1538	1972	3993	2.0
pie	1.38	70.69	70.69	7.90	7.90	-1568	1660	4329	2.6
ar	1.11	70.69	70.69	7.90	7.90	-113	-1073	-2720	2.5

Tabella 7: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3



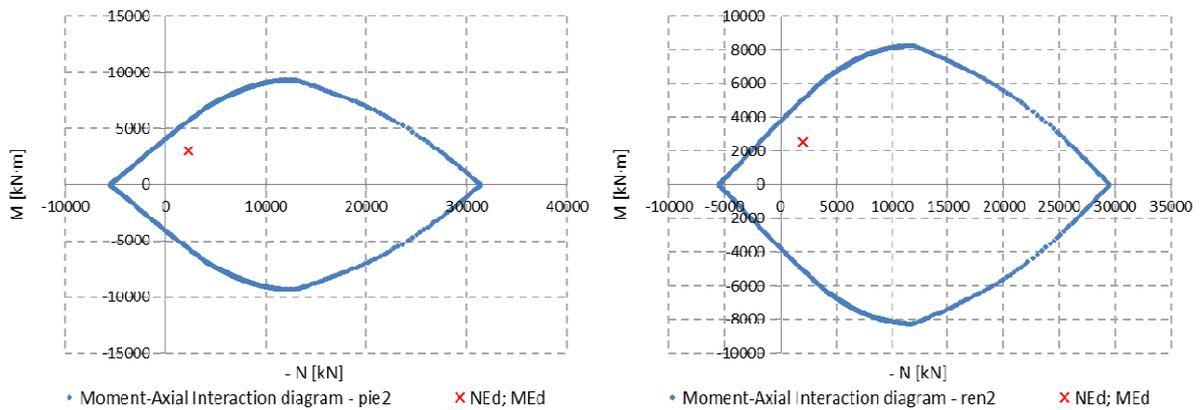
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



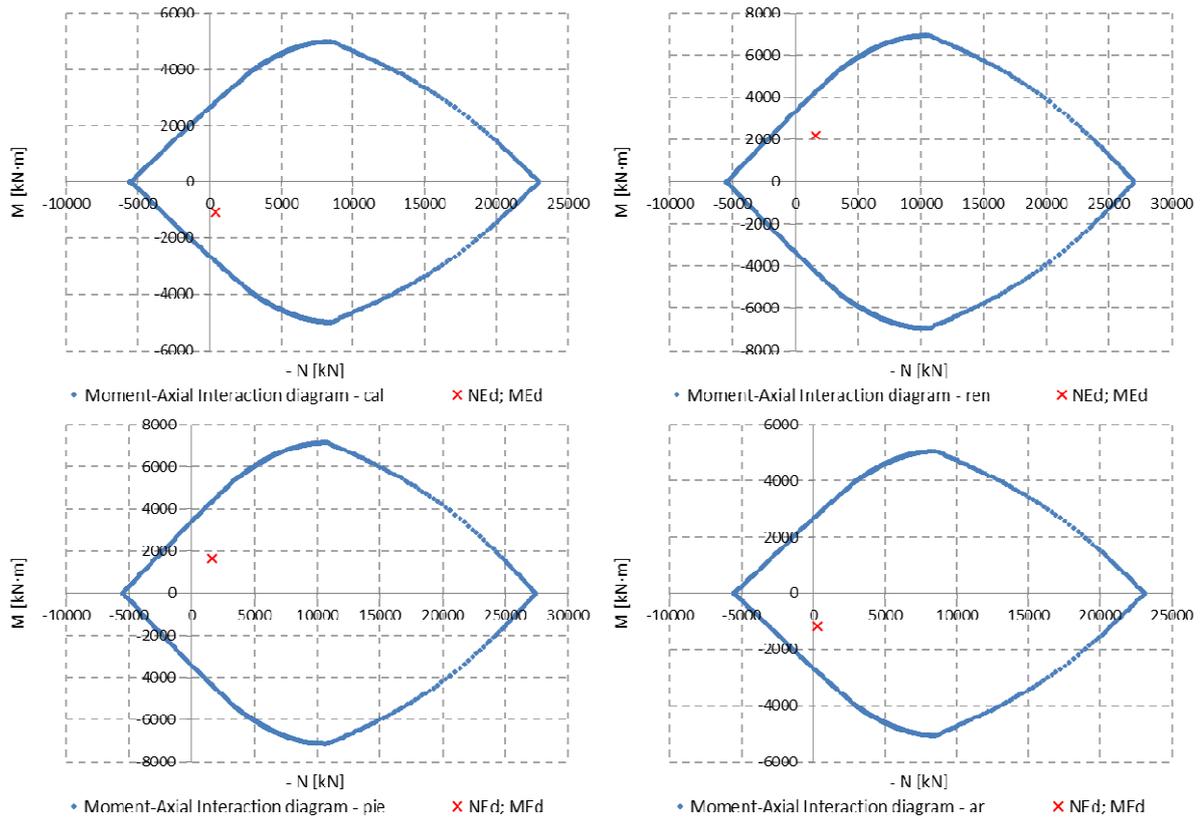
**Figura 22 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3**

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.63	70.69	70.69	7.90	7.90	-2238	2987	5657	1.9
ren2	1.51	70.69	70.69	7.90	7.90	-2047	2546	5083	2.0
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-392	-1082	-2823	2.6
ren	1.36	70.69	70.69	7.90	7.90	-1613	2190	4268	1.9
pie	1.38	70.69	70.69	7.90	7.90	-1641	1655	4371	2.6
ar	1.11	70.69	70.69	7.90	7.90	-279	-1187	-2797	2.4

Tabella 8: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4



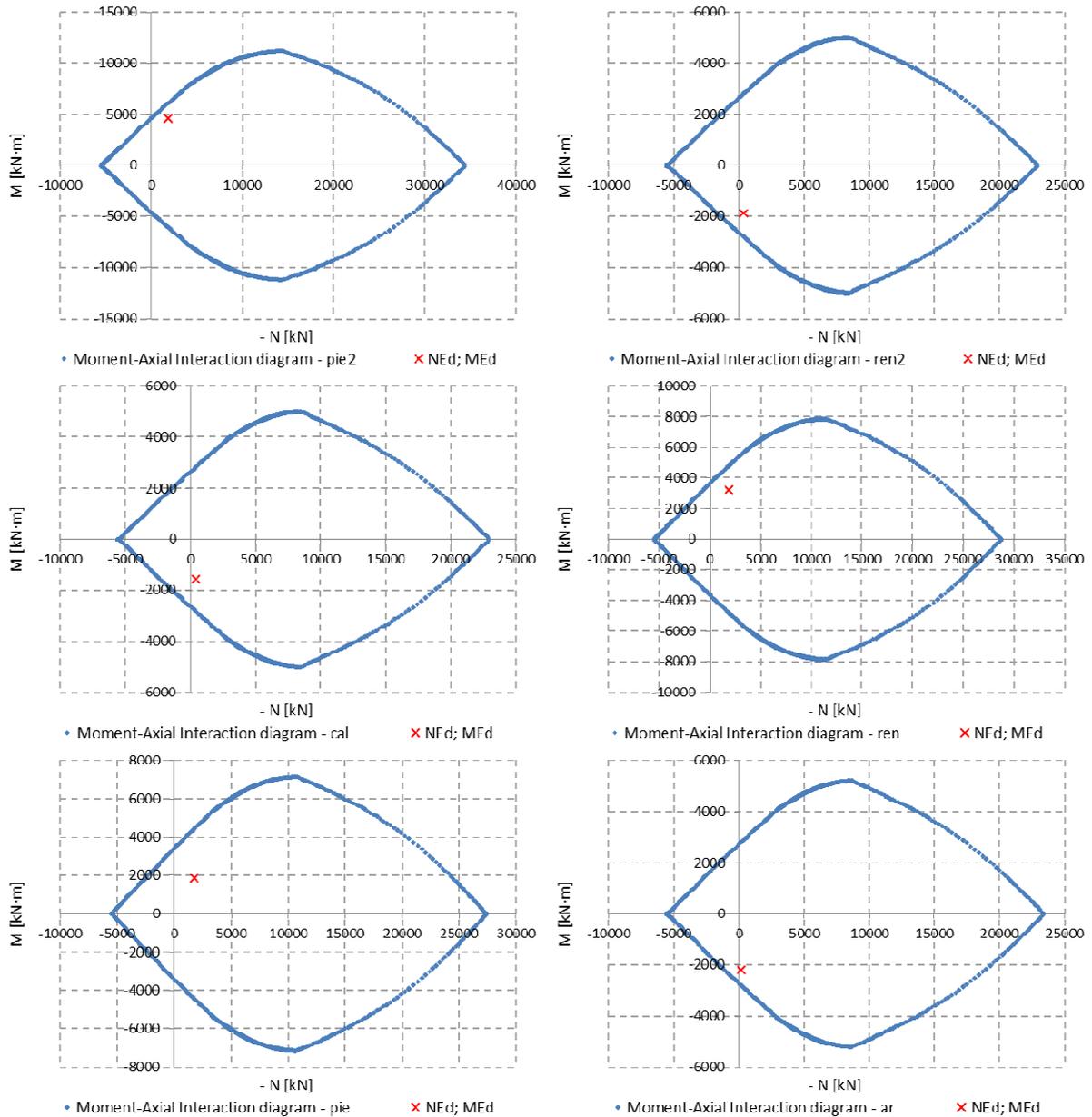
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



**Figura 23 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4**

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.82	70.69	70.69	7.90	7.90	-1862	4639	6101	1.3
ren2	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-346	-1865	-2800	1.5
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-393	-1553	-2823	1.8
ren	1.46	70.69	70.69	7.90	7.90	-1861	3237	4803	1.5
pie	1.38	70.69	70.69	7.90	7.90	-1787	1857	4454	2.4
ar	1.13	70.69	70.69	7.90	7.90	-147	-2196	-2795	1.3

Tabella 9: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5



**Figura 24 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5**

### 10.3.2 Stato Limite di Esercizio

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati delle verifiche condotte (negativi gli sforzi di compressione): come è possibile osservare le tensioni risultano sempre inferiori al limite e la verifica risulta quindi soddisfatta.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$	wk
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.53	70.69	70.69	7.9	7.9	-1514.0	1979.3	-5.9	121.0	0.13
ren2	1.51	70.69	70.69	7.9	7.9	-1479.6	1911.6	-5.8	118.4	0.13
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-257.1	-777.8	-3.7	102.9	0.10
ren	1.29	70.69	70.69	7.9	7.9	-1182.7	1517.2	-6.0	123.5	0.13
pie	1.38	70.69	70.69	7.9	7.9	-1206.5	1276.7	-4.6	81.3	0.08
ar	1.11	70.69	70.69	7.9	7.9	-86.7	-825.4	-3.8	119.8	0.12

Tabella 10: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$	wk
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.57	70.69	70.69	7.9	7.9	-1675.8	2182.0	-6.3	127.1	0.14
ren2	1.51	70.69	70.69	7.9	7.9	-1574.8	1958.6	-6.0	118.3	0.13
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-301.4	-832.1	-4.0	108.5	0.11
ren	1.36	70.69	70.69	7.9	7.9	-1240.7	1684.8	-6.1	129.7	0.14
pie	1.38	70.69	70.69	7.9	7.9	-1261.9	1273.3	-4.6	78.1	0.08
ar	1.11	70.69	70.69	7.9	7.9	-34.5	-866.5	-3.9	128.7	0.13

Tabella 11: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]
pie2	1.82	70.69	70.69	7.9	7.9	-1768.4	3066.9	-6.8	163.7
ren2	1.51	70.69	70.69	7.9	7.9	-1506.0	2084.2	-6.3	134.8
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-358.5	-990.4	-4.8	129.1
ren	1.36	70.69	70.69	7.9	7.9	-1422.1	1969.4	-7.1	153.2

pie	1.38	70.69	70.69	7.9	7.9	-1412.5	1331.5	-4.8	77.1
ar	1.12	70.69	70.69	7.9	7.9	-249.5	-1185.6	-5.4	161.7

Tabella 12: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b

#### 10.4 Verifiche a taglio

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche condotte, tutte con esito positivo.

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	$\sigma_{cp}$	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	378	-2038	1897	1.325	7068.6	19759	-1.032	952	829	2.52
ren2	-651	-999	1079	1.431	7068.6	11577	-0.863	628	481	0.96
cal	521	-578	1017	1.444	7068.6	10958	-0.527	554	407	1.06
ren	542	-626	1020	1.443	7068.6	10994	-0.570	562	415	1.04
pie	-1023	-1416	1897	1.325	7068.6	19759	-0.717	863	740	0.84
ar	-766	-141	1085	1.429	7068.6	11645	-0.121	510	363	0.67

Tabella 13: Verifica a taglio – Step 3

ELEMENT	VEk	d	z	$\Phi_w$	n. equ. arm/m	Asw	$\theta$	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
ren2	-501	1079	971	14	8.3	1282.8	35	696	3815	1.07
pie	-787	1897	1707	14	8.3	1282.8	35	1224	6651	1.20
ar	-589	1085	977	14	16.7	2565.6	35	1401	3669	1.83

Tabella 14: Verifica a taglio – Step 3 – con spilli

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	$\sigma_{cp}$	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	-457	-2115	1448	1.372	7068.6	15273	-1.385	871	732	1.91
ren2	-661	-995	1079	1.431	7068.6	11577	-0.860	628	481	0.95
cal	540	-683	1017	1.444	7068.6	10958	-0.623	569	422	1.05
ren	555	-733	1020	1.443	7068.6	10994	-0.666	577	429	1.04

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

pie	-1117	-1461	1897	1.325	7068.6	19759	-0.740	869	746	0.78
ar	-861	-168	1085	1.429	7068.6	11645	-0.145	514	367	0.60

Tabella 15: Verifica a taglio – Step 4

ELEMENT	VEk	d	z	$\Phi w$	n. equ. arm/m	Asw	$\theta$	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
ren2	-509	1079	971	14	8.3	1282.8	35	696	3815	1.05
pie	-859	1897	1707	14	8.3	1282.8	35	1224	6660	1.10
ar	-662	1085	977	14	16.7	2565.6	35	1401	3675	1.63

Tabella 16: Verifica a taglio – Step 4 – con spilli

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	$\sigma_{cp}$	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	-1206	-1520	1448	1.372	7068.6	15273	-0.995	786	647	0.65
ren2	-1200	-1363	1439	1.373	7068.6	15177	-0.898	762	622	0.63
cal	661	-817	1019	1.443	7068.6	10976	-0.745	588	441	0.89
ren	650	-1043	1020	1.443	7068.6	10994	-0.949	620	473	0.95
pie	-1331	-1609	1743	1.339	7068.6	18220	-0.883	860	731	0.65
ar	-1664	-345	1085	1.429	7068.6	11645	-0.296	538	392	0.32

Tabella 17: Verifica a taglio – Step 5

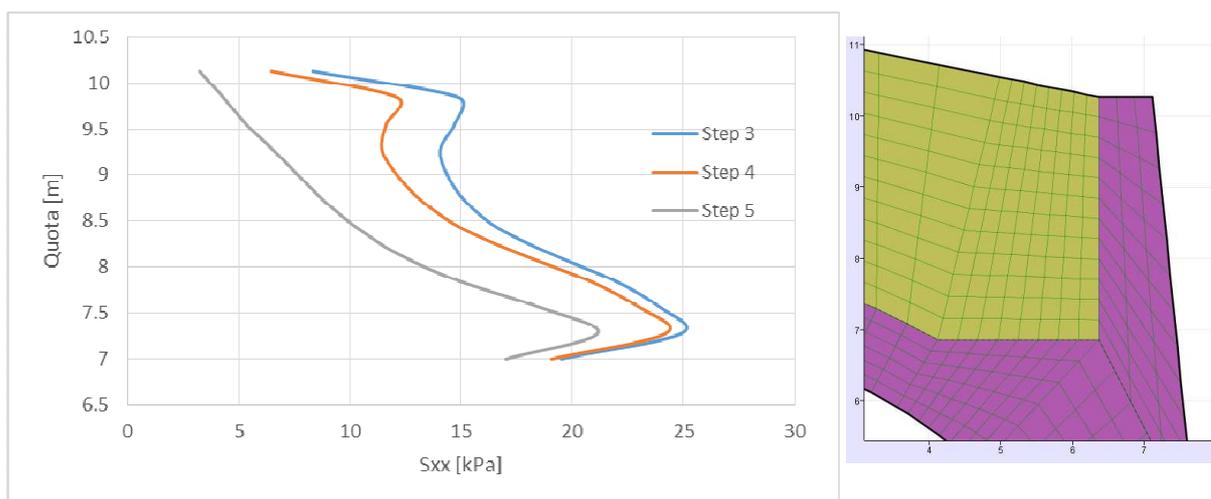
ELEMENT	VEk	d	z	$\Phi w$	n. equ. arm/m	Asw	$\theta$	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	-1206	1448	1304	14	8.3	1282.8	25	1403	4209	1.16
ren2	-1200	1439	1295	14	8.3	1282.8	25	1394	4157	1.16
cal	661	1019	917	14	8.3	1282.8	25	987	2916	1.49
ren	650	1020	918	14	8.3	1282.8	25	989	2957	1.52
pie	-1331	1743	1569	14	8.3	1282.8	25	1689	5032	1.27
ar	-1664	1085	977	14	16.7	2565.6	25	2103	3024	1.26

Tabella 18: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli

### 10.5 Veletta

Per la verifica della veletta sulla galleria artificiale, si considera una mensola alta 3.4m incastrata alla base e soggetta alla spinta orizzontale del terreno di ritombamento.

La spinta del terreno si ottiene integrando gli sforzi orizzontali  $S_{xx}$  nella zona di contatto: risulta una pressione massima di 25kPa e una spinta totale inferiore a 56kN/m.



**Figura 25 - Pressione del terreno sulla veletta**

Teoricamente, alla base della mensola si ha uno sforzo verticale  $S_{yy}$  di 74.8kPa (con  $\gamma=22\text{kN/m}^3$ ) e, con  $\phi=30^\circ$  risulta  $S_{xx}=24.9\text{kPa}$  in spinta attiva e  $S_{xx}=37.4\text{kPa}$  a riposo; si ottiene una spinta che varia da 34.3kN/m a 54.7kN/m, in linea col risultato della modellazione numerica, che tiene conto anche dell'inclinazione del pendio.

Si assume quindi una spinta orizzontale di 56kN/m agente sulla veletta ad 1/3 rispetto al punto di incastro (braccio di 1.13m), che corrisponde ad una spinta inferiore a 65kNm/m.

La veletta, di sezione massima pari ad 1m, è armata con dei ferri  $\phi 20$  ogni 20cm su ambo i lati, con ripartitori  $\phi 12$  e spilli  $\phi 12$  a maglia 30x40 cm.

Il valore del copriferro adottato nelle verifiche è di 5cm.

La verifica a taglio risulta soddisfatta, così come quelle a pressoflessione.

V [kN]	$V_{sd}$ [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]
56	73	280

Tabella 19: Verifica a taglio

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

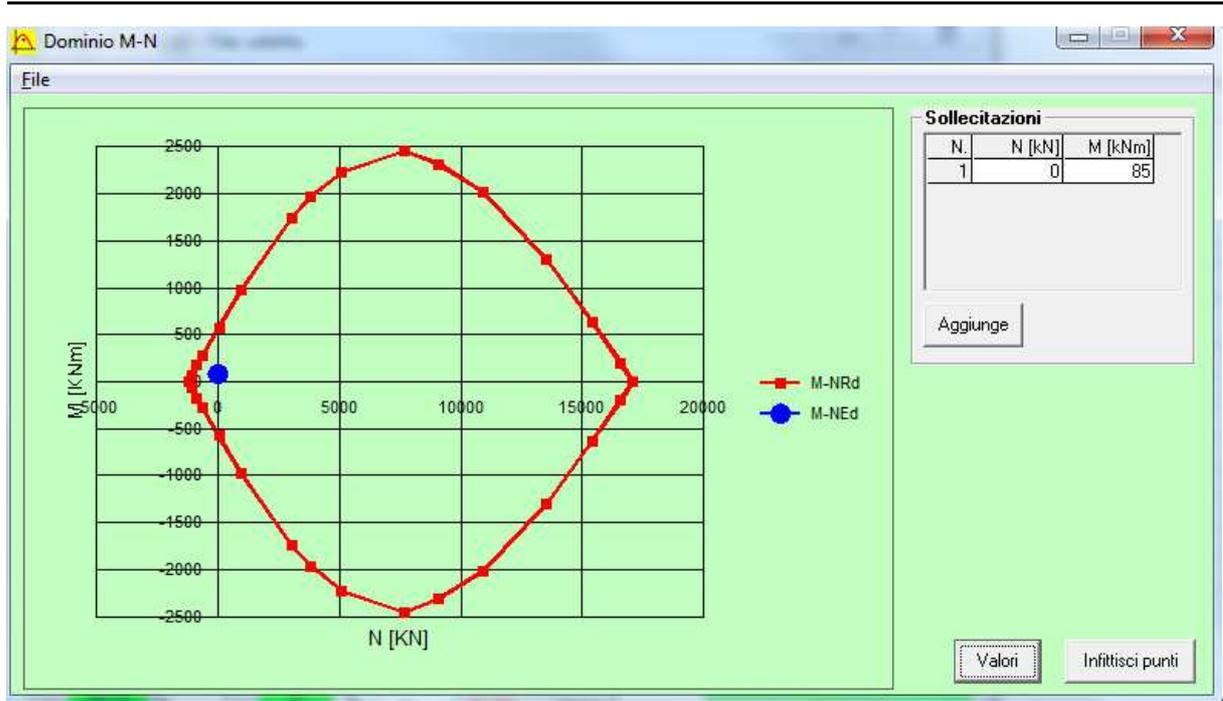


Figura 26 - Verifica a pressoflessione SLU

N*	b [cm]	h [cm]	N*	As [cm <sup>2</sup> ]	d [cm]
1	100	100	1	15.71	7.2
			2	15.71	92.8

Sollecitazioni		Metodo n	
N <sub>Ed</sub>	0	0	kN
M <sub>xEd</sub>	85	65	kNm
M <sub>yEd</sub>	0	0	

P.to applicazione N	
<input checked="" type="radio"/> Centro	<input type="radio"/> Baricentro cls
<input type="radio"/> Coord.[cm]	xN 0 yN 0

Materiali	
<b>B450C</b>	<b>C28/35</b>
ε <sub>su</sub> 67.5 ‰	ε <sub>c2</sub> 2 ‰
f <sub>yd</sub> 391.3 N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>cu</sub> 3.5 ‰
E <sub>s</sub> 200,000 N/mm <sup>2</sup>	f <sub>cd</sub> 15.87
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0.8
ε <sub>syd</sub> 1.957 ‰	σ <sub>c,adm</sub> 11
σ <sub>s,adm</sub> 255 N/mm <sup>2</sup>	τ <sub>co</sub> 0.6667
	τ <sub>c1</sub> 1.971

σ <sub>c</sub>	-0.7388 N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>s</sub>	47.68 N/mm <sup>2</sup>
ε <sub>s</sub>	0.2384 ‰
d	92.8 cm
x	17.5
w/d	0.1886
α	0.7

Metodo di calcolo

S.L.U.+     S.L.U.-

Metodo n

**Verifica**      N\* iterazioni: 5

Precompresso

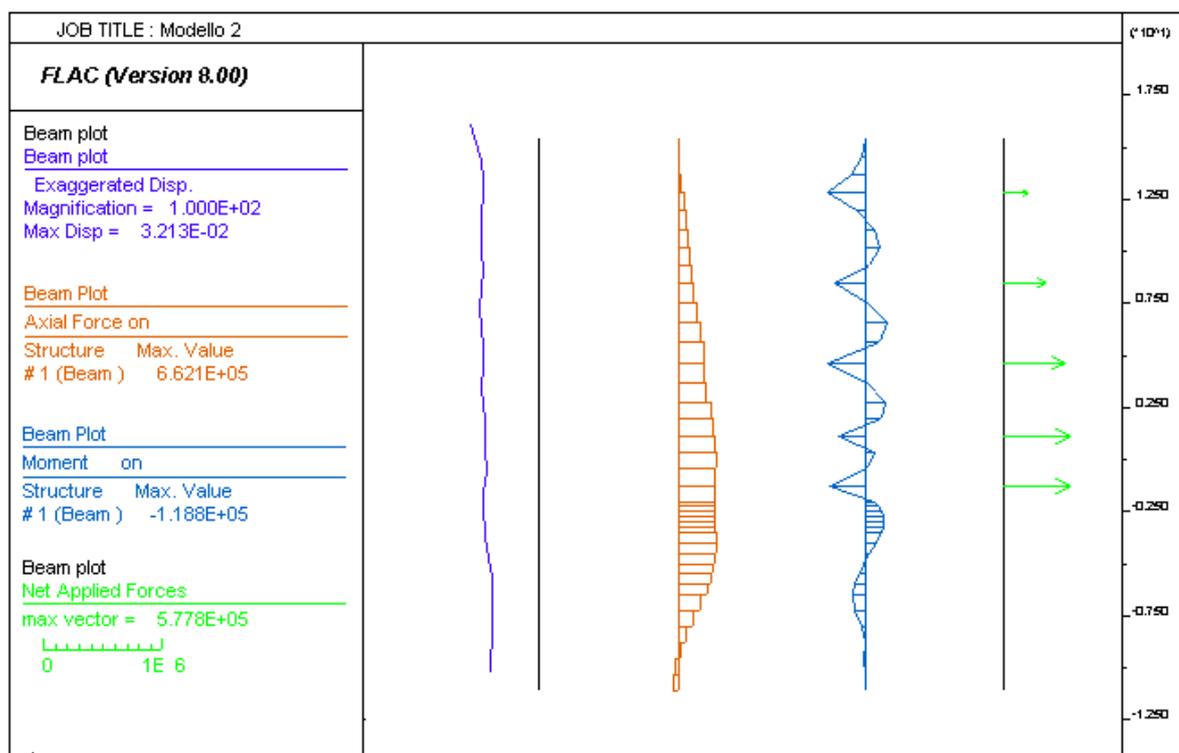
Figura 27 - Verifica a pressoflessione SLE

Per la tensione di trazione prevista nell'armatura, l'apertura delle fessure è nulla.

## 11 MODELLO 2 – GA asim - nord

### 11.1 Palificata

Grazie alla modellazione adottata e alla fasi costruttive analizzate, è possibile ottenere il corretto stato di sforzo e deformativo del terreno nella fase antecedente la realizzazione della galleria.



**Figura 28 - Comportamento della palificata**

A fondo scavo, la paratia di micropali ha uno spostamento massimo di 32 mm (paragonabili a quelli ottenuti con Paratie 8.0) Il momento flettente arriva a 119kNm/m (inferiore a 180.51kNm ottenuto con Paratie a fondo scavo).

Considerando che i risultati sono paragonabili a quelli ottenuti per la sezione di calcolo 3 dell’imbocco nord di San Pietro con Paratie 8.0, è corretto proseguire con la simulazione delle fasi realizzative della galleria artificiale.

### 11.2 Spostamenti

Il codice di calcolo ha permesso di valutare il regime deformativo corrispondente ad ogni step di calcolo; la tabella seguente riporta gli spostamenti verticali della galleria nelle differenti fasi di calcolo, dimostrando una deformazione contenuta sia in fase statica che in

fase sismica:

Sezione	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Calotta	5.7	17.5	17.3	17.9
Arco rovescio	5.3	12.0	12.6	13.9
Convergenza radiale	0.4	5.5	4.7	4.0

Tabella 20: Spostamento verticale [mm]

Si rimanda agli output Flac in allegato per ulteriori informazioni sulle deformazioni nel modello di calcolo.

### 11.3 Verifiche a pressoflessione

In calotta e in arco rovescio si prevedono dei ferri  $\varnothing 30$  ogni 10cm su ambo i lati, con ripartitori  $\varnothing 14$  e spilli  $\varnothing 14$  a maglia 30x40 cm, localmente ridotta a 30x20 in corrispondenza della base dei piedritti e dell’attacco dell’arco rovescio.

Il valore del copriferro adottato nelle verifiche è di 5cm.

Le tensioni presenti nella galleria artificiale nelle successive fasi di calcolo vengono integrate per ottenere le sollecitazioni N, M e V.

Le seguenti figure mostrano l’andamento di N e di M nei diversi step di calcolo.

Segue la verifica strutturale delle sezioni maggiormente sollecitate nelle diversi parti della galleria.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

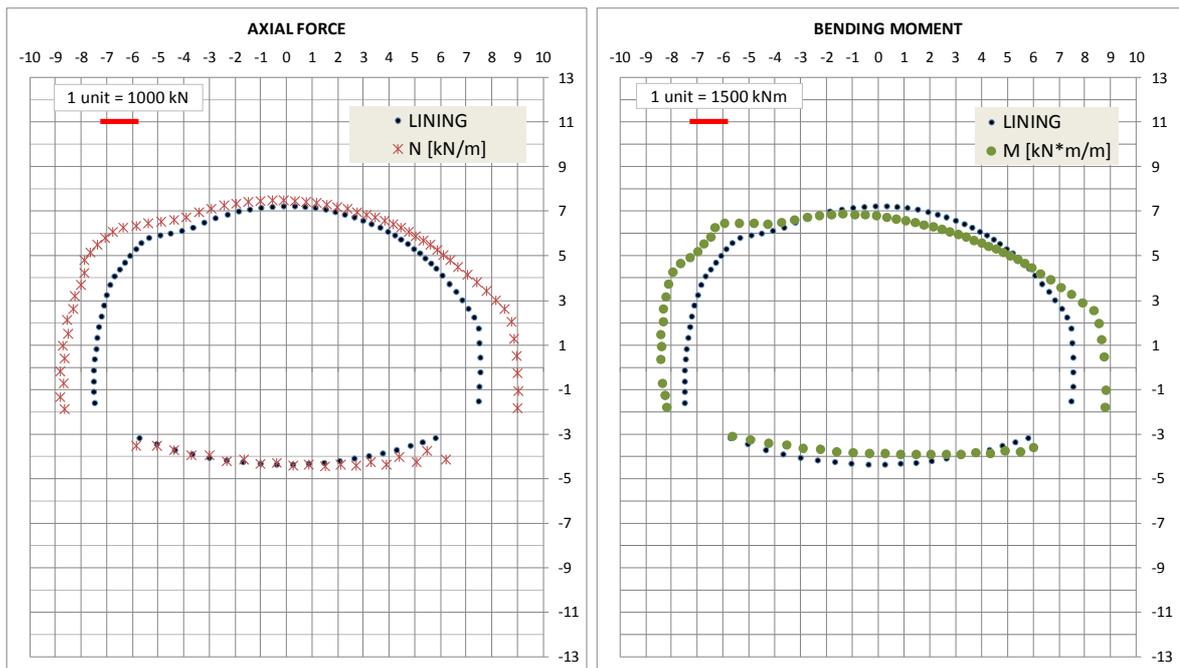


Figura 29 - Diagrammi N e M – Step 3

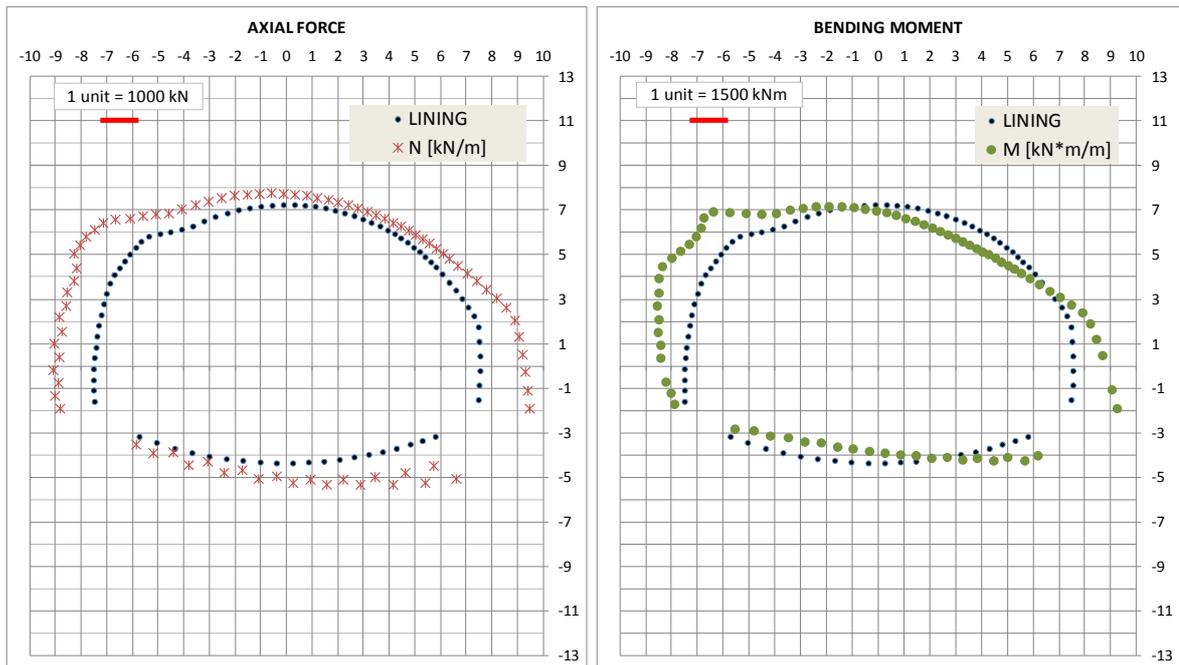


Figura 30 - Diagrammi N e M – Step 4

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

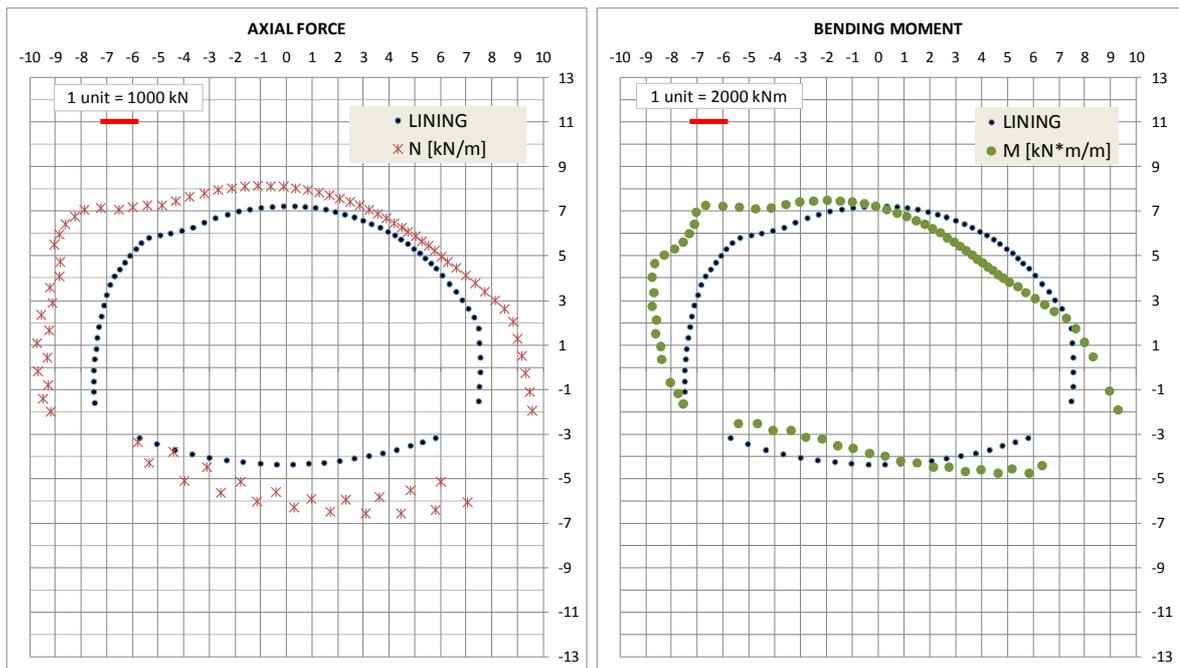


Figura 31 - Diagrammi N e M – Step 5

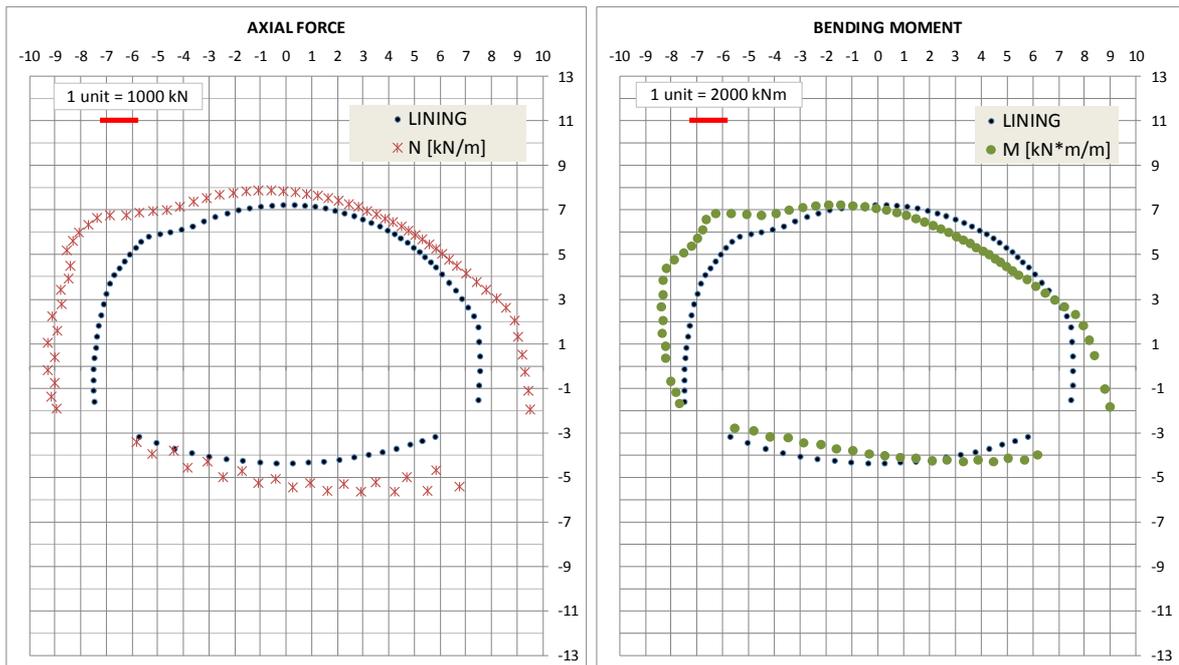


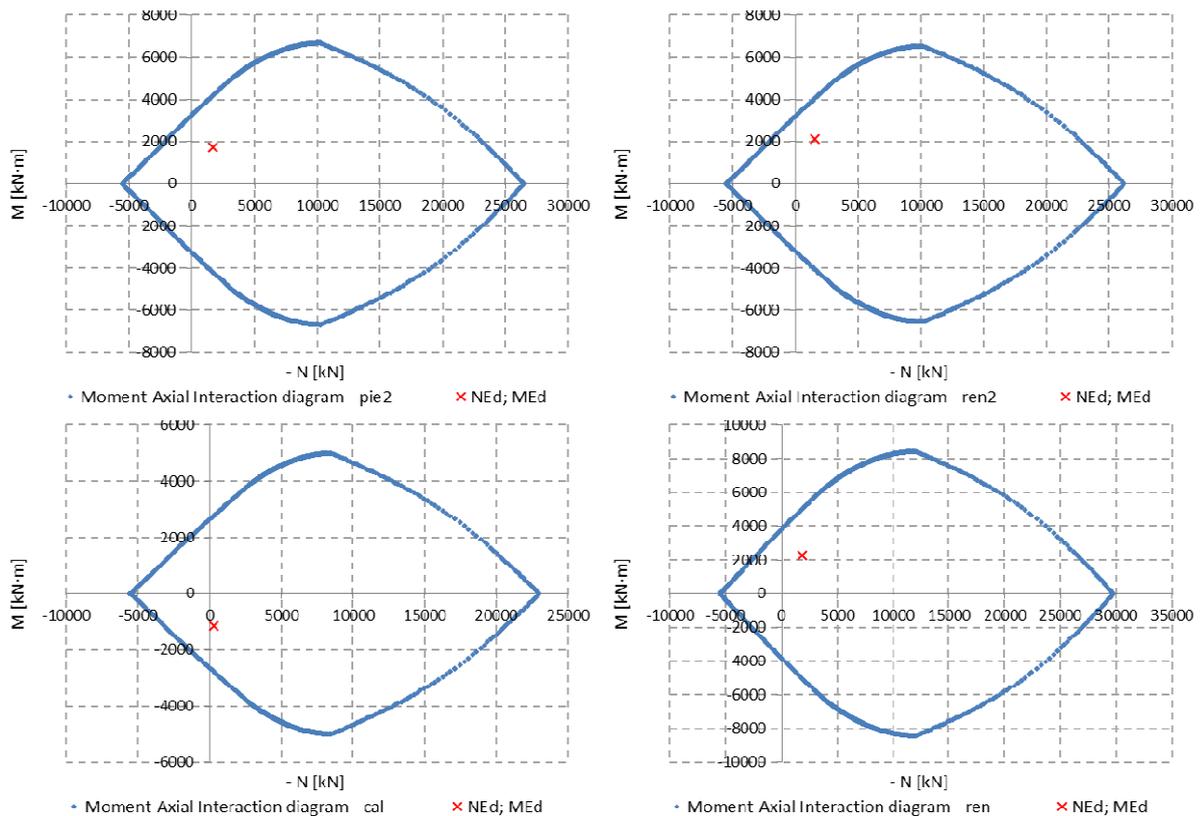
Figura 32 - Diagrammi N e M – Step 5b

### 11.3.1 Stato Limite Ultimo

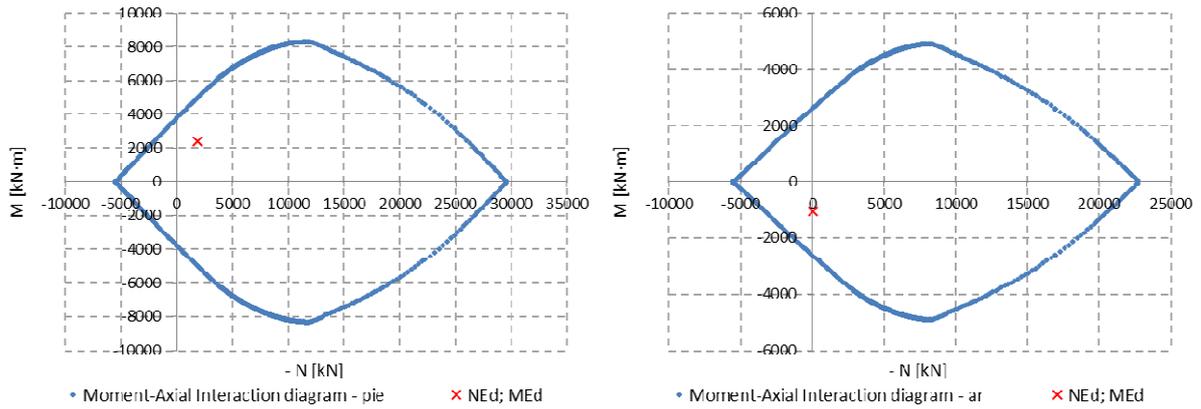
Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati principali delle verifiche condotte. Come è possibile osservare, le verifiche risultano soddisfatte.

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.90	7.90	-1710	1740	4204	2.4
ren2	1.30	70.69	70.69	7.90	7.90	-1520	2102	4040	1.9
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-321	-1132	-2794	2.5
ren	1.53	70.69	70.69	7.90	7.90	-1829	2295	5015	2.2
pie	1.52	70.69	70.69	7.90	7.90	-1888	2390	5005	2.1
ar	1.09	70.69	70.69	7.90	7.90	-24	-1046	-2622	2.5

Tabella 21: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3



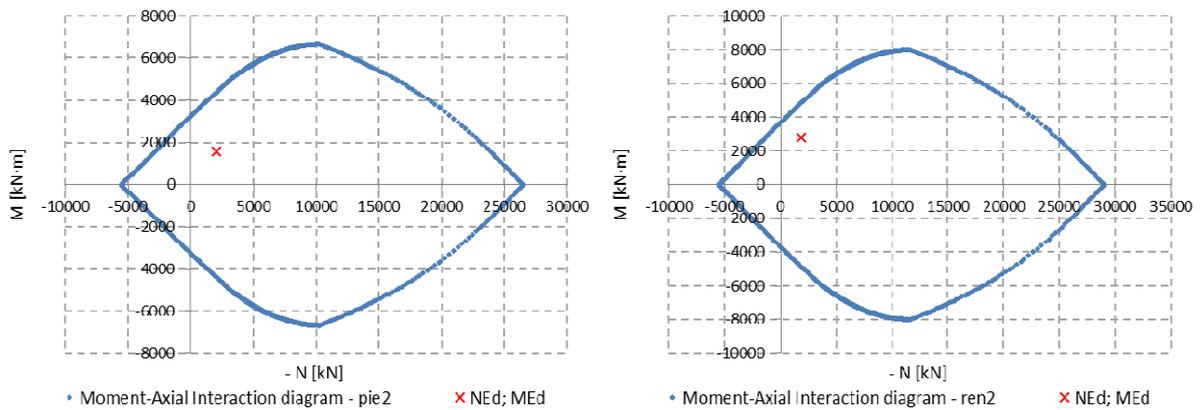
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



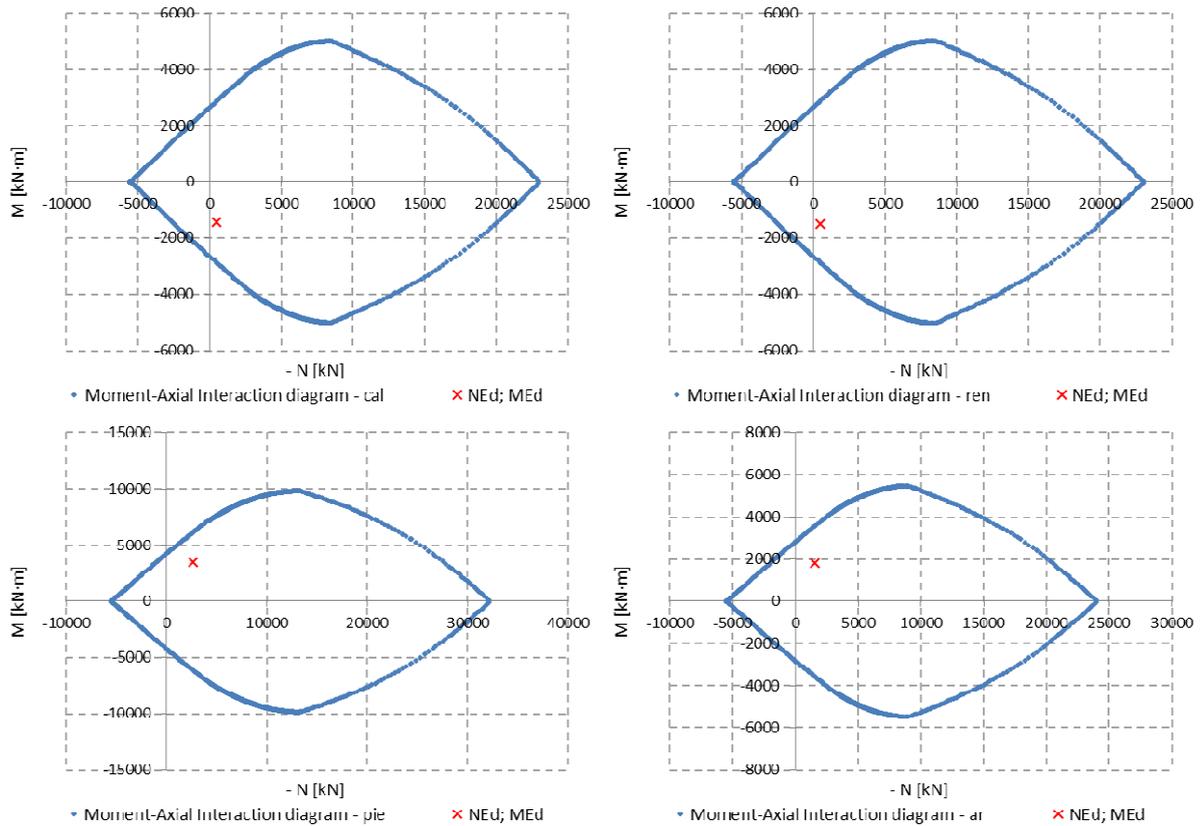
**Figura 33 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3**

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.90	7.90	-2063	1579	4395	2.8
ren2	1.48	70.69	70.69	7.90	7.90	-1862	2821	4859	1.7
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-471	-1445	-2868	2.0
ren	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-495	-1488	-2884	1.9
pie	1.68	70.69	70.69	7.90	7.90	-2615	3463	6125	1.8
ar	1.17	70.69	70.69	7.90	7.90	-1577	1826	3589	2.0

Tabella 22: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4



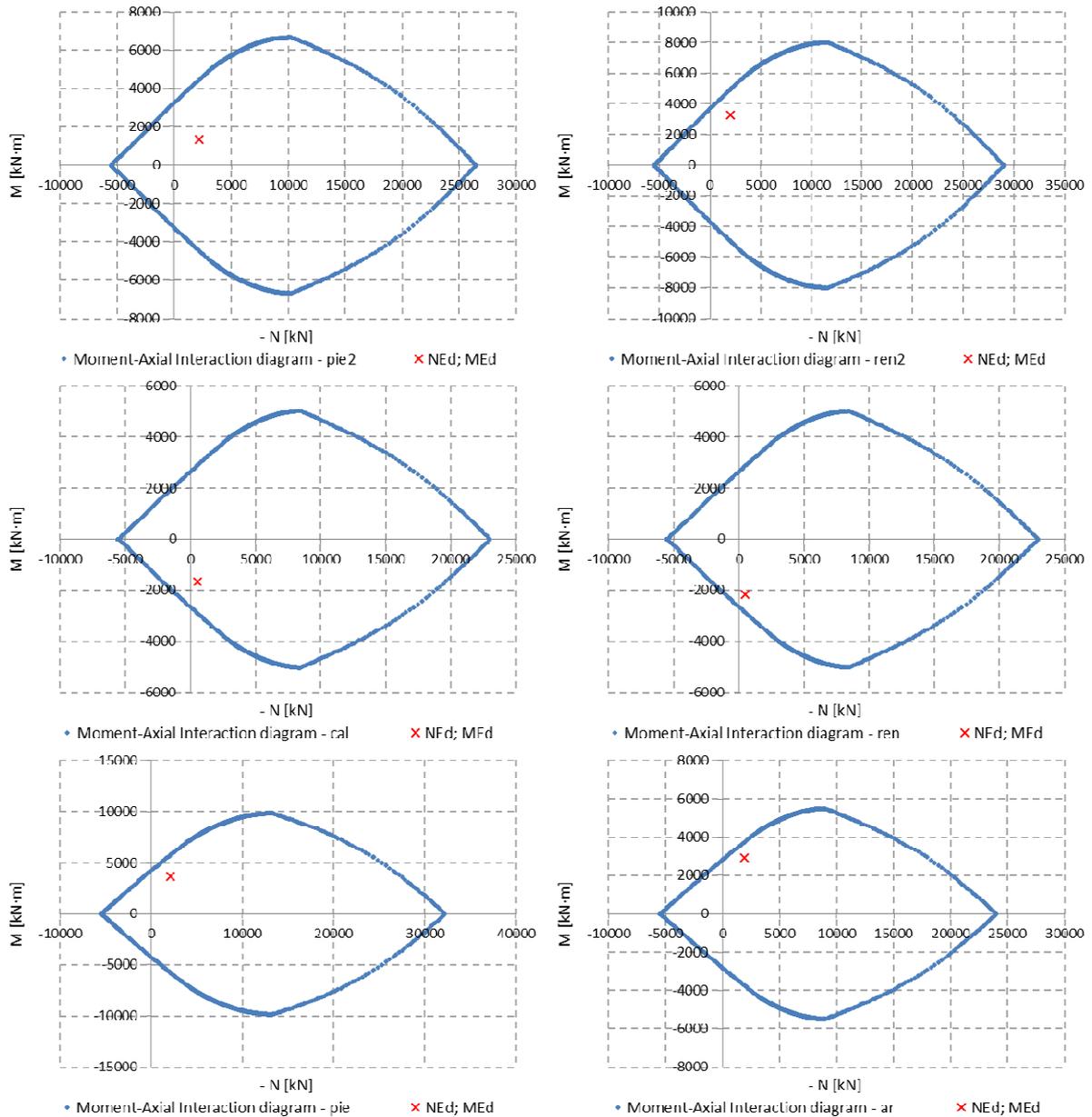
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



**Figura 34 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4**

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.90	7.90	-2196	1345	4467	3.3
ren2	1.48	70.69	70.69	7.90	7.90	-2011	3269	4950	1.5
cal	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-519	-1650	-2889	1.8
ren	1.10	70.69	70.69	7.90	7.90	-451	-2168	-2855	1.3
pie	1.68	70.69	70.69	7.90	7.90	-2136	3628	5789	1.6
ar	1.17	70.69	70.69	7.90	7.90	-1915	2929	3748	1.3

Tabella 23: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5



**Figura 35 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5**

### 11.3.2 Stato Limite di Esercizio

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati delle verifiche condotte (negativi gli sforzi di compressione): come è possibile osservare le tensioni risultano sempre inferiori al limite e la verifica risulta quindi soddisfatta.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$	wk
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.9	7.9	-1315.7	1338.3	-5.2	89.8	0.09
ren2	1.30	70.69	70.69	7.9	7.9	-1169.4	1616.7	-6.2	133.8	0.14
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-236.3	-867.7	-4.1	117.7	0.12
ren	1.53	70.69	70.69	7.9	7.9	-1407.0	1765.3	-5.3	104.8	0.12
pie	1.52	70.69	70.69	7.9	7.9	-1452.5	1838.5	-5.6	111.6	0.12
ar	1.09	70.69	70.69	7.9	7.9	119.0	-769.0	-3.4	126.2	0.13

Tabella 24: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$	wk
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.9	7.9	-1586.7	1214.7	-4.8	62.7	0.06
ren2	1.48	70.69	70.69	7.9	7.9	-1432.0	2169.9	-6.8	152.7	0.17
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-362.6	-1111.6	-5.3	146.9	0.15
ren	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-380.6	-1144.3	-5.5	150.4	0.15
pie	1.68	70.69	70.69	7.9	7.9	-2011.3	2663.5	-6.8	137.2	0.16
ar	1.11	70.69	70.69	7.9	7.9	-232.7	-1016.2	-4.8	139.5	0.14

Tabella 25: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	$\sigma_c$	$\sigma_s$
[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]
pie2	1.32	70.69	70.69	7.9	7.9	-1798.1	-1211.2	-4.8	53.3
ren2	1.48	70.69	70.69	7.9	7.9	-1633.8	2516.6	-7.8	178.6
cal	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-415.9	-1286.7	-6.2	170.2
ren	1.10	70.69	70.69	7.9	7.9	-445.2	-1433.5	-6.8	190.5

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

pie	1.68	70.69	70.69	7.9	7.9	-2058.9	3004.6	-7.7	165.7
ar	1.17	70.69	70.69	7.9	7.9	-1428.9	1829.2	-8.4	175.3

Tabella 26: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b

#### 11.4 Verifiche a taglio

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche condotte, tutte con esito positivo.

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	$\sigma_{cp}$	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	737	-1710	1446	1.372	7068.6	15249	-1.122	813	674	1.10
ren2	-563	-692	1021	1.443	7068.6	11000	-0.629	571	424	1.01
cal	-532	-584	1022	1.442	7068.6	11007	-0.530	556	409	1.05
ren	707	-892	1033	1.440	7068.6	11116	-0.802	602	455	0.85
pie	233	-1888	1437	1.373	7068.6	15156	-1.246	836	697	3.59
ar	842	-76	1073	1.432	7068.6	11517	-0.066	498	351	0.59

Tabella 27: Verifica a taglio – Step 3

ELEMENT	VEk	d	z	$\Phi_w$	n. equ. arm/m	Asw	$\theta$	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
ren	544	1033	929	14	8.3	1282.8	30	808	3354	1.14
ar	648	1073	965	14	16.7	2565.6	30	1679	3330	1.99

Tabella 28: Verifica a taglio – Step 3 – con spilli

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	$\sigma_{cp}$	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	1043	-1973	1446	1.372	7068.6	15249	-1.294	850	711	0.81
ren2	-646	-1046	1016	1.444	7068.6	10948	-0.956	619	472	0.96
cal	-664	-871	1017	1.443	7068.6	10961	-0.794	595	448	0.90
ren	1048	-1898	1665	1.347	7068.6	17440	-1.089	886	754	0.85

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

pie	914	-2276	1437	1.373	7068.6	15156	-1.502	891	752	0.98
ar	-1078	-517	1014	1.444	7068.6	10929	-0.473	545	398	0.51

Tabella 29: Verifica a taglio – Step 4

ELEMENT	VEk	d	z	Φw	n. equ. arm/m	Asw	θ	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	803	1446	1301	14	8.3	1282.8	30	1131	4835	1.08
ren2	-497	1016	914	14	8.3	1282.8	30	795	3330	1.23
cal	-511	1017	915	14	8.3	1282.8	30	796	3302	1.20
ren	806	1665	1498	14	8.3	1282.8	30	1303	5501	1.24
pie	703	1437	1293	14	8.3	1282.8	30	1124	4862	1.23
ar	-829	1014	913	14	16.7	2565.6	30	1587	3228	1.47

Tabella 30: Verifica a taglio – Step 4 – con spilli

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	σcp	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	1508	-1735	1596	1.354	7068.6	16748	-1.036	848	714	0.56
ren2	1111	-2304	1195	1.409	7068.6	12743	-1.808	839	694	0.76
cal	-780	-876	1023	1.442	7068.6	11020	-0.795	597	450	0.77
ren	1354	-1601	1450	1.371	7068.6	15286	-1.048	798	659	0.59
pie	1390	-1743	1437	1.373	7068.6	15156	-1.150	815	676	0.59
ar	-1798	-445	1029	1.441	7068.6	11078	-0.402	539	392	0.30

Tabella 31: Verifica a taglio – Step 5

ELEMENT	VEk	d	z	Φw	n. equ. arm/m	Asw	θ	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm <sup>2</sup> /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	1508	1596	1436	14	8.3	1282.8	25	1546	4649	1.03
ren2	1111	1195	1076	14	8.3	1282.8	25	1158	3641	1.04
cal	-780	1023	921	14	8.3	1282.8	25	991	2938	1.27
ren	1354	1450	1305	14	8.3	1282.8	25	1404	4226	1.04

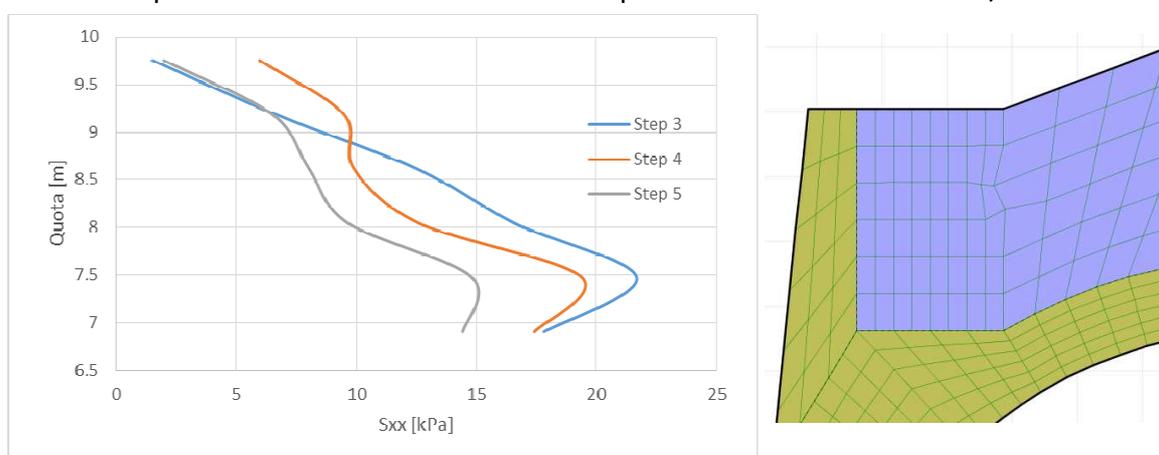
pie	1390	1437	1293	14	8.3	1282.8	25	1392	4214	1.00
ar	-1798	1029	926	14	16.7	2565.6	25	1994	2885	1.11

Tabella 32: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli

### 11.5 Veletta

Per la verifica della veletta sulla galleria artificiale, si considera una mensola alta 3.4m incastrata alla base e soggetta alla spinta orizzontale del terreno di ritombamento.

La spinta del terreno si ottiene integrando gli sforzi orizzontali  $S_{xx}$  nella zona di contatto: risulta una pressione massima di 25kPa e una spinta totale inferiore a 56kN/m.



**Figura 36 - Pressione del terreno sulla veletta**

Teoricamente, alla base della mensola si ha uno sforzo verticale  $S_{yy}$  di 74.8kPa (con  $\gamma=22\text{kN/m}^3$ ) e, con  $\phi=30^\circ$  risulta  $S_{xx}=24.9\text{kPa}$  in spinta attiva e  $S_{xx}=37.4\text{kPa}$  a riposo; si ottiene una spinta che varia da 30.7kN/m a 43.4kN/m, in linea col risultato della modellazione numerica, che tiene conto anche dell'inclinazione del pendio.

Si assume quindi una spinta orizzontale di 45kN/m agente sulla veletta ad 1/3 rispetto al punto di incastro (braccio di 1.13m), che corrisponde ad un momento inferiore a 51kNm/m.

La veletta, di sezione massima pari ad 1m, è armata con dei ferri  $\phi 20$  ogni 20cm su ambo i lati, con ripartitori  $\phi 12$  e spilli  $\phi 12$  a maglia 30x40 cm.

Il valore del copriferro adottato nelle verifiche è di 5cm.

La verifica a taglio risulta soddisfatta, così come quelle a presoflessione.

V [kN]	V <sub>sd</sub> [kN]	V <sub>Rd,c</sub> [kN]
45	58.5	280

Tabella 33: Verifica a taglio

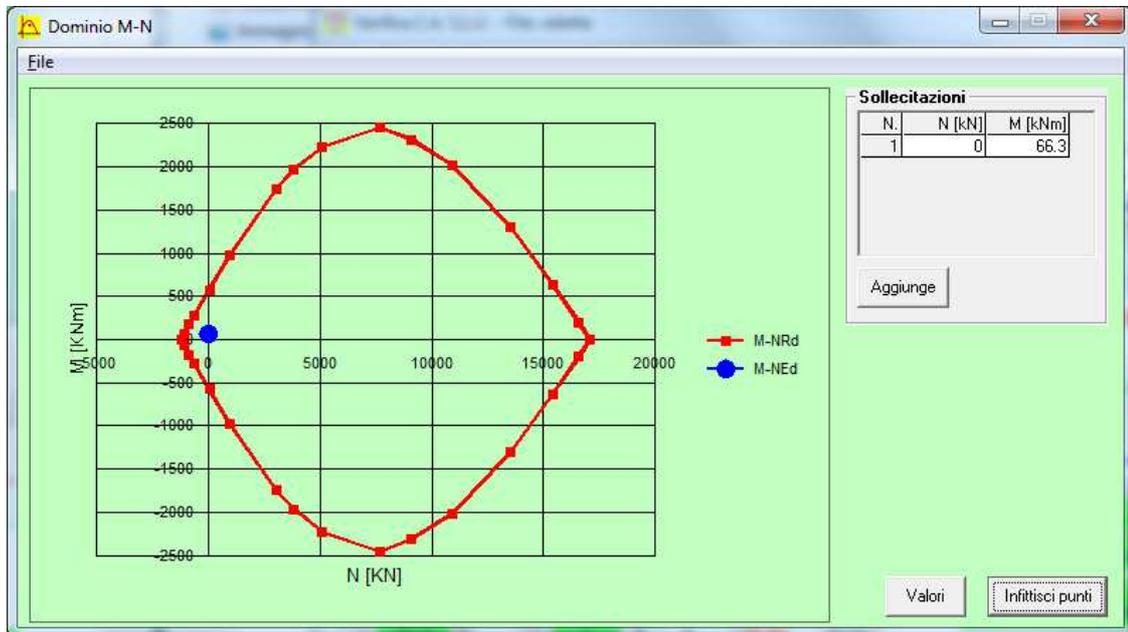


Figura 37 - Verifica a pressoflessione SLU

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>N*</th> <th>b [cm]</th> <th>h [cm]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> </table>	N*	b [cm]	h [cm]	1	100	100	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>N*</th> <th>As [cm<sup>2</sup>]</th> <th>d [cm]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>15.71</td> <td>7.2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>15.71</td> <td>92.8</td> </tr> </table>	N*	As [cm <sup>2</sup> ]	d [cm]	1	15.71	7.2	2	15.71	92.8	<input type="radio"/> Rettangoli <input type="radio"/> Coord.	
N*	b [cm]	h [cm]																
1	100	100																
N*	As [cm <sup>2</sup> ]	d [cm]																
1	15.71	7.2																
2	15.71	92.8																
<p><b>Sollecitazioni</b></p> <p>S.L.U.    Metodo n</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td>N<sub>Ed</sub> 0</td> <td>0 kN</td> </tr> <tr> <td>M<sub>xEd</sub> 66.3</td> <td>51 kNm</td> </tr> <tr> <td>M<sub>yEd</sub> 0</td> <td>0</td> </tr> </table>	N <sub>Ed</sub> 0	0 kN	M <sub>xEd</sub> 66.3	51 kNm	M <sub>yEd</sub> 0	0	<p><b>P.to applicazione N</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Centro    <input type="radio"/> Baricentro cls</p> <p><input type="radio"/> Coord.[cm]    xN 0, yN 0</p>											
N <sub>Ed</sub> 0	0 kN																	
M <sub>xEd</sub> 66.3	51 kNm																	
M <sub>yEd</sub> 0	0																	
<p><b>Materiali</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td>B450C</td> <td>C28/35</td> </tr> <tr> <td>ε<sub>su</sub> 67.5 ‰</td> <td>ε<sub>c2</sub> 2 ‰</td> </tr> <tr> <td>f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm<sup>2</sup></td> <td>ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰</td> </tr> <tr> <td>E<sub>s</sub> 200,000 N/mm<sup>2</sup></td> <td>f<sub>cd</sub> 15.87</td> </tr> <tr> <td>E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15</td> <td>f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8</td> </tr> <tr> <td>ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰</td> <td>σ<sub>c,adm</sub> 11</td> </tr> <tr> <td>σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm<sup>2</sup></td> <td>τ<sub>co</sub> 0.6667</td> </tr> <tr> <td></td> <td>τ<sub>c1</sub> 1.971</td> </tr> </table>	B450C	C28/35	ε <sub>su</sub> 67.5 ‰	ε <sub>c2</sub> 2 ‰	f <sub>yd</sub> 391.3 N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>cu</sub> 3.5 ‰	E <sub>s</sub> 200,000 N/mm <sup>2</sup>	f <sub>cd</sub> 15.87	E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0.8	ε <sub>syd</sub> 1.957 ‰	σ <sub>c,adm</sub> 11	σ <sub>s,adm</sub> 255 N/mm <sup>2</sup>	τ <sub>co</sub> 0.6667		τ <sub>c1</sub> 1.971	<p>σ<sub>c</sub> -0.5797 N/mm<sup>2</sup></p> <p>σ<sub>s</sub> 37.41 N/mm<sup>2</sup></p> <p>ε<sub>s</sub> 0.187 ‰</p> <p>d 92.8 cm</p> <p>x 17.5    x/d 0.1886</p> <p>δ 0.7</p>	<p><b>Metodo di calcolo</b></p> <p><input type="radio"/> S.L.U.+    <input type="radio"/> S.L.U.-</p> <p><input checked="" type="radio"/> Metodo n</p>
B450C	C28/35																	
ε <sub>su</sub> 67.5 ‰	ε <sub>c2</sub> 2 ‰																	
f <sub>yd</sub> 391.3 N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>cu</sub> 3.5 ‰																	
E <sub>s</sub> 200,000 N/mm <sup>2</sup>	f <sub>cd</sub> 15.87																	
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0.8																	
ε <sub>syd</sub> 1.957 ‰	σ <sub>c,adm</sub> 11																	
σ <sub>s,adm</sub> 255 N/mm <sup>2</sup>	τ <sub>co</sub> 0.6667																	
	τ <sub>c1</sub> 1.971																	
		<p><b>Verifica</b></p> <p>N* iterazioni: 5</p> <p><input type="checkbox"/> Precompresso</p>																

Figura 38 - Verifica a pressoflessione SLE

Per la tensione di trazione prevista nell'armatura, l'apertura delle fessure è nulla.

## 12 VERIFICA AL FUOCO

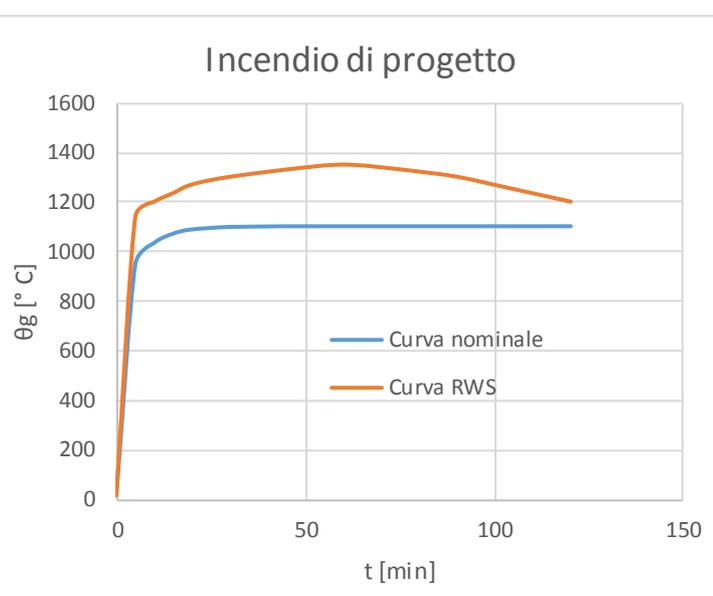
Il rivestimenti definitivi della galleria, ad esclusione dell’arco rovescio, può essere esposto ad un incendio durante la sua vita d’esercizio. Nel seguito si verifica che le strutture previste assicurino il necessario livello di sicurezza in questa combinazione di carico eccezionale.

Il livello di prestazione descrive la stabilità e idoneità all’uso da garantire in caso di incendio, così come definito nel par. 3.6 delle NTC 2008: per le gallerie in esame, che potrebbero essere interessate da incendi di grande quantità di idrocarburi, la norma prescrive di considerare la curva nominale degli idrocarburi, che sale rapidamente fino a 1100°.

Per le verifica al fuoco di una galleria, si deve però considera la curva di incendio RWS definita nella UNI 11076 “Modalità di prova per la valutazione del comportamento di protettivi applicati a soffitti di opere sotterranee in condizioni di incendio”. Tale curva è stata redatta in Olanda dal Rijkswaterstaat e dal centro per le ricerche sul fuoco (TNO/EFFECTIS) che l’hanno descritta come curva di incendio da idrocarburi di un serbatoio di 45000 litri di petrolio all’interno di una galleria. Essa è caratterizzata da un rapido incremento delle temperature fino ai 1200°C a 10 minuti, un massimo di 1350 °C a 60 minuti e un ritorno a 1200°C a 120 minuti.

Considerando che la curva RWS raggiunge temperature più elevate, per la verifica si considererà solo quest’ultima, verificando quindi che i rivestimenti definitivi siano REI120.

	Curva nominale	Curva RWS
t [min]	$\theta_g$ [° C]	$\theta_g$ [° C]
0	20	20
5	948	1140
10	1034	1200
15	1071	1235
20	1088	1270
30	1098	1300
45	1100	1330
60	1100	1350
75	1100	1330
90	1100	1300
105	1100	1250
120	1100	1200



In accordo con il paragrafo 5.4.2 della norma UNI-EN-1992-1-2, per una struttura a comportamento a parete portante, come il rivestimento definitivo della galleria, per assicurare il livello REI120 nel caso di fuoco applicato ad un solo lato e di elevati livelli di compressione ( $\mu_{fi}=0.7$ ), è necessario che lo spessore sia almeno pari a 16cm ed il copriferro maggiore di 3.5cm: entrambe le prescrizioni sono soddisfatte.

**Table 5.4: Minimum dimensions and axis distances for load-bearing reinforced concrete walls**

Standard fire resistance	Minimum dimensions (mm)			
	Wall thickness/axis distance for			
	$\mu_{fi} = 0,35$		$\mu_{fi} = 0,7$	
	wall exposed on one side	wall exposed on two sides	wall exposed on one side	wall exposed on two sides
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

\* Normally the cover required by EN 1992-1-1 will control.

**Note:** For the definition of  $\mu_{fi}$  see 5.3.2 (3).

In aggiunta a quanto detto, nel seguito si eseguono alcune verifiche puntuali su sezioni rappresentative ed nella condizione di carico a lungo termine, al fine di valutare l’effettiva resistenza e stabilità della struttura nella combinazione di incendio.

### 12.1 Software di calcolo

Il programma RAF 10.0 prodotto dalla Aztec Informatica © è stato impiegato per calcolare la resistenza al fuoco degli elementi in c.a. in quanto permette di analizzare l’effetto di una curva d’incendio agente sui lati di una generica sezione. La diffusione del calore all’interno della sezione è valutata attraverso un’analisi non lineare agli elementi finiti: durante una prima fase il programma valuta la distribuzione del calore per differenti step temporali

definiti dall’utente. Successivamente RAF 10.0 valuta la resistenza della sezione nei vari intervalli di tempo considerando la riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali. In questo modo è possibile calcolare la riduzione del dominio di resistenza M-N. È possibile utilizzare sia le curve d’incendio proposte dall’Eurocodice che curve definite per punti dall’utente. Allo stesso modo è possibile impiegare curve differenti per quanto riguarda il decadimento delle proprietà meccaniche dei materiali, il calore specifico e la conduttività dei materiali in funzione della temperatura. In output viene mostrata la distribuzione della temperatura per ogni intervallo temporale. Il programma valuta il dominio di resistenza ultimo stimando il fattore di sicurezza rispetto alle azioni di calcolo imposte per la sezione di calcolo.

### *12.2 Schematizzazione del problema*

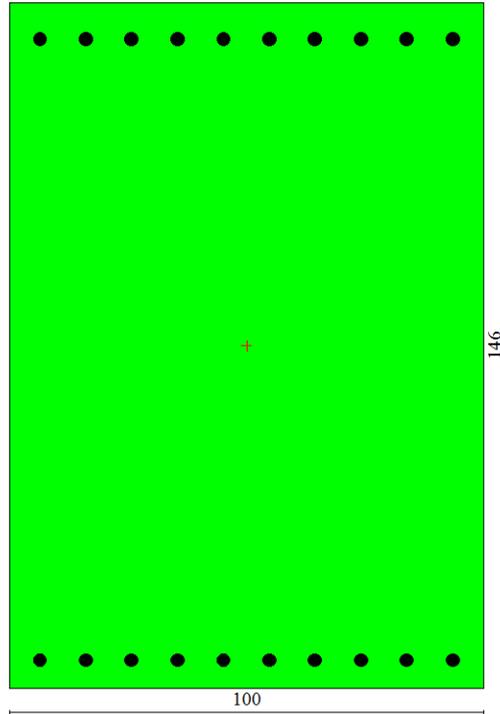
Per lo studio della resistenza al fuoco, come fatto per le analisi a freddo, si considera una sezione resistente larga 1 metro e la relativa armatura.

Per tener conto del possibile spalling, si tolgono sino dalla partenza del calcolo 2cm di spessore di calcestruzzo all’intradosso (assunzione cautelativa, in quanto influisce negativamente sul trasferimento di calore all’interno della sezione, riducendo la distanza della fonte di calore dalle barre d’intradosso).

Si analizza la sezione maggiormente sollecitata (rappresentativa dei 2 imbocchi come geometria ed armatura), in accordo a quanto risulta dalle verifiche pressoflessionali allo SLE con riferimento allo step di calcolo 4 del lungo termine.

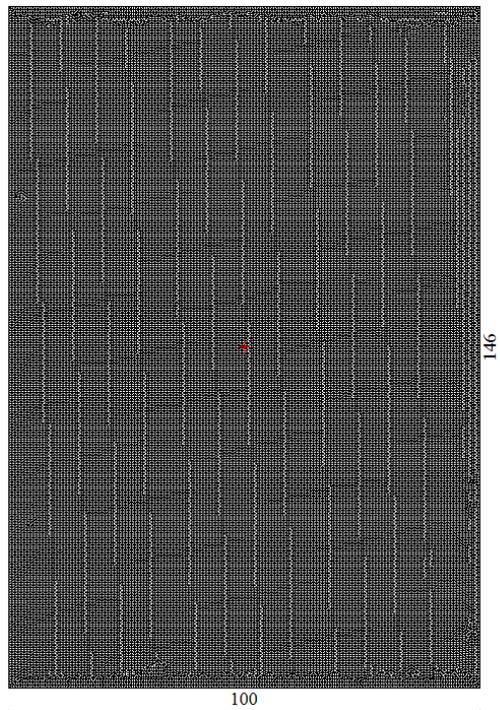
SEZIONE DI CALCOLO	H [cm]	N <sub>ek</sub> [kNm/m]	M <sub>ek</sub> [kN/m]
MODELLO 2 – GA asim - nord	1.46	-1432	2169.9

Tabella 34: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria



**Figura 39 – Sezione di calcolo – Modello 2**

Per eseguire un’analisi accurata, la sezione è suddivisa in 200 elementi triangolari a 3 nodi.



**Figura 40 – Mesh di calcolo –Modello 2**

L’analisi sezionale in condizioni di incendio è definita come eccezionale: in accordo alle normative di riferimento, le azioni ricavate dalle modellazioni numeriche non sono amplificate per alcun coefficiente moltiplicativo e la verifica è condotta nei riguardi del solo Stato Limite Ultimo. Tale verifica è soddisfatta se il coefficiente di sicurezza è maggiore dell’unità. Si precisa che, come indicato nelle Normative di riferimento, i coefficienti di sicurezza relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali assumono valore unitario nelle condizioni di incendio.

Considerando che l’incendio si sviluppa in galleria, le condizioni al contorno risultano:

- Lato inferiore: applicazione della curva d’incendio
- Lato destro e sinistro: Nessun flusso di calore
- Lato superiore: Scambio termico considerando un ambiente di contatto a temperatura uniforme pari a 20°.

### 12.3 Proprietà termiche dei materiali

Per la sezione resistente, nel seguito si riportano le correlazioni considerate nel programma per stimare la risposta della struttura nei diversi step temporali dell’analisi al fuoco, in funzione della temperatura raggiunta localmente dagli elementi di mesh.

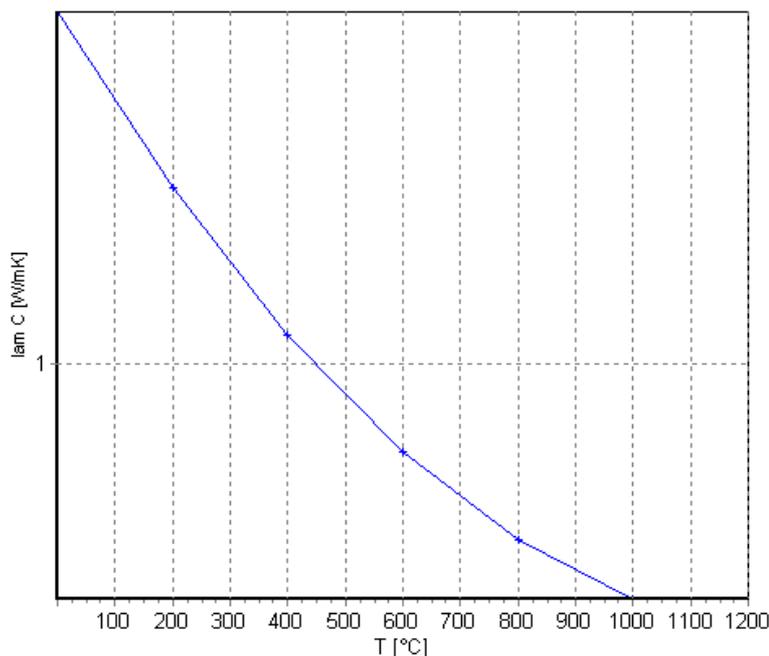


Figura 41 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

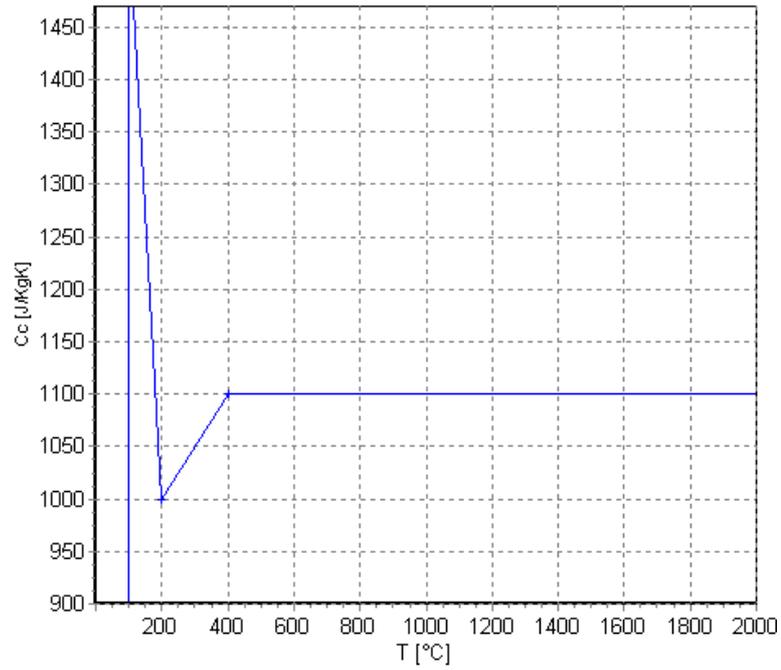


Figura 42 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

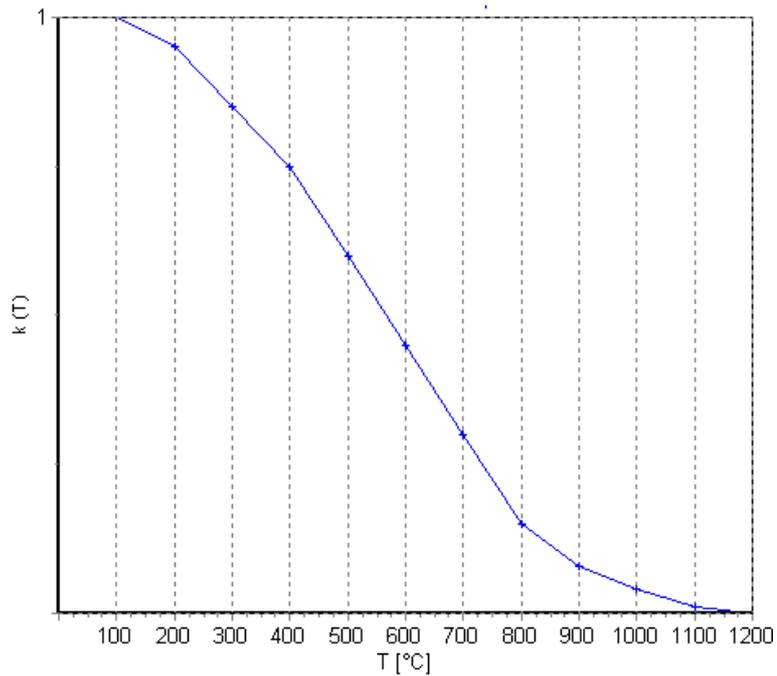


Figura 43 –Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{ck}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

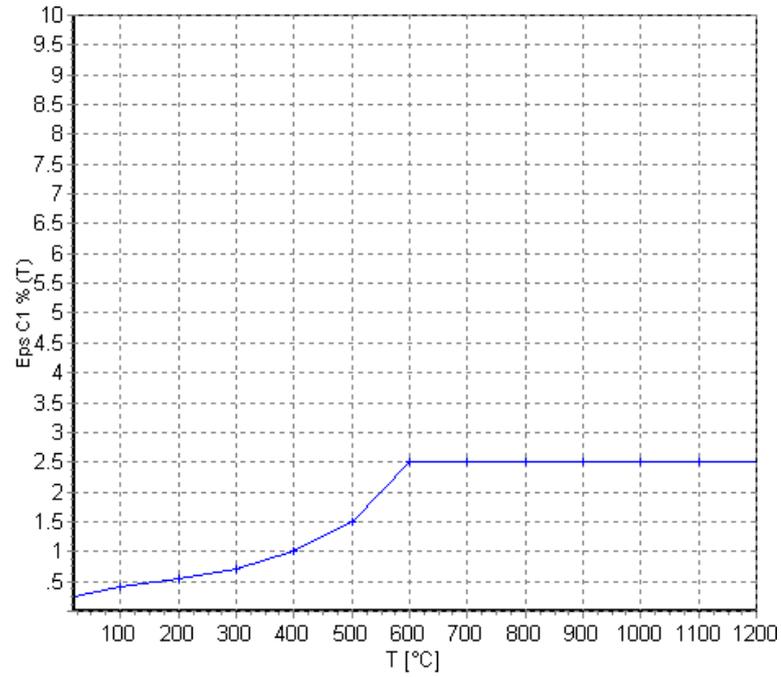


Figura 44 – Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{c1}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

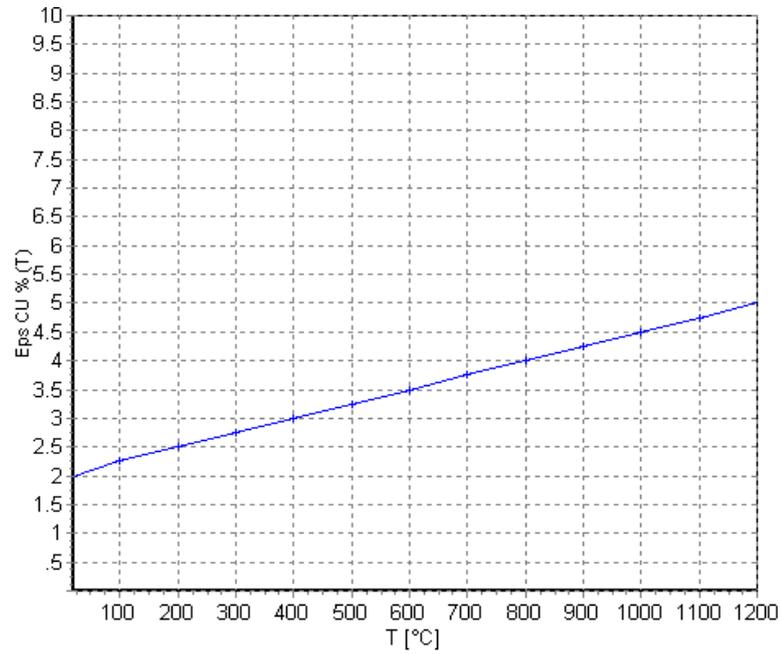


Figura 45 – Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{cu}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

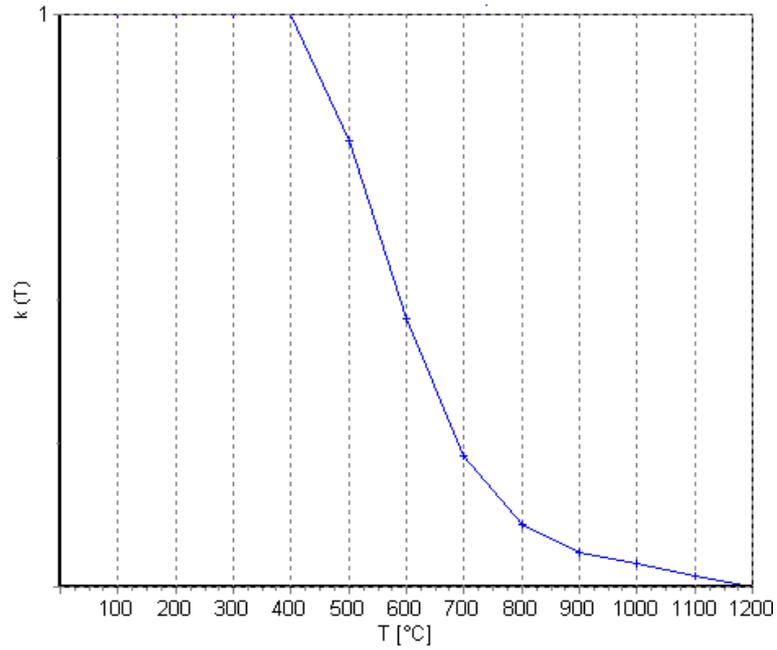


Figura 46 – Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{yk}$  per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)

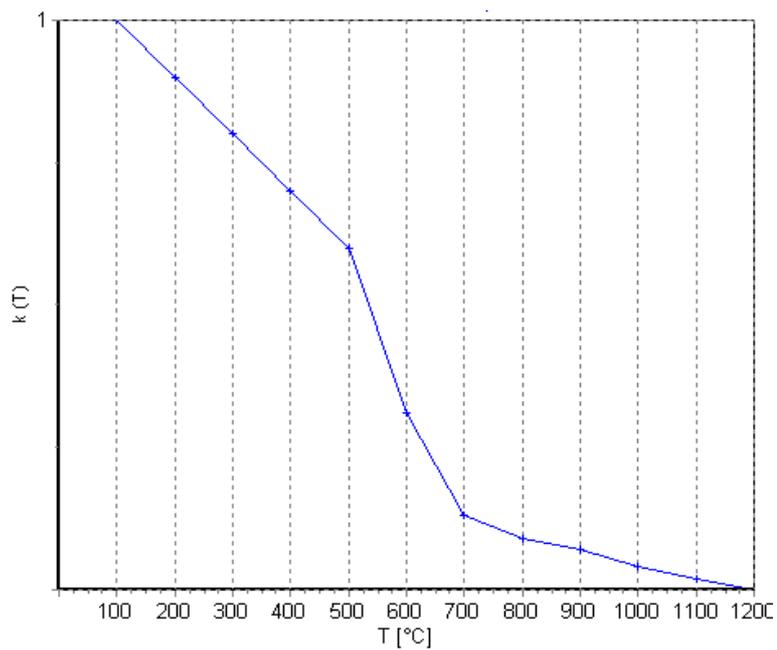
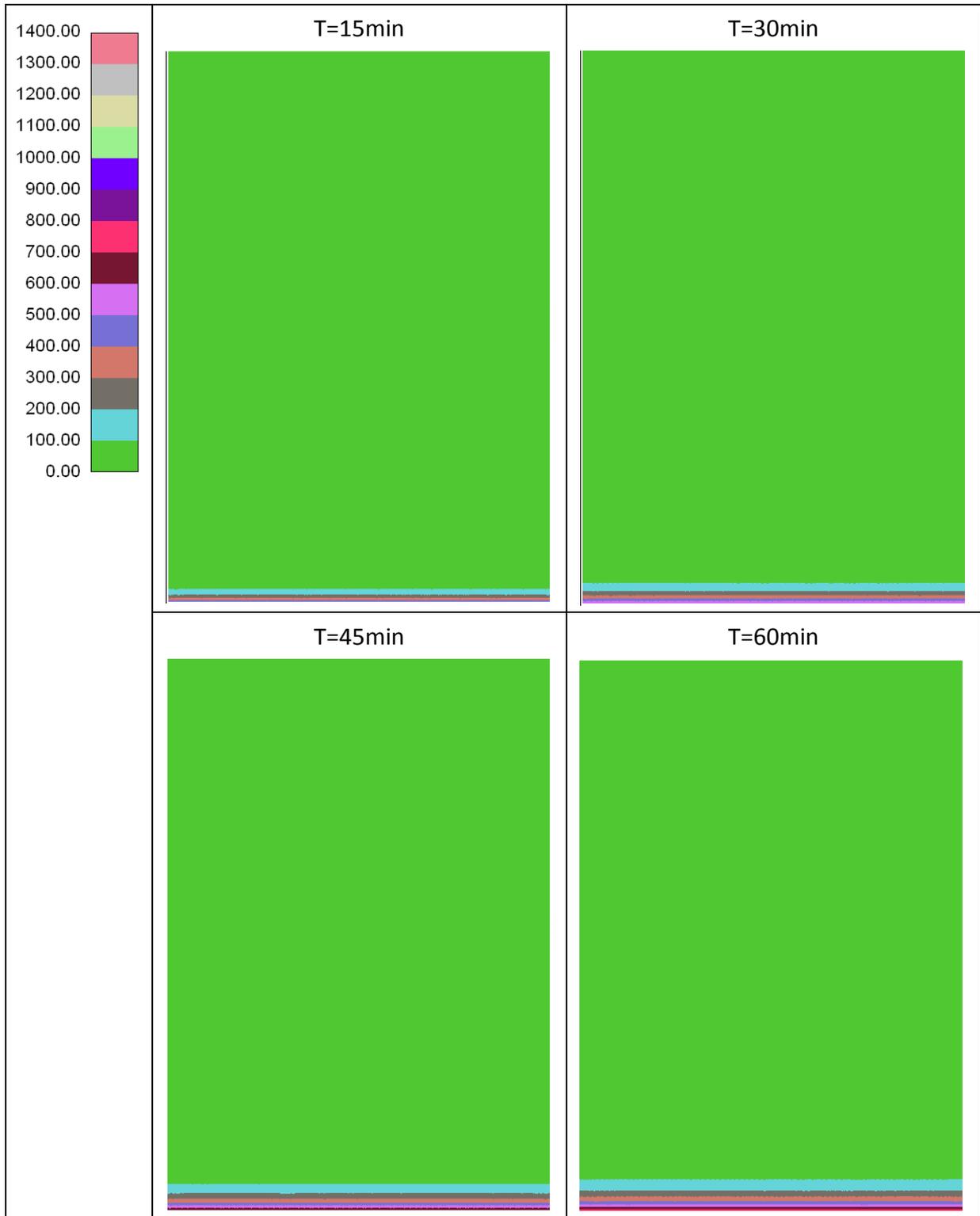


Figura 47 – Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)

### 12.4 Output del programma

Nel seguito si riporta l'andamento della temperatura nelle sezioni di calcolo per alcuni step temporali significativi, così come restituiti dal software di calcolo.



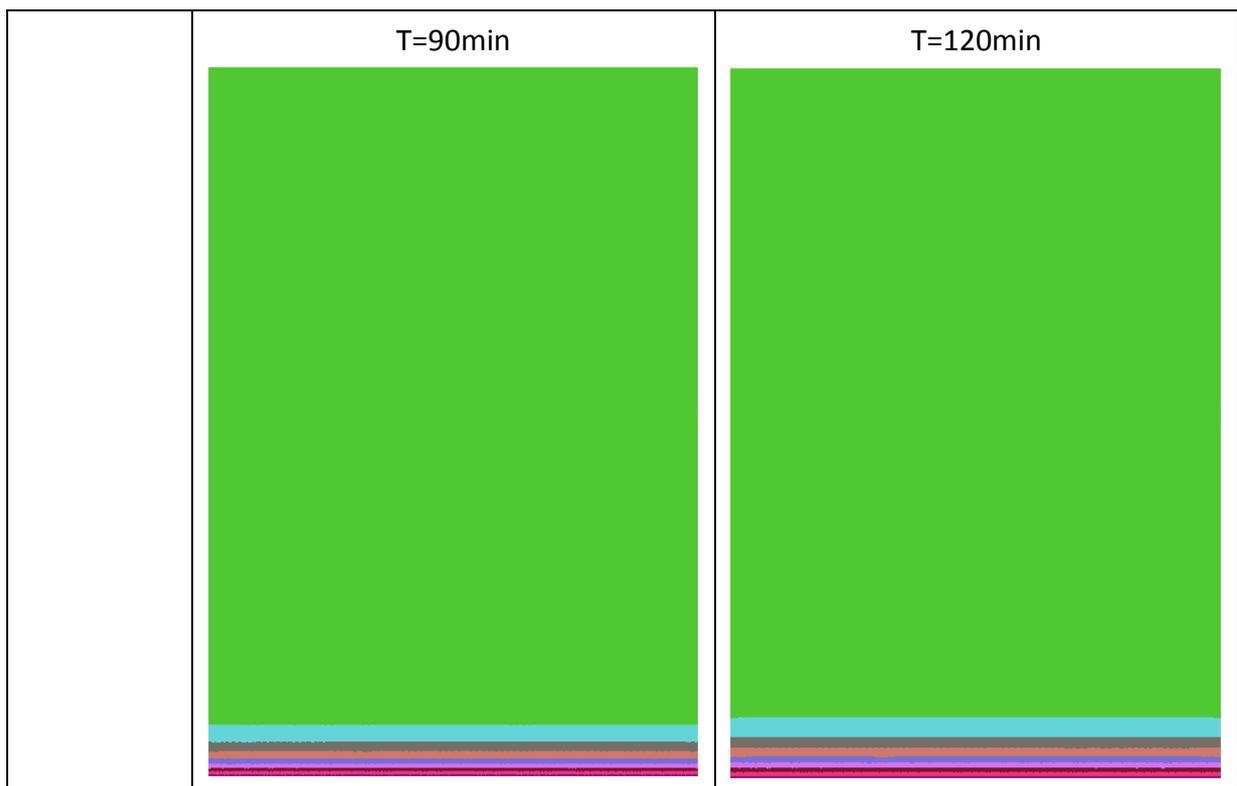


Figura 48 – Analisi termica – Modello 2

### 12.5 Verifica strutturale

Per le sezioni analizzate, nel seguito si riportano gli FS risultanti negli step temporali più rappresentativi, dimostrando l'adeguatezza del rivestimento della galleria nei confronti del carico da incendio.

Legenda:

- T tempo trascorso [minuti]
- N azione assiale [kN]
- Mx momento in direzione X [kNm]
- My momento in direzione Y [kNm]
- $\epsilon_{cls}$  deformazione del CLS
- $\epsilon_{acc}$  deformazione dell'acciaio
- FS fattore di sicurezza nel dominio MN

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

T	N	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	ε <sub>cls</sub>	ε <sub>acc</sub>	FS
15	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
20	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
30	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
45	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
60	724.40	0.00	1484.76	0.003842	-0.044977	4.81
90	724.40	0.00	1484.76	0.003842	-0.044977	4.81
120	724.40	0.00	1484.76	0.003847	-0.045040	4.81

Tabella 35 – Analisi al fuoco – Modello 2

### 13 CONCLUSIONI

Nella presente Relazione di Calcolo si sono analizzate le gallerie artificiali agli imbocchi della galleria “San Pietro”, nell’ambito del Progetto Definitivo dell’Autostrada A 31 Nord Trento Rovigo – Tronco Trento - Valdastico – Piovene Rocchette.

Sono state analizzate 2 sezioni di calcolo rappresentative delle condizioni geometriche e di carico della struttura in esame. La modellazione è stata eseguita con il software Flac alle differenze finite, di comprovata validità, che ha restituito un andamento tensionale compatibile con le dimensioni e l’armatura della galleria, così come riportato nelle verifiche strutturali.

A livello tensionale, la correttezza della modellazione adottata è stata valutata analizzando graficamente l’andamento delle sollecitazioni nella struttura, in particolare nello step 3 di calcolo (con i carichi dati dal ritombamento) in Figura 18 e Figura 29 e controllando poi i valori ottenuti per alcune sezioni rappresentative e presenti in Tabella 10 e Tabella 24. In particolare:

- per quanto riguarda l’azione assiale, la struttura è caricata mediamente da 6m di ritombamento ( $22\text{kN/m}^3$ ), a cui si somma il peso proprio del rivestimento (spessore minimo 1.1m); il carico distribuito risulta pari a  $159.5\text{kPa}$ . Considerando la luce del portale pari a circa 14m, su entrambe le pareti si scaricano circa  $1120\text{kN}$ , comparabili con  $1480\text{kN}$  circa ottenuti nel primo modello e  $1410\text{kN}$  circa del secondo modello.
- per quanto riguarda il momento flettente, si confrontano i valori trovati in mezzeria della calotta e ai reni, con i valori di schemi strutturali semplificati. Come limite inferiore si considera lo schema di arco incastrato alla base, in cui gli spostamenti al piede sono completamente impediti, a differenza del caso reale. Seguendo quanto riportato nel “Prontuario del cemento armato” di Santarella Luigi, risulta:

H (altezza della calotta)	1.1	[m]
$F_c$ (area della sezione)	1.1	$[\text{m}^2]$
$J_c$ (momento d'inerzia della sezione)	0.110916667	$[\text{m}^4]$
f (freccia)	4.5	[m]
l (luce dell'arco)	14	[m]
$v$ ( $45/4 * J_c / (F_c * f^2)$ )	0.056	[-]
$M_C$ calotta ( $p * l^2 / 24 * v / (1+v)$ )	-69	$[\text{kNm/m}]$
$M_A$ rene ( $-p * l^2 / 12 * v / (1+v)$ )	138	$[\text{kNm/m}]$

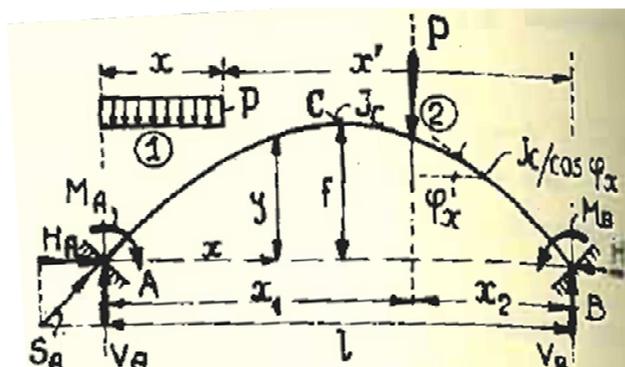


Figura 49 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato”

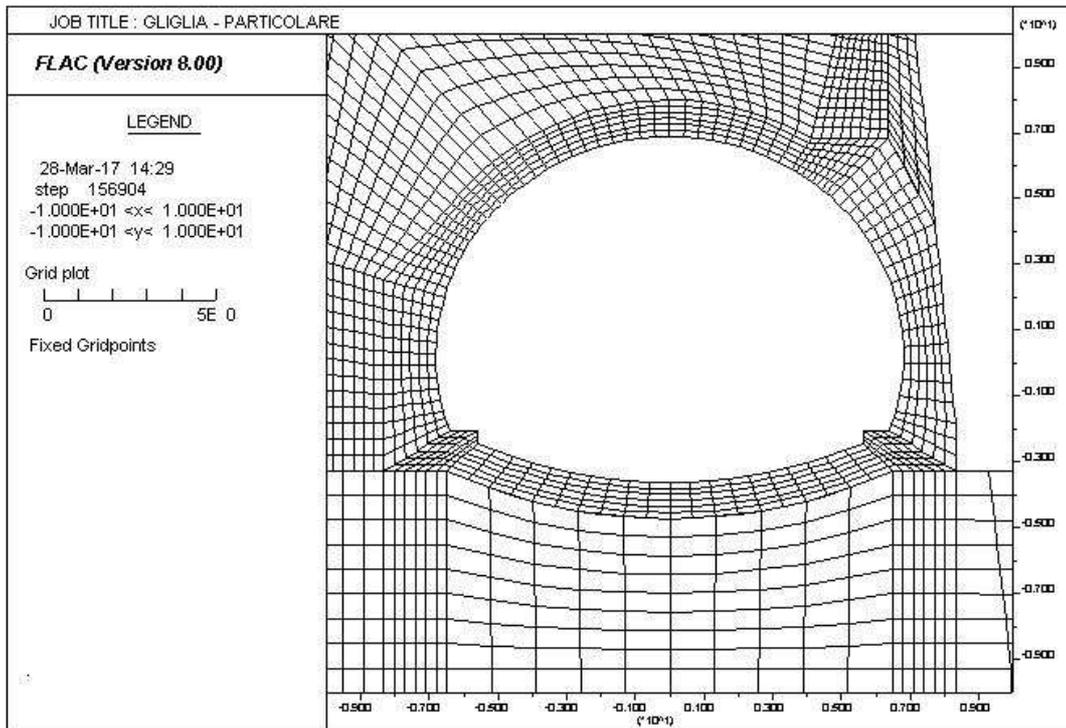
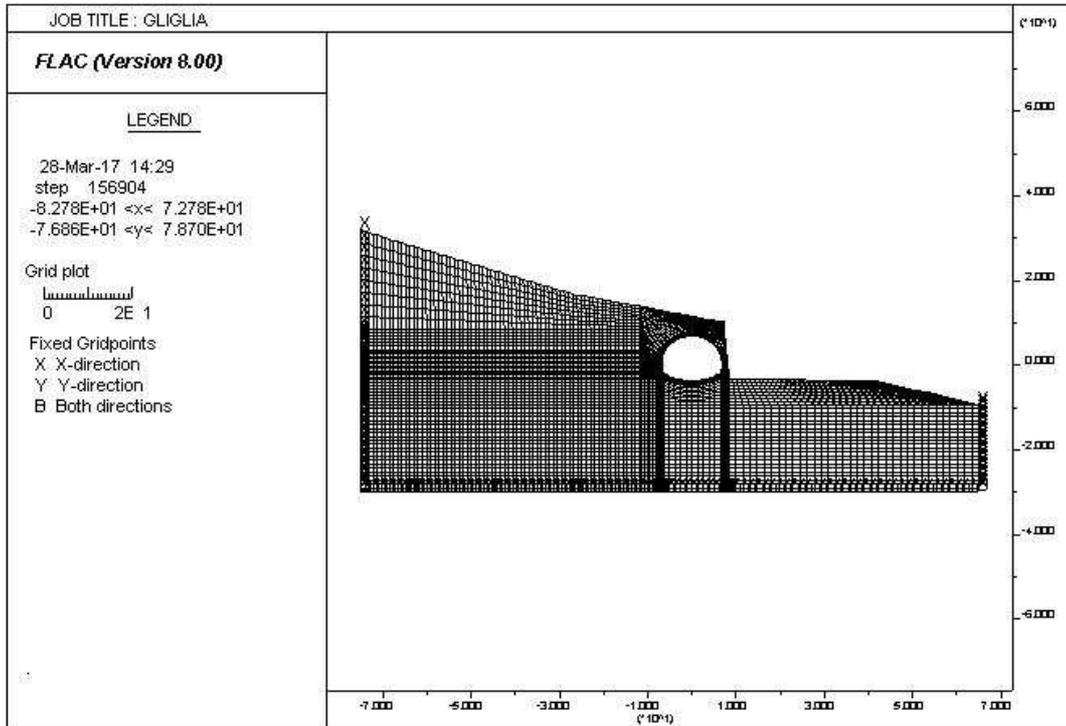
I valori ottenuti risultano correttamente inferiori di quanto trovato nella simulazione Flac, in quanto nel primo modello  $M_C = -777 \text{ kNm/m}$  e  $M_A = 1910 \text{ kNm/m}$  e nel secondo modello  $M_C = -867 \text{ kNm/m}$  e  $M_A = 1765 \text{ kNm/m}$ .

Come limite superiore, si considera il caso di trave doppiamente incastrata che prevede momento in mezzeria  $M_C$  pari a  $p \cdot l^2 / 24 = 1303 \text{ kNm/m}$  e momento all'incastro  $M_A$  pari a  $p \cdot l^2 / 12 = 2605 \text{ kNm/m}$ . I valori ottenuti dall'analisi bidimensionale sono inferiori grazie alla forma ad arco della calotta ed al contenimento offerto dal terreno ai lati e dalle pareti della struttura stessa.

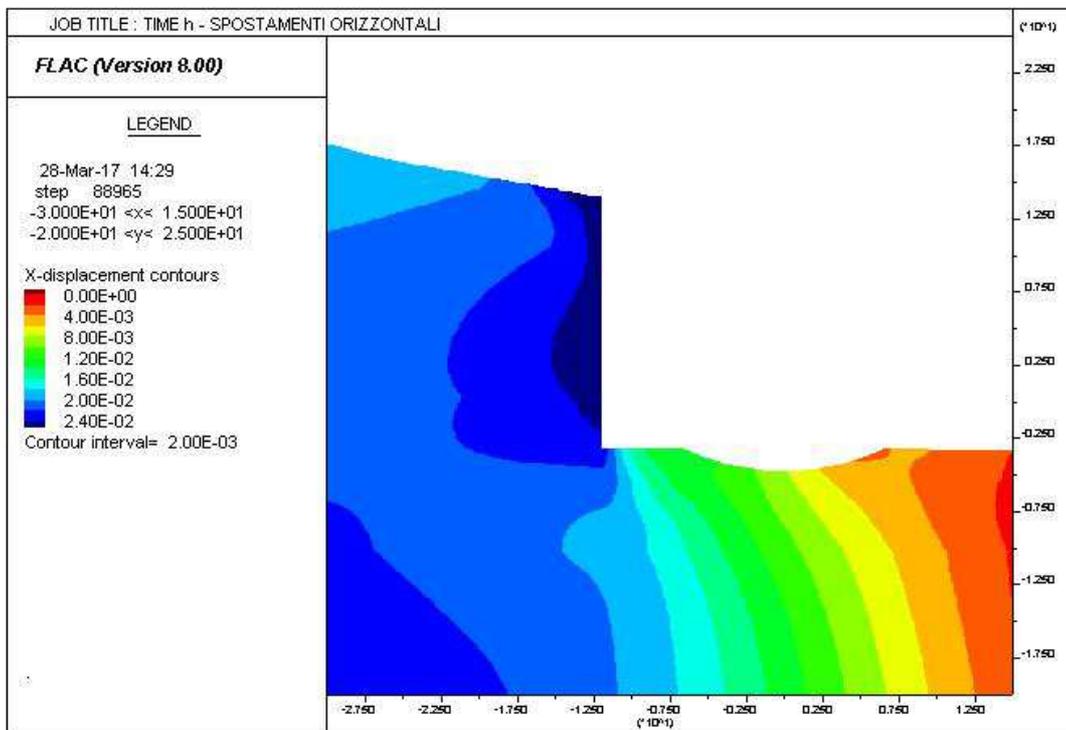
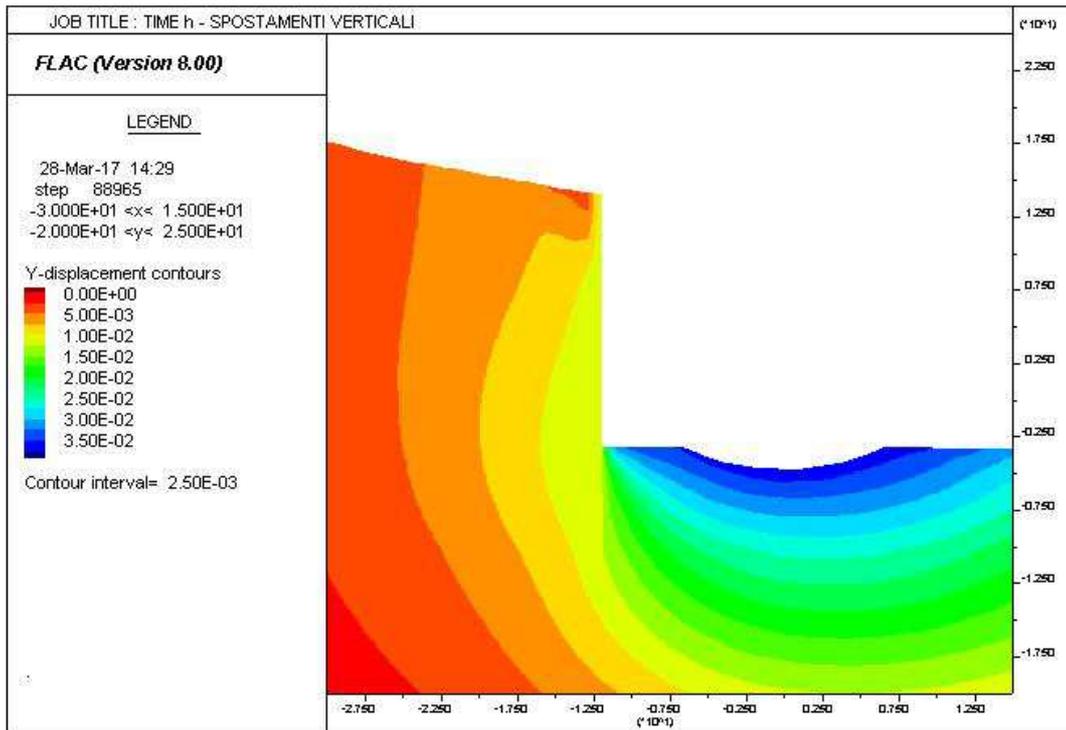
In allegato si riportano le immagini più significative di ogni calcolo.

**ALLEGATI**

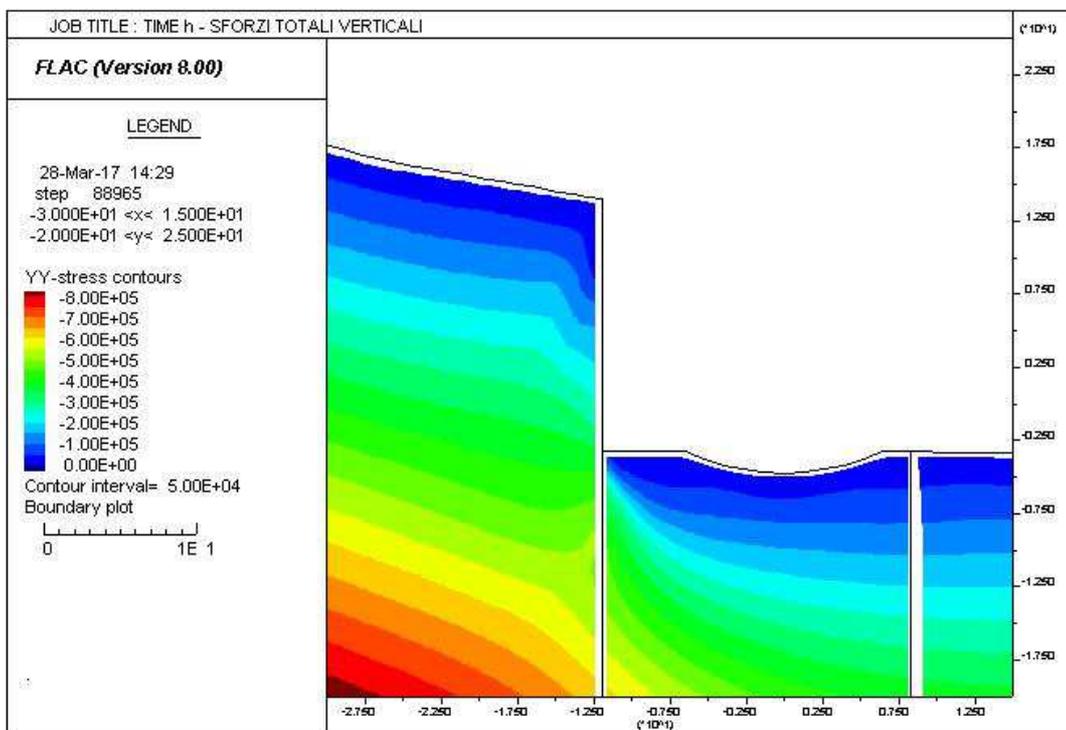
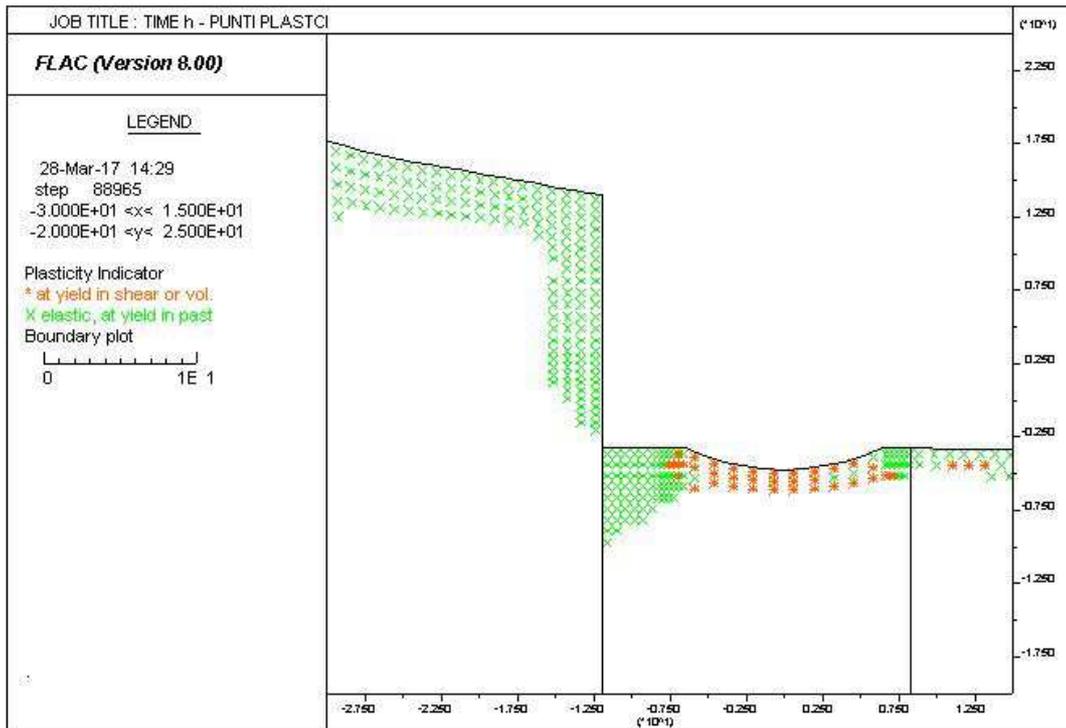
**13.1 MODELLO 1 – GA asim sud**



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

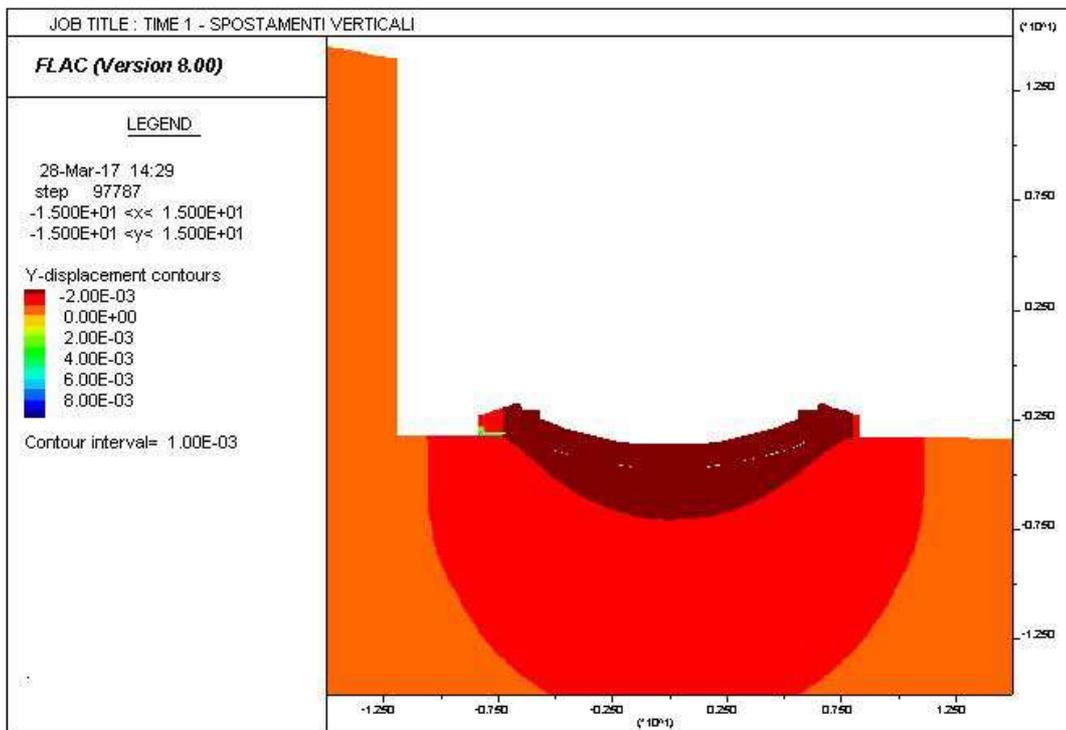
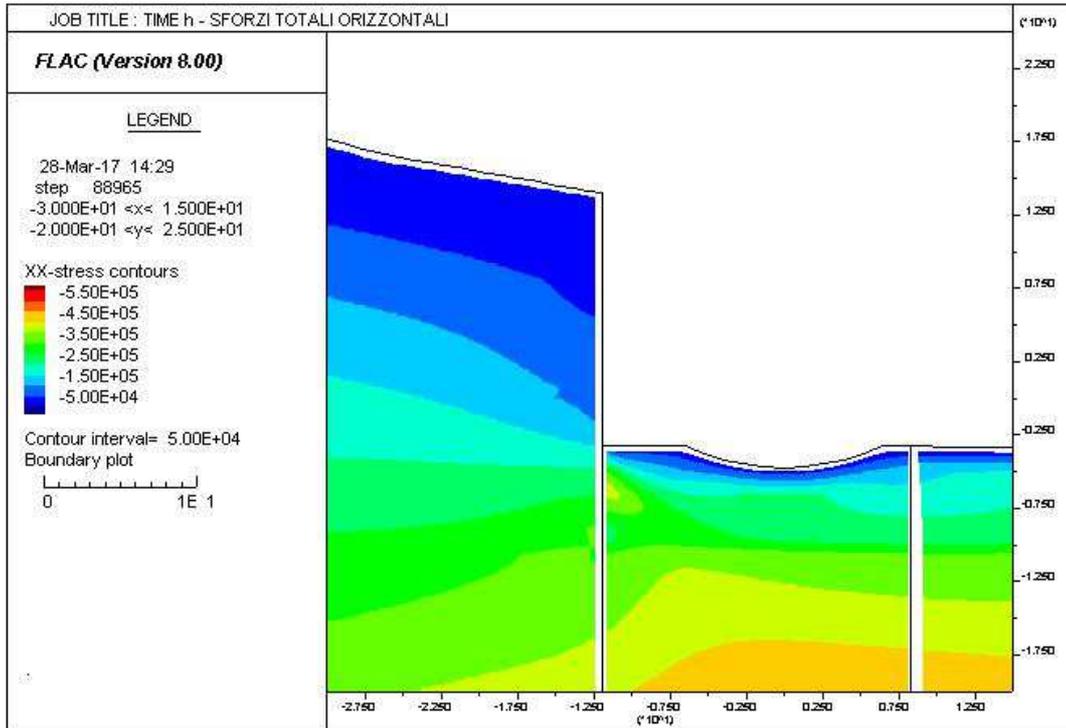


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

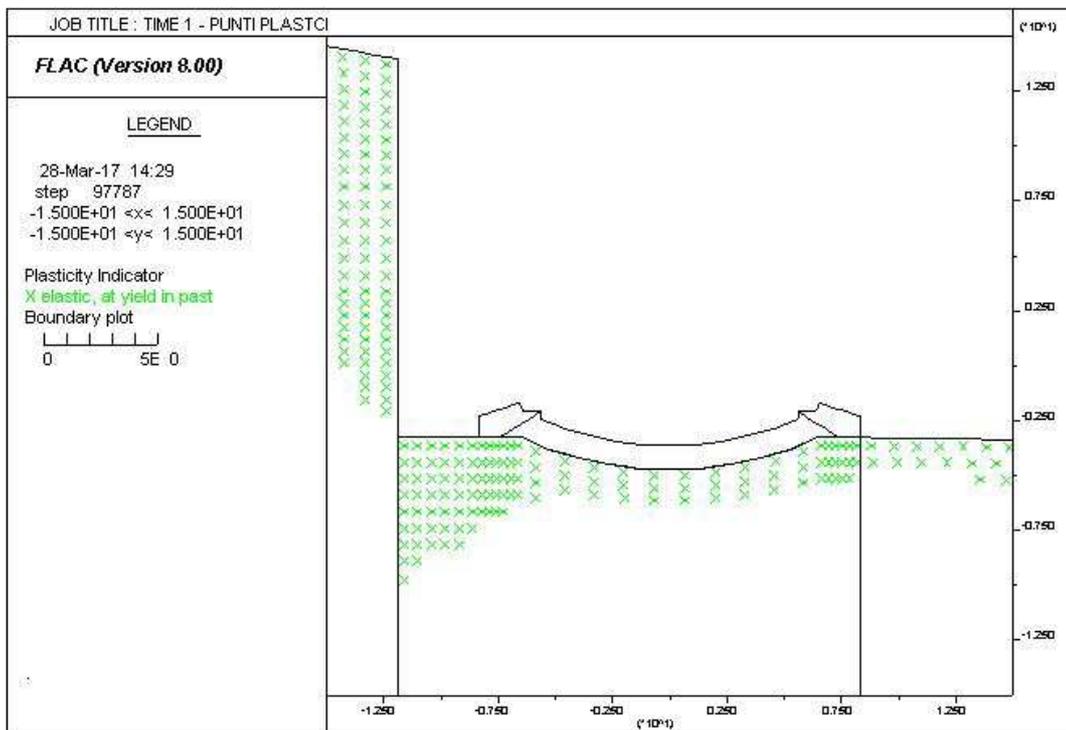
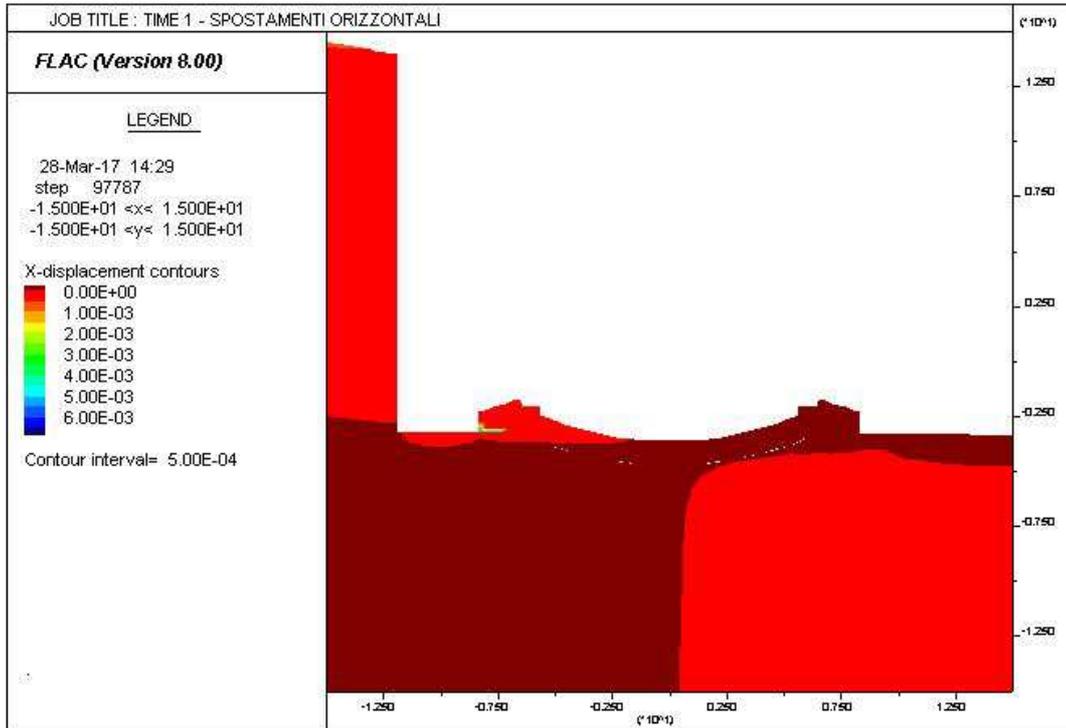


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

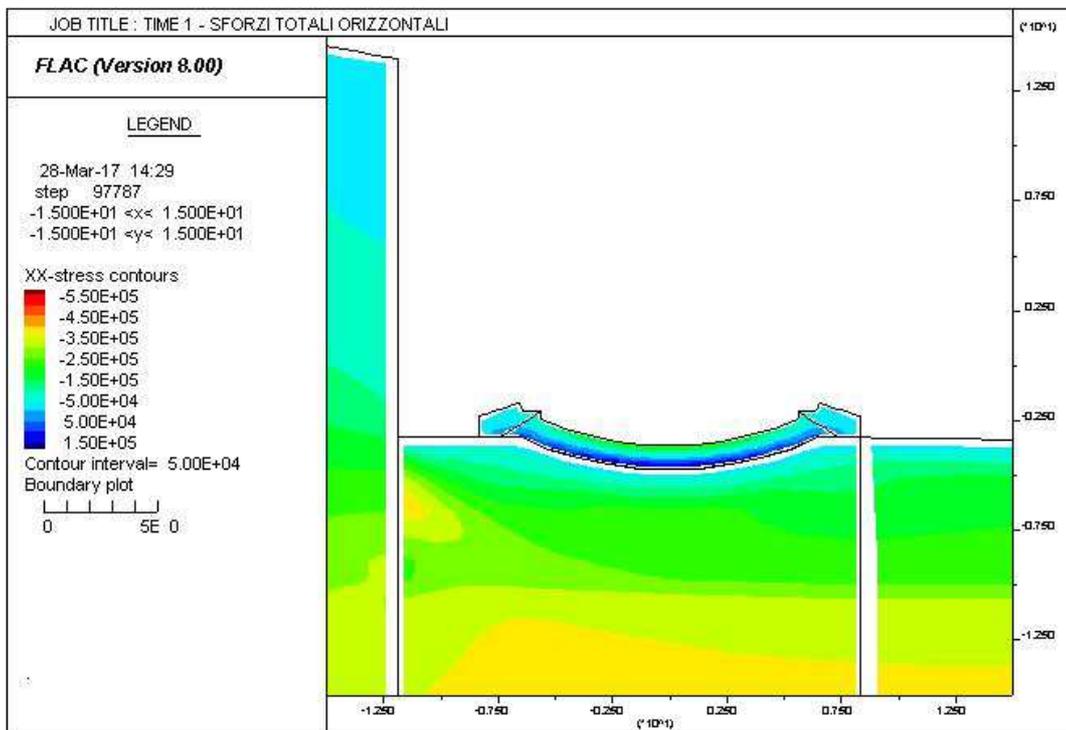
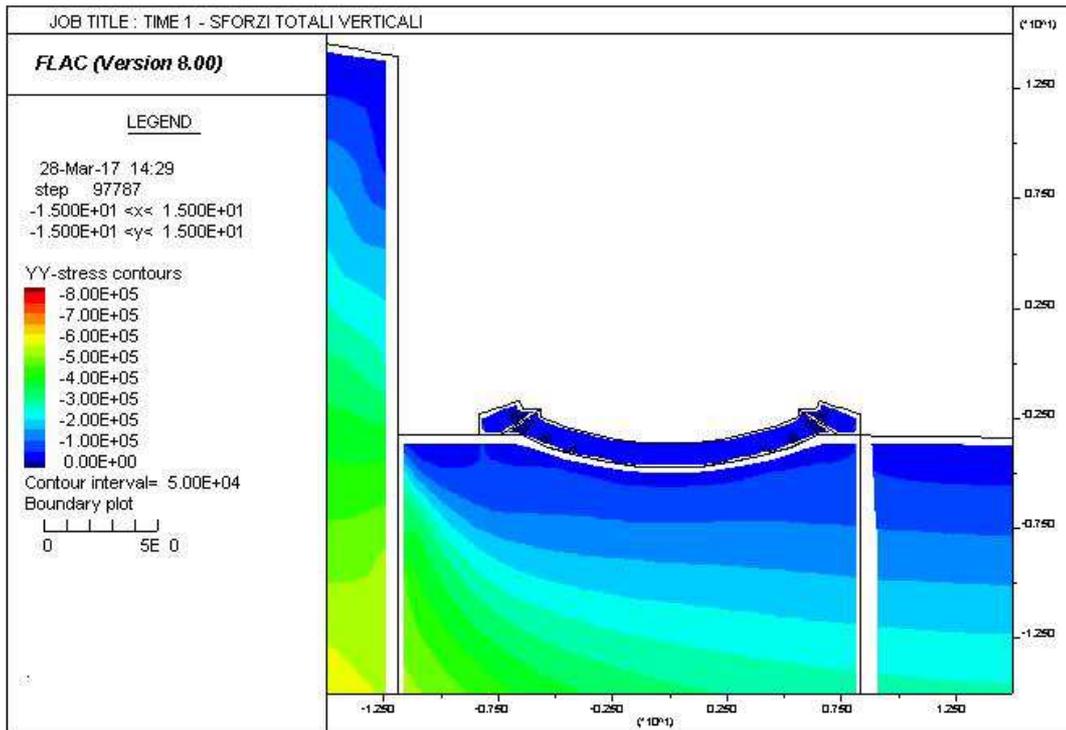
---



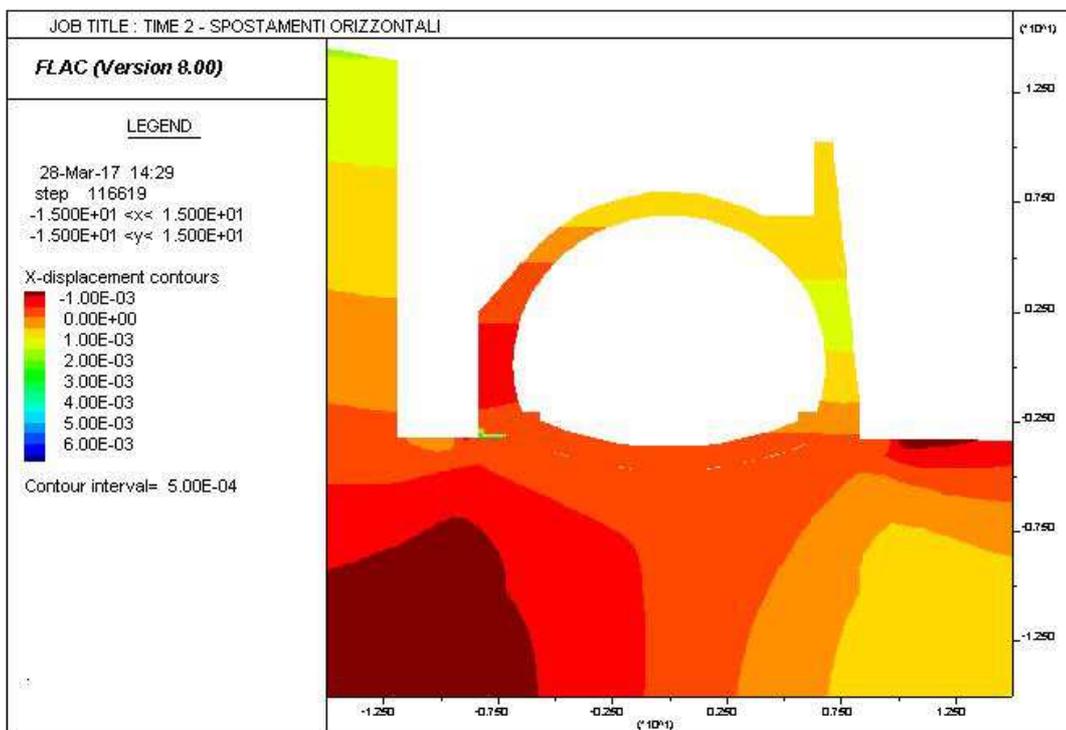
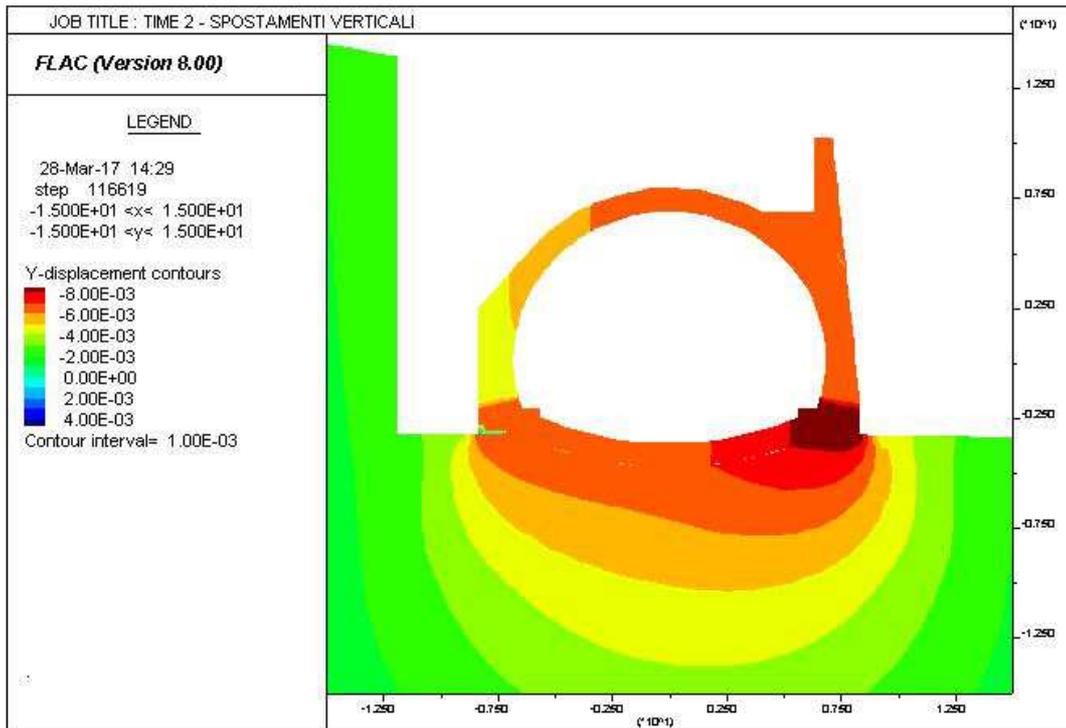
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



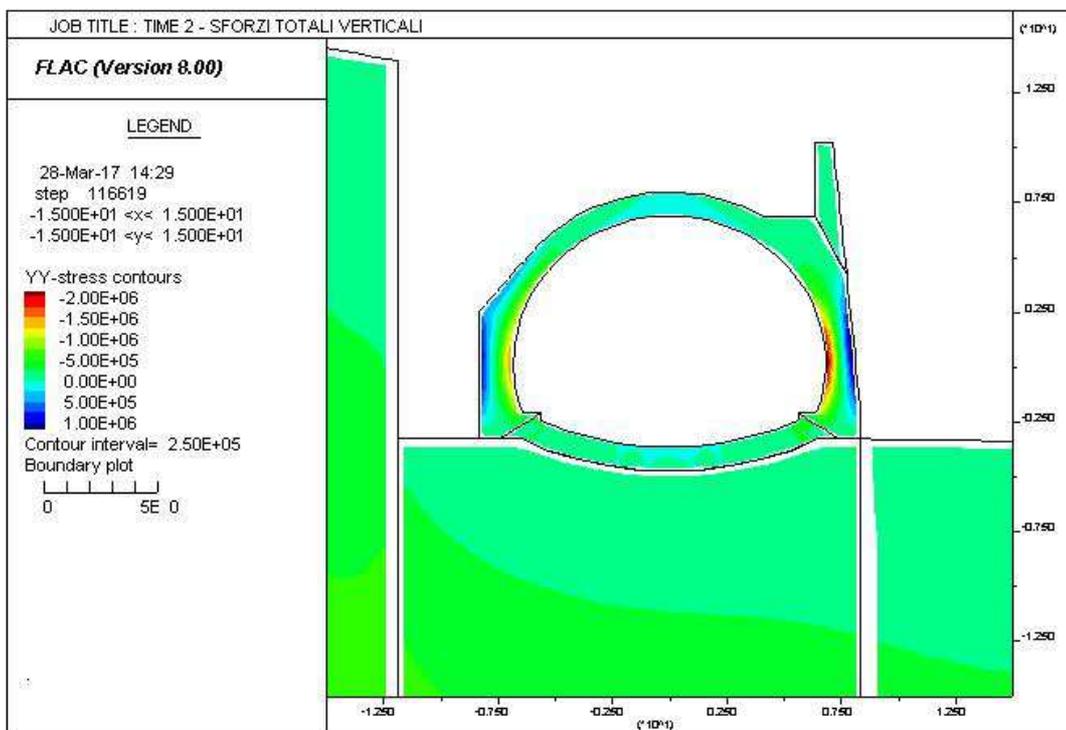
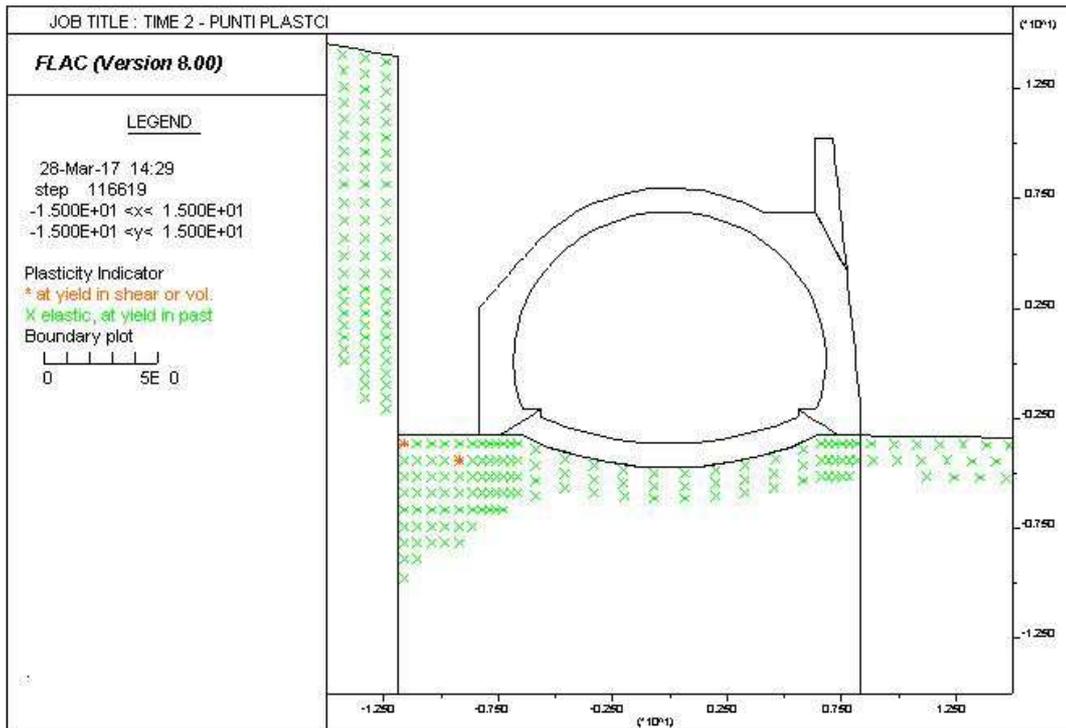
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



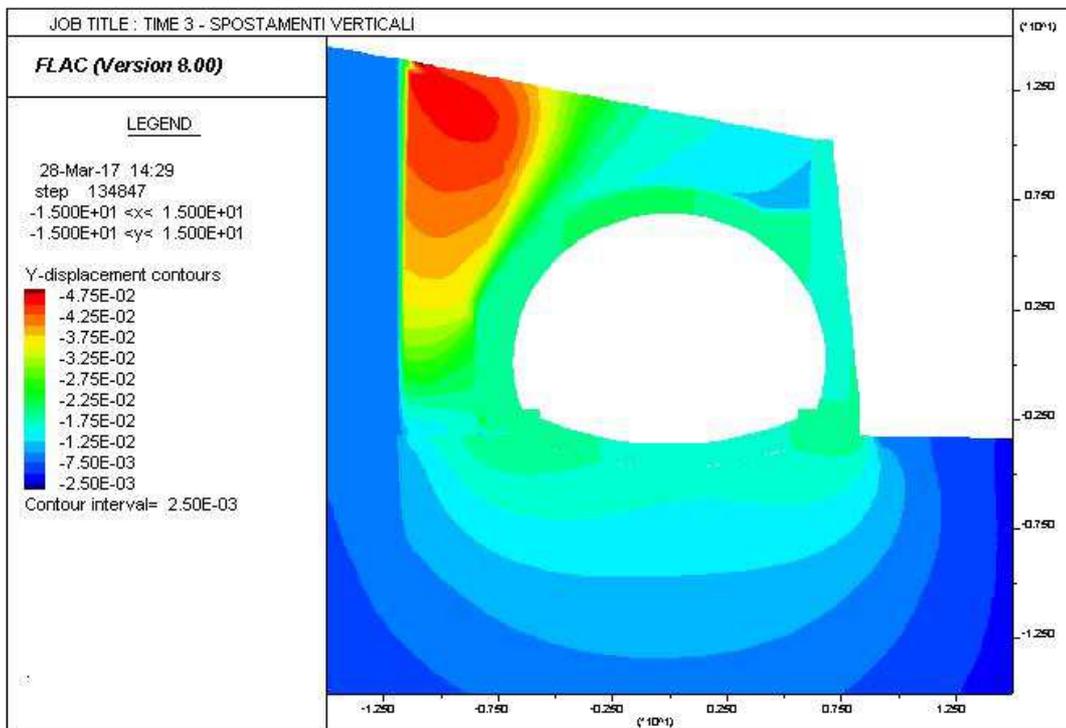
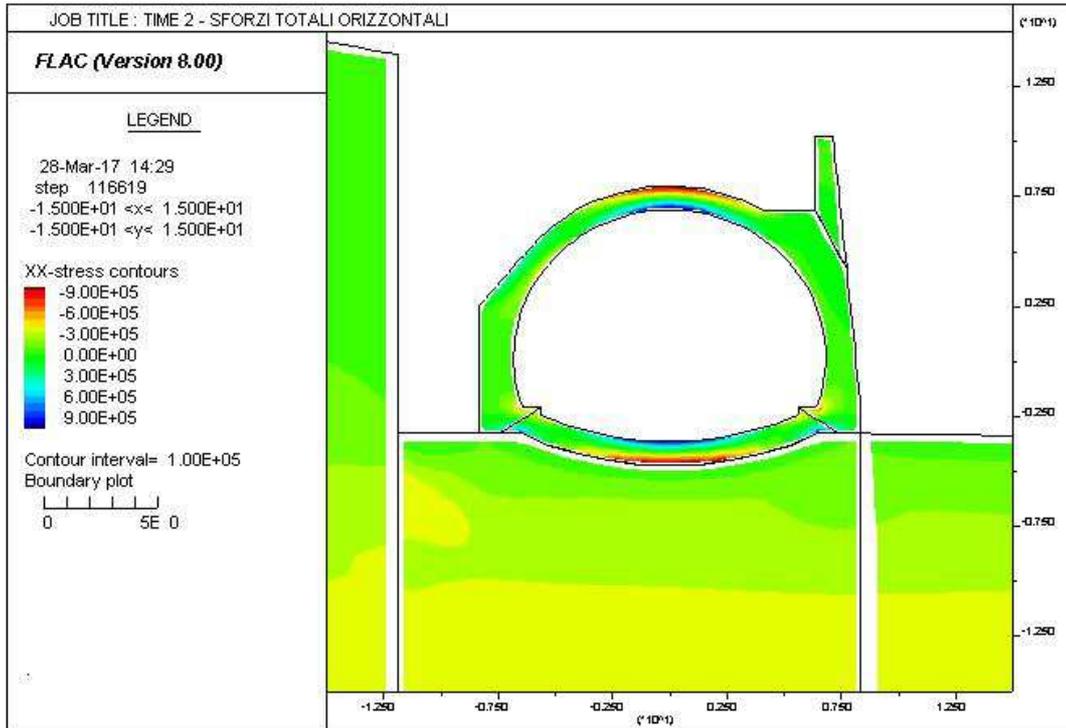
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



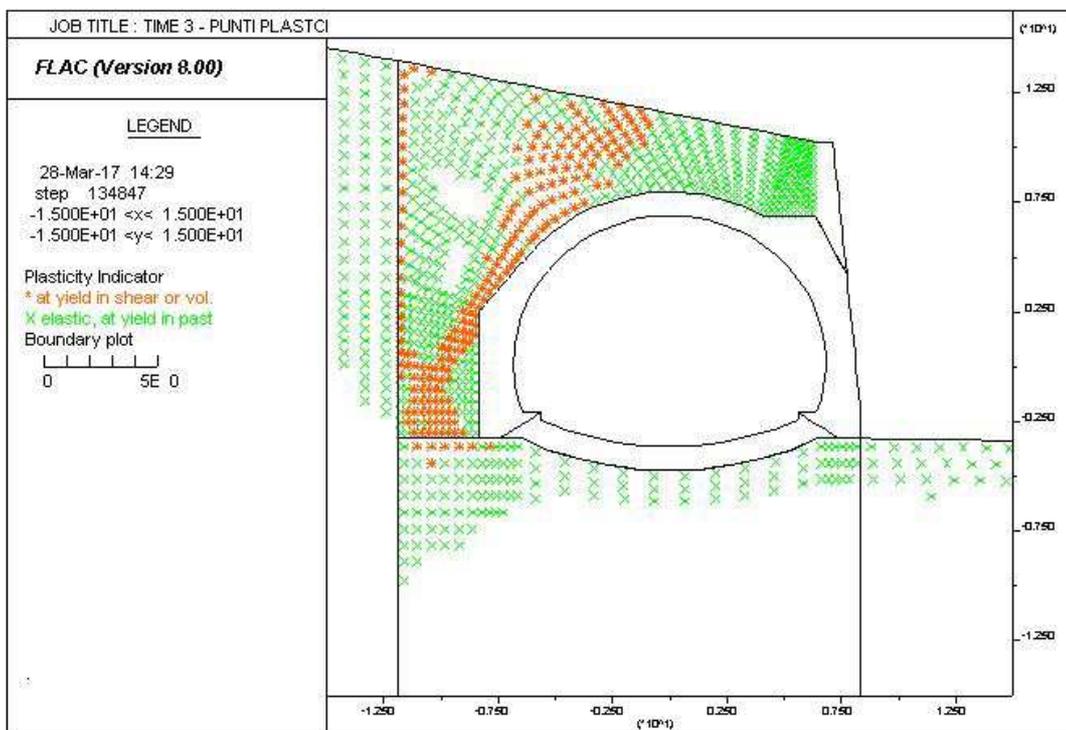
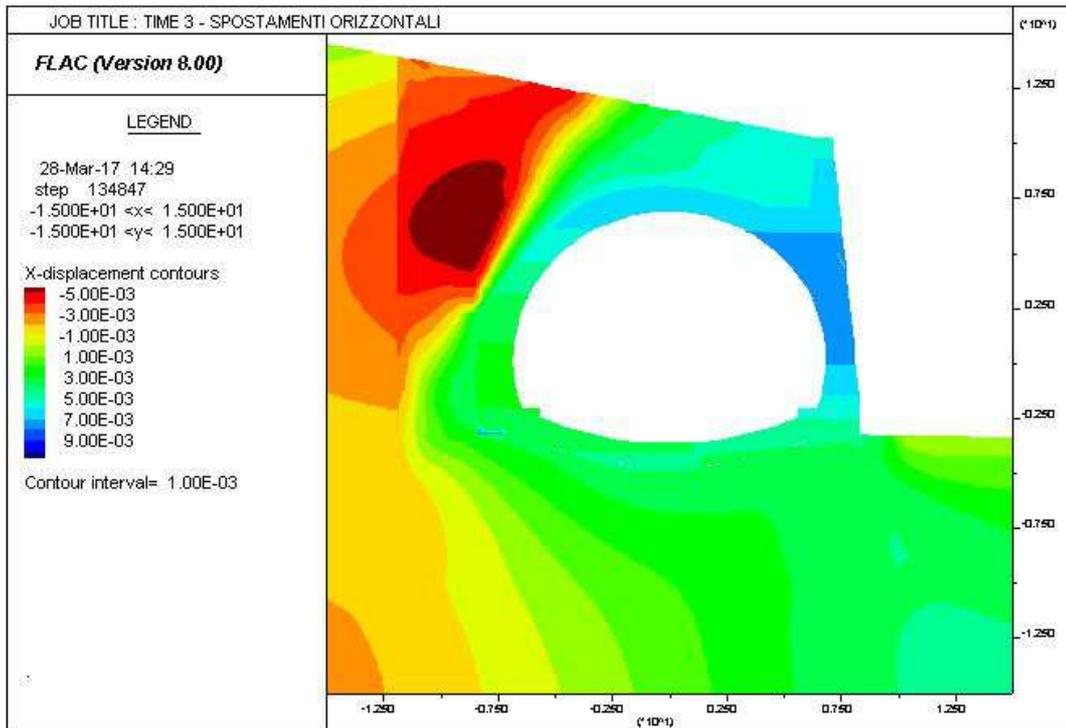
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



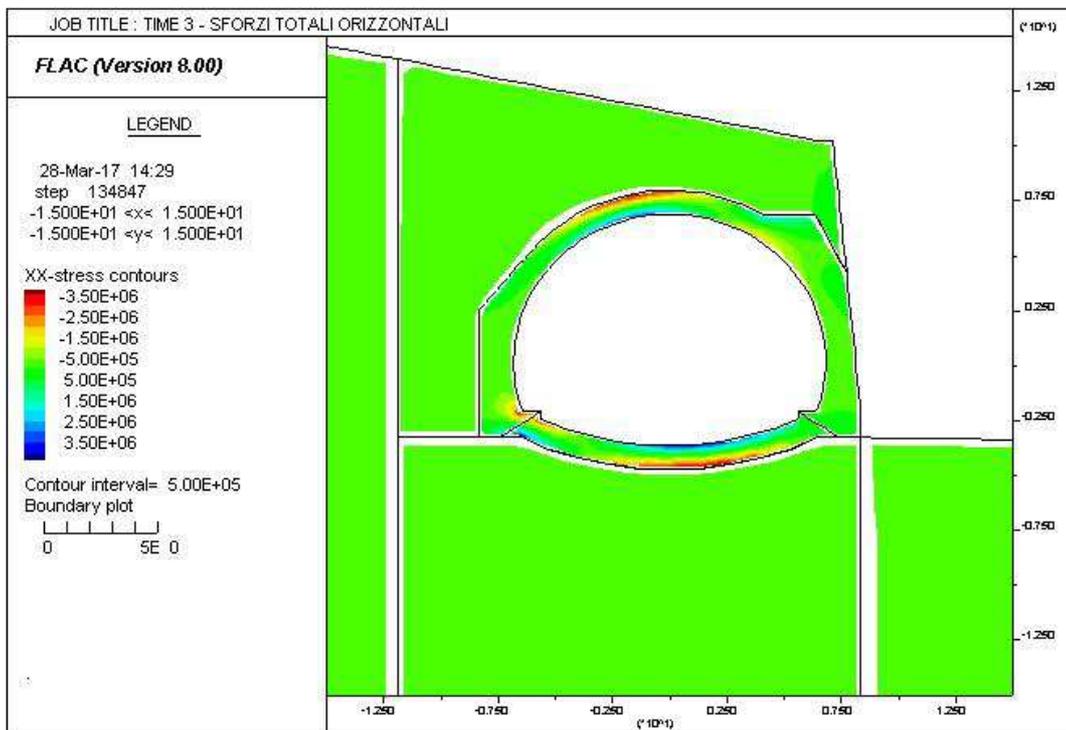
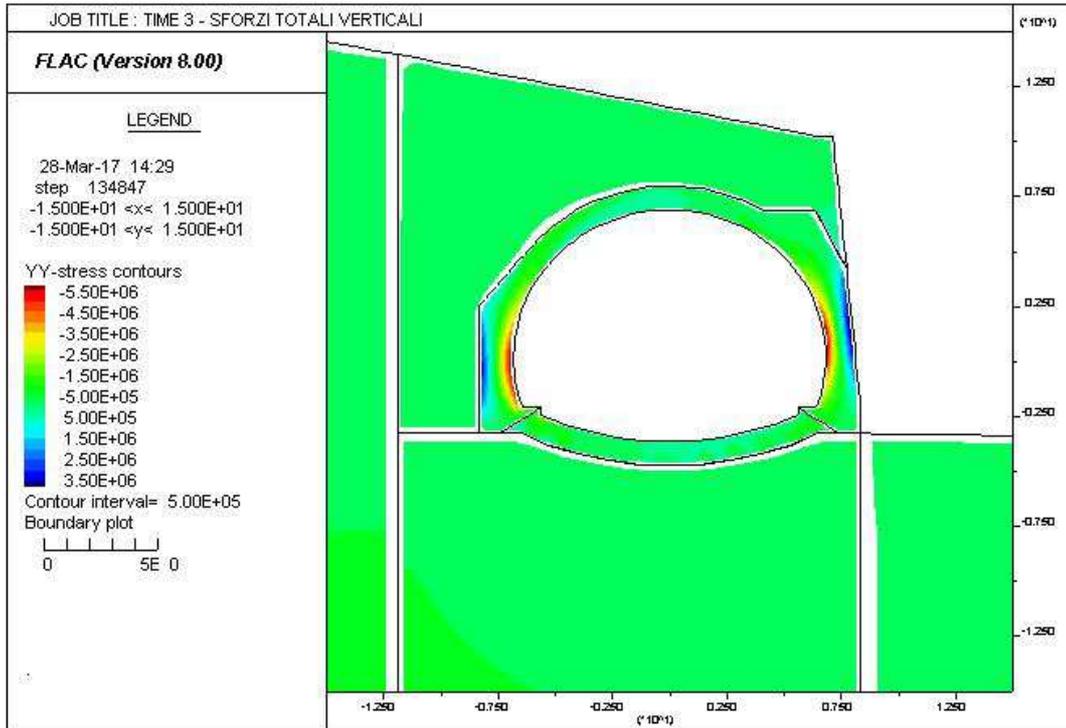
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



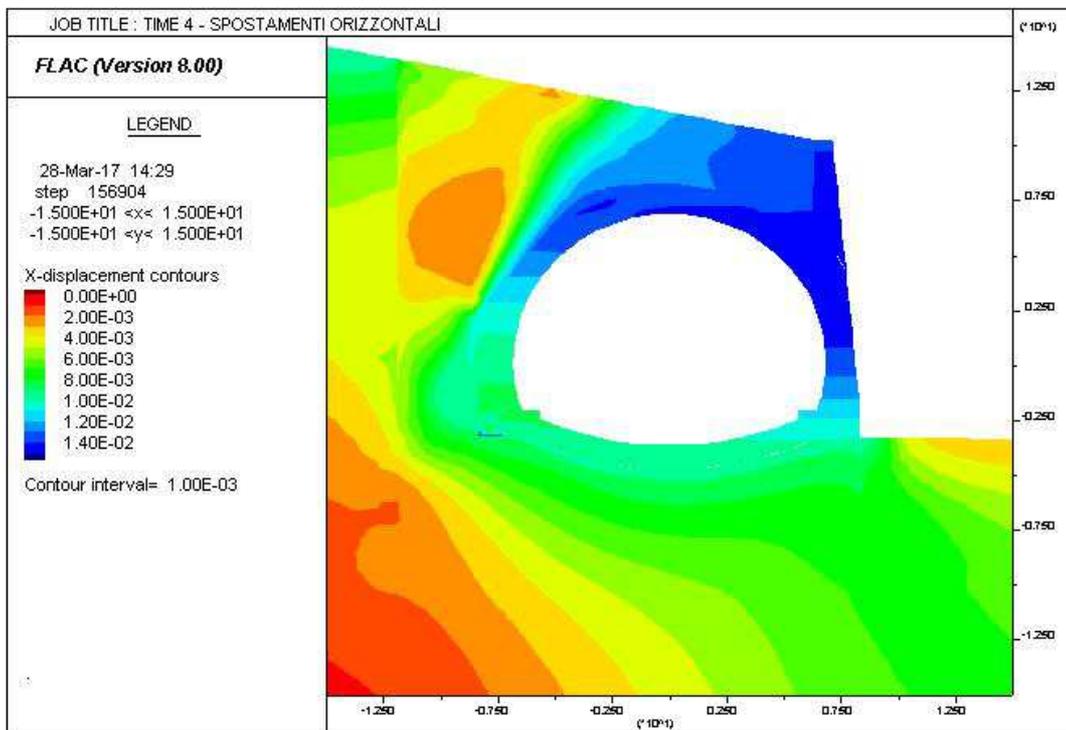
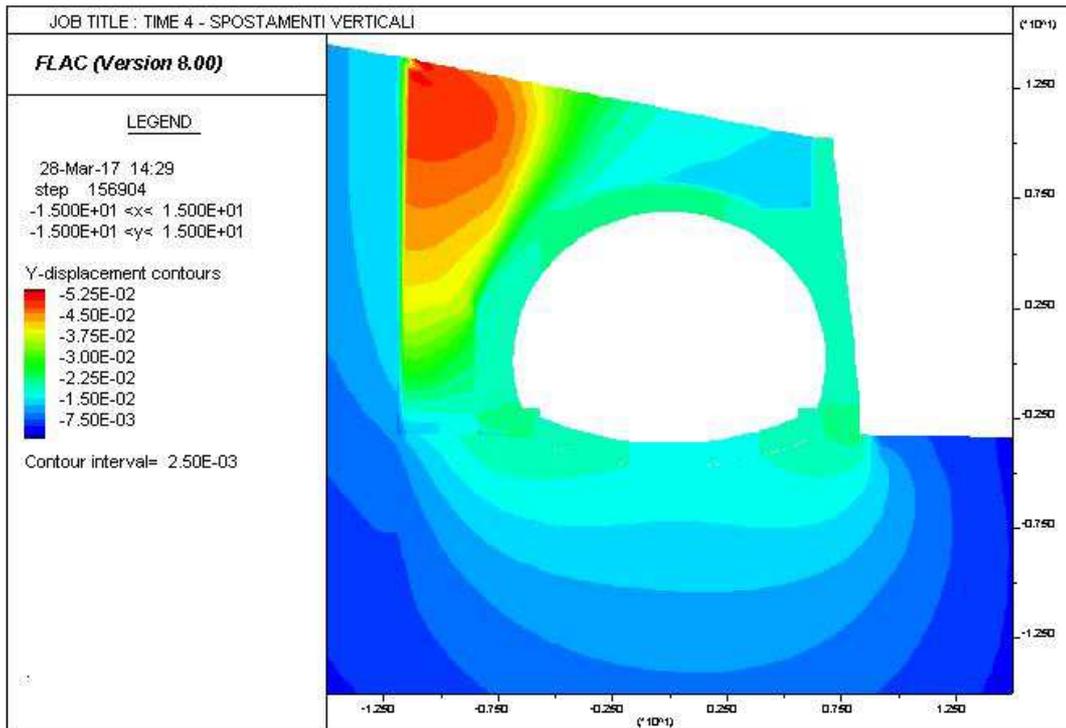
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



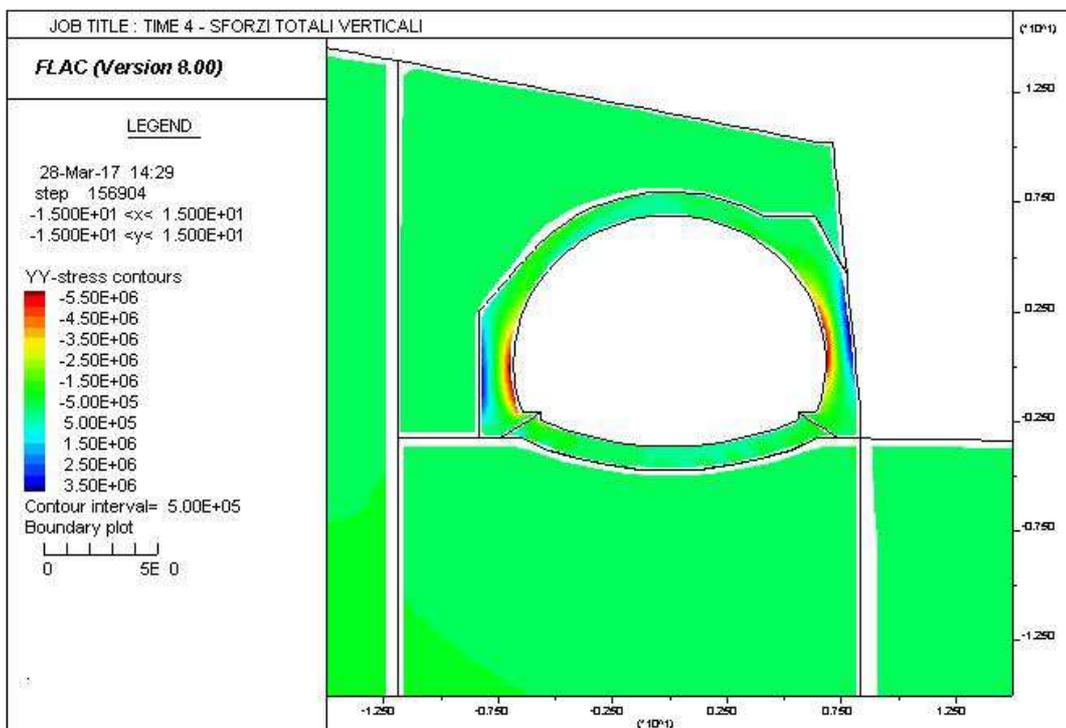
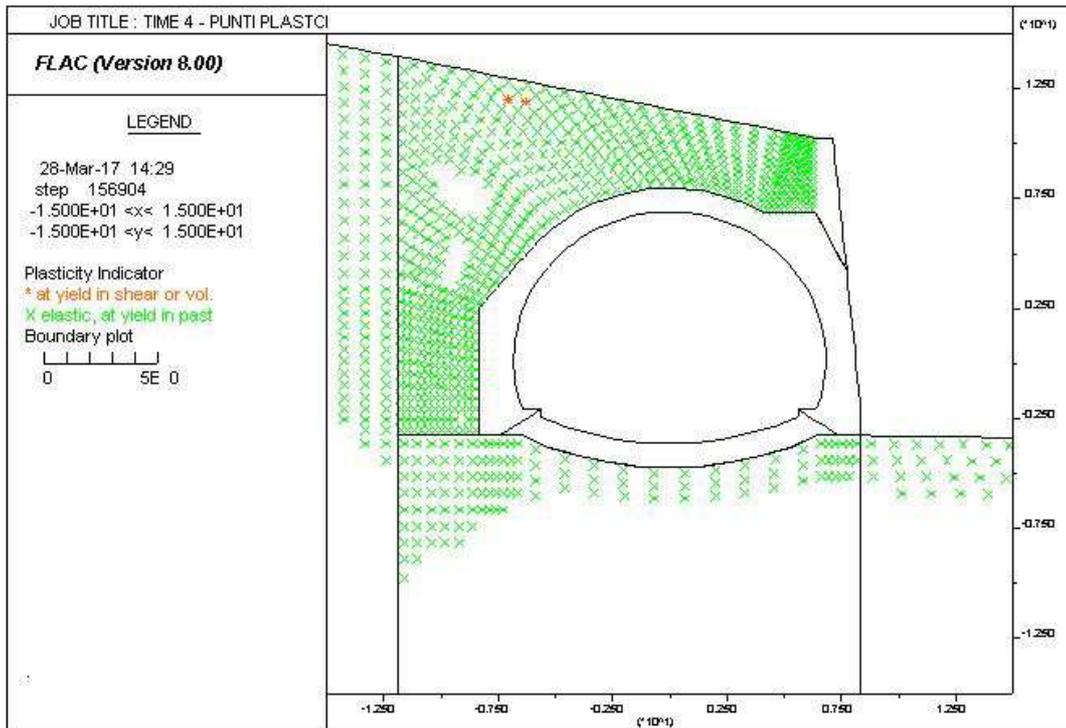
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



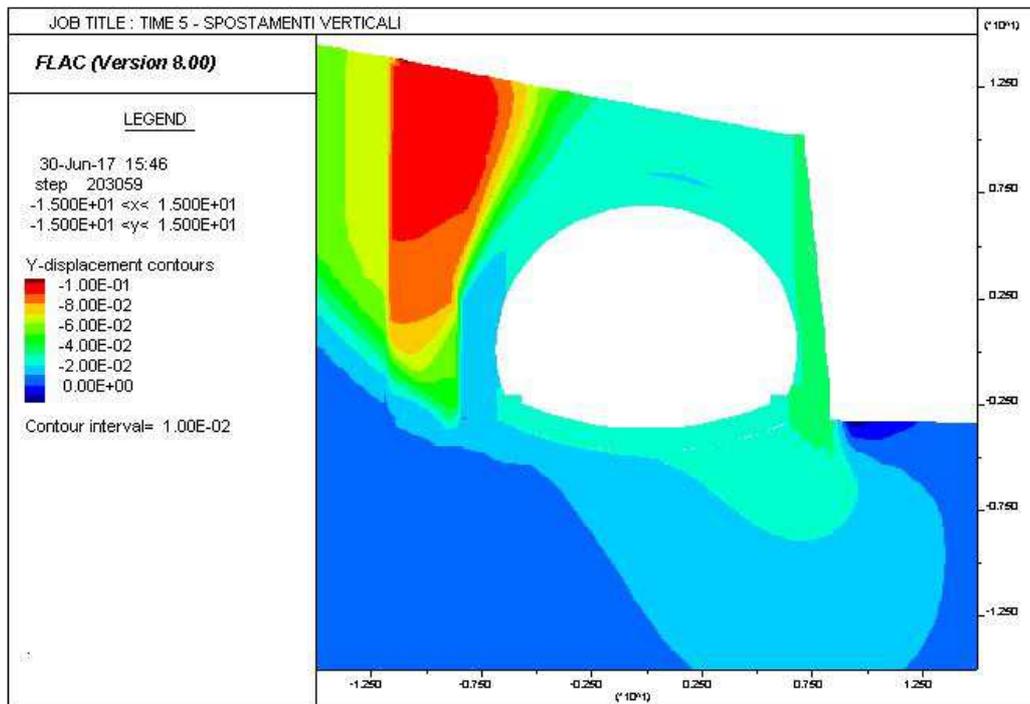
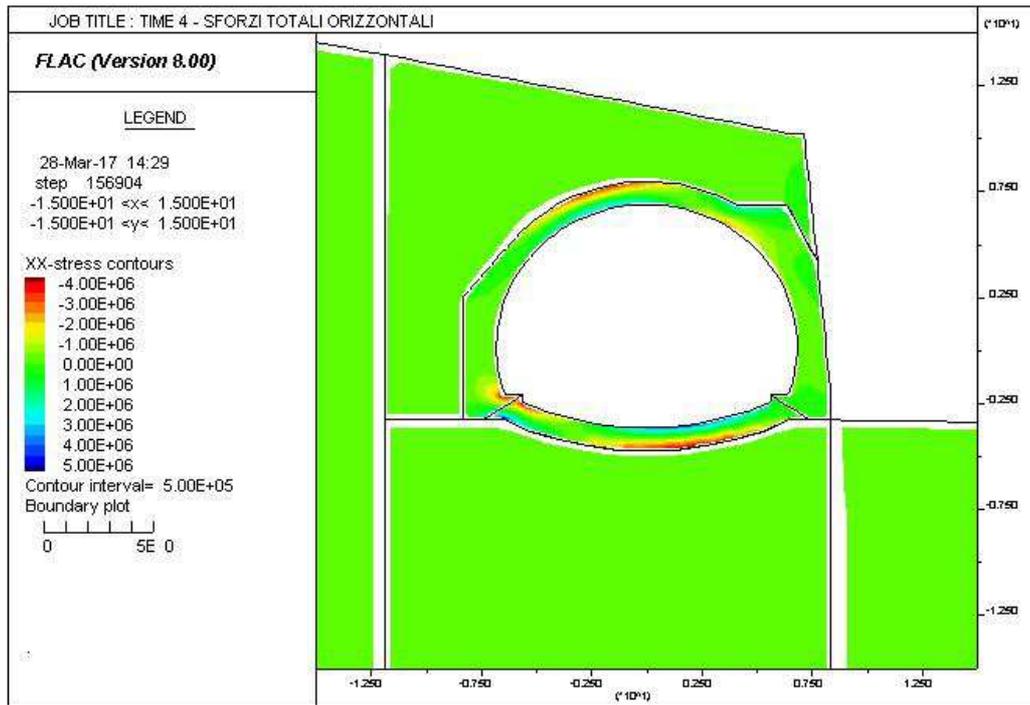
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



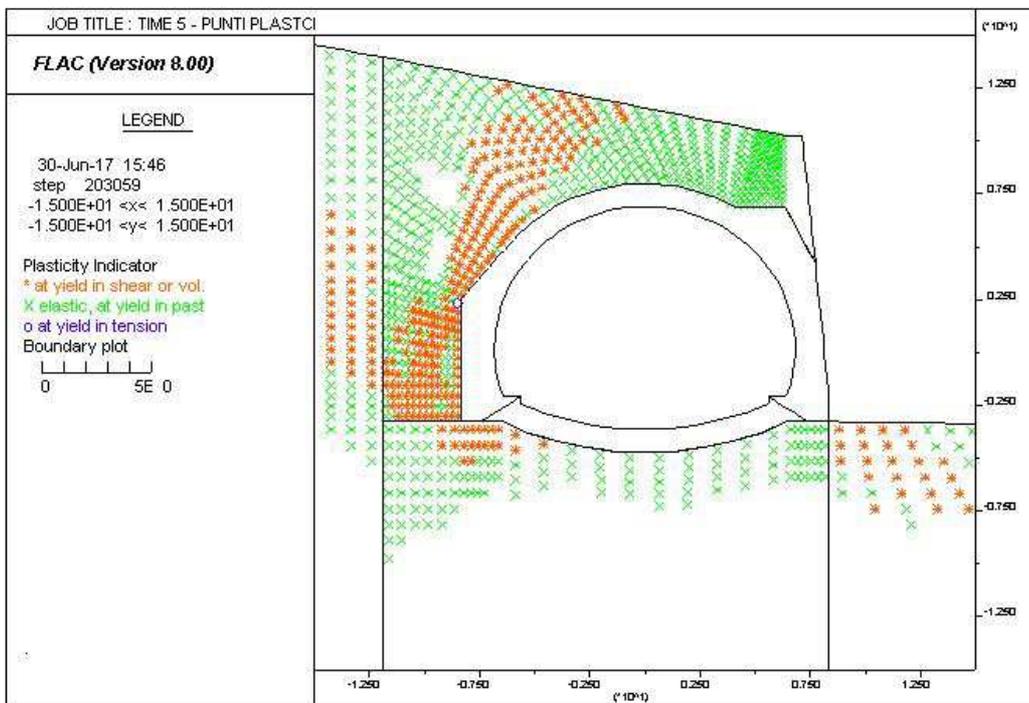
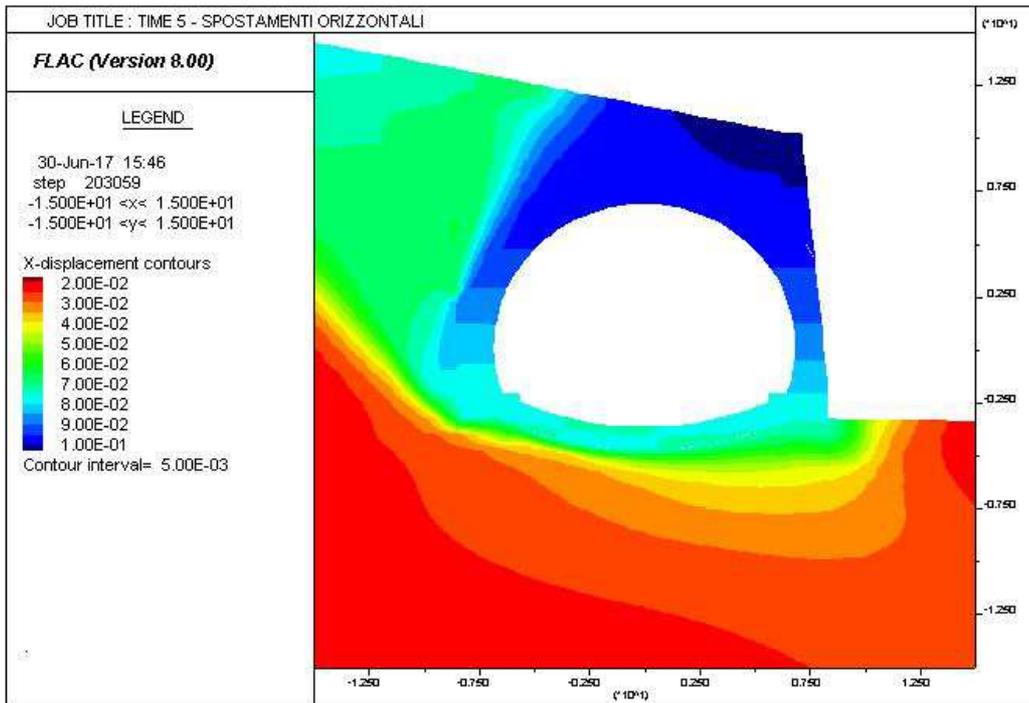
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



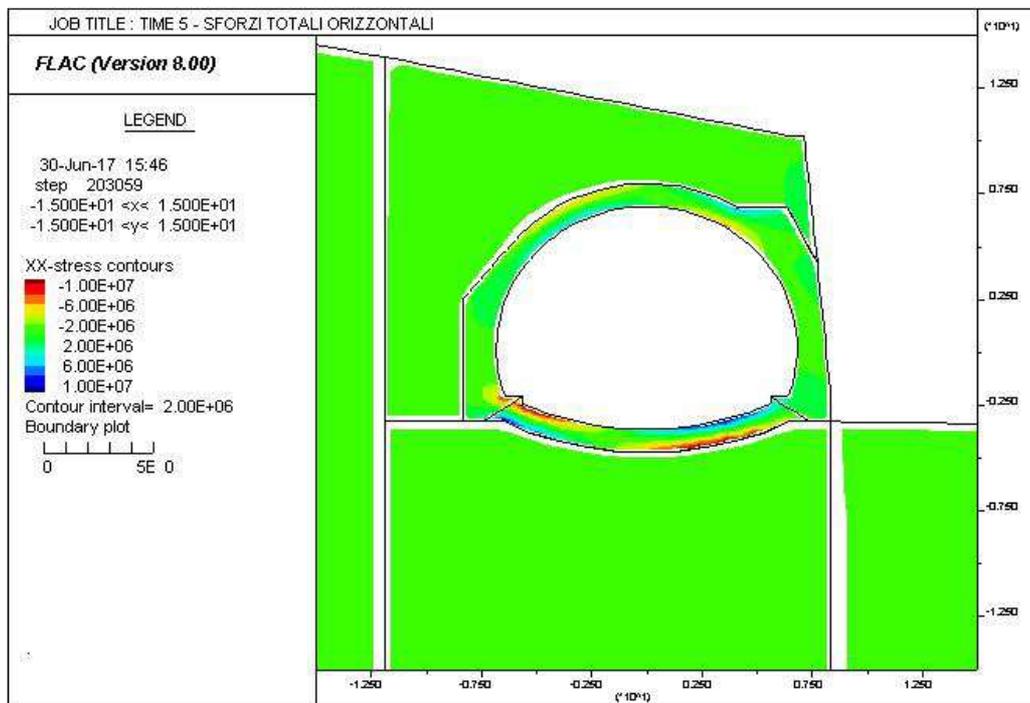
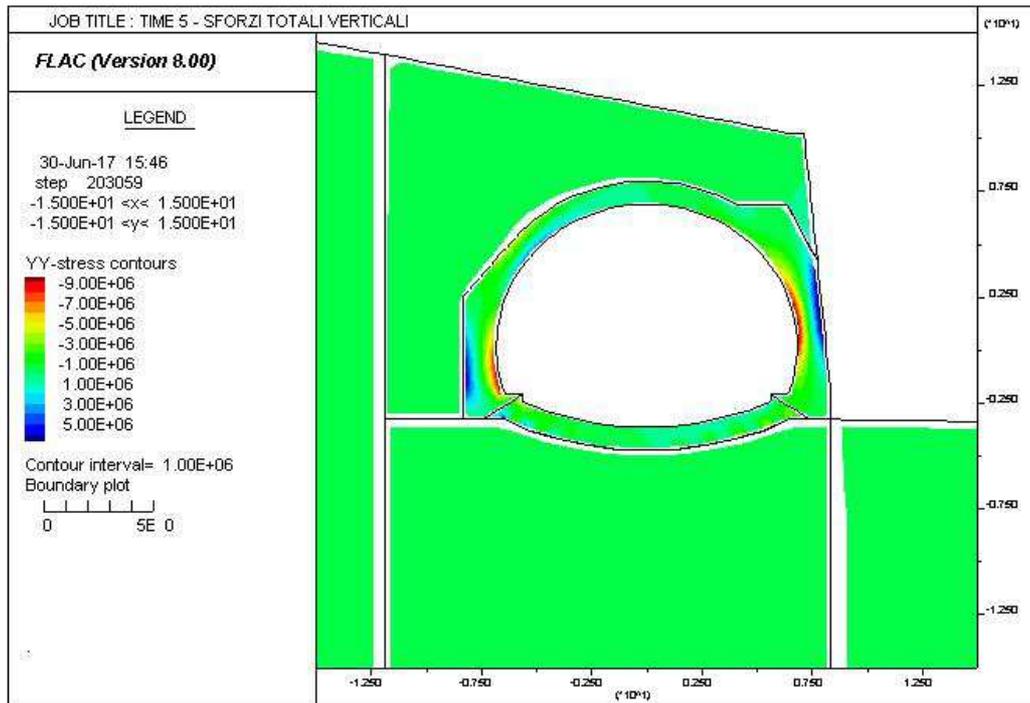
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



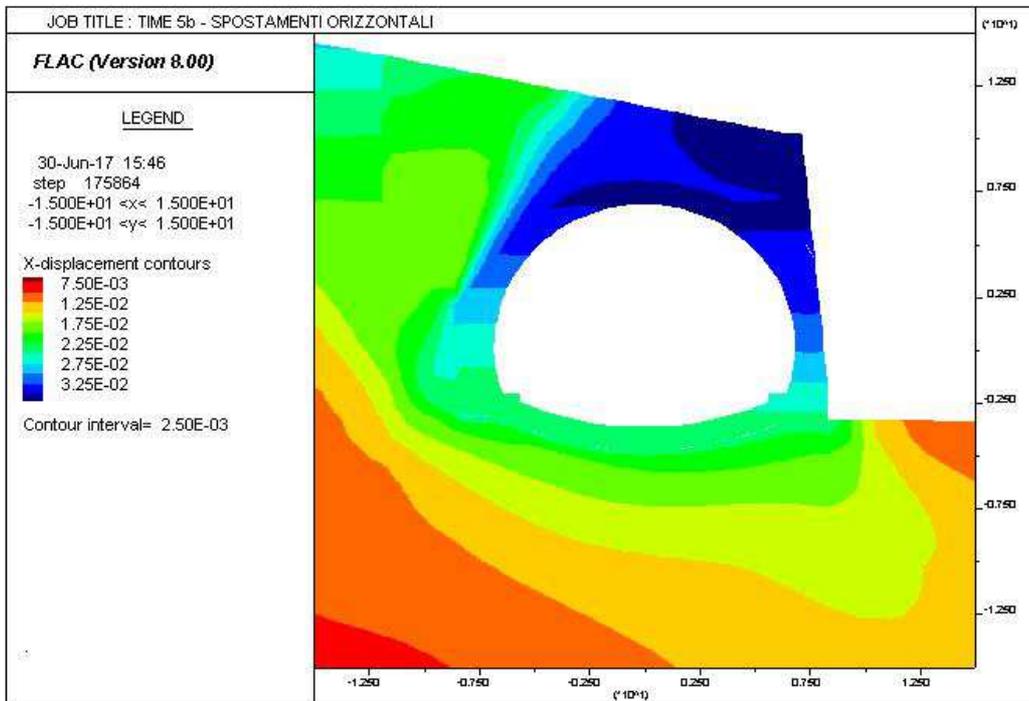
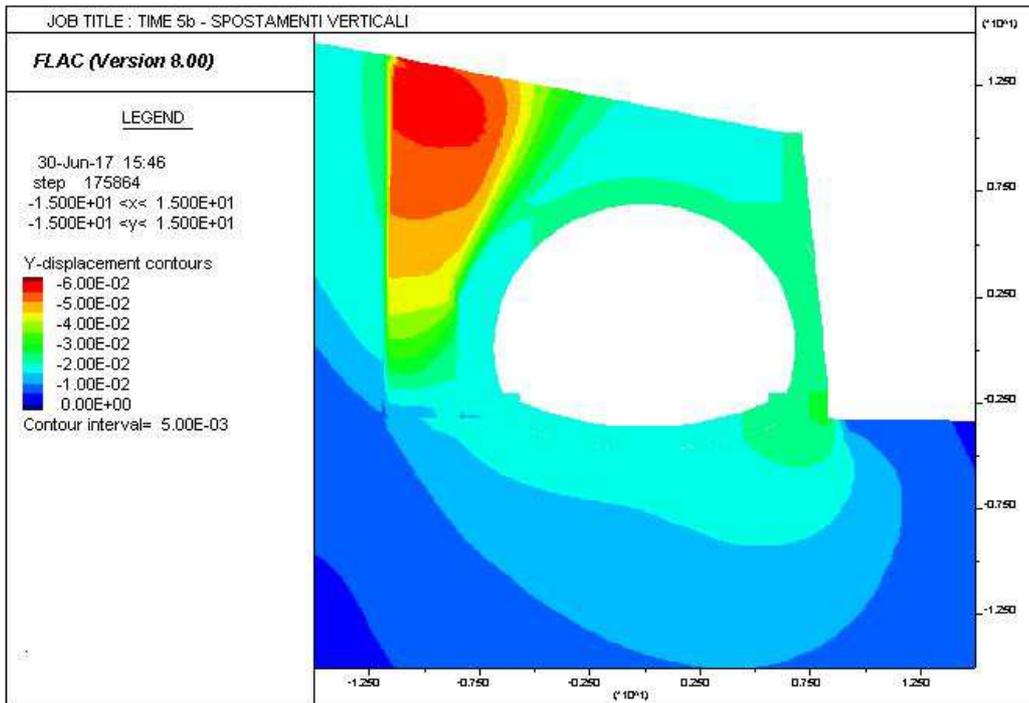
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



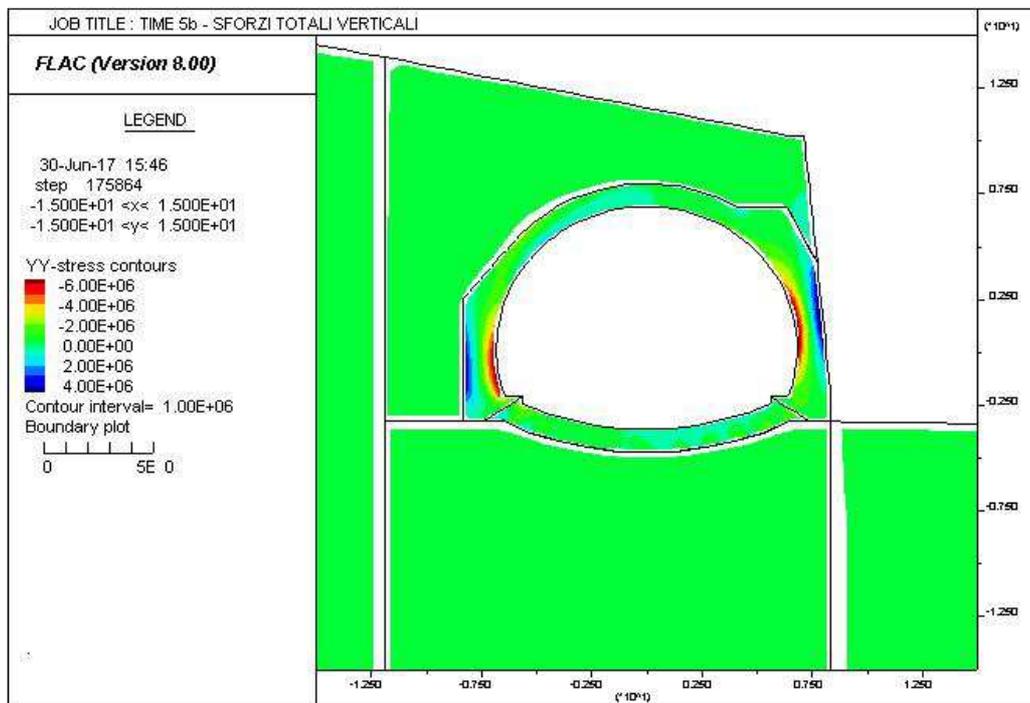
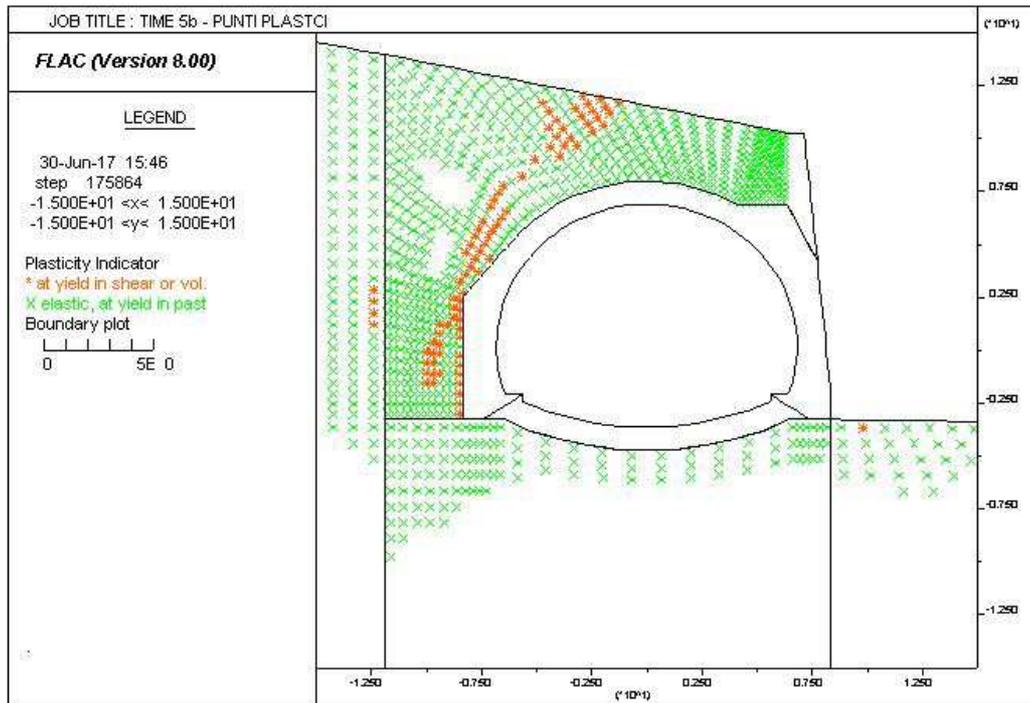
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



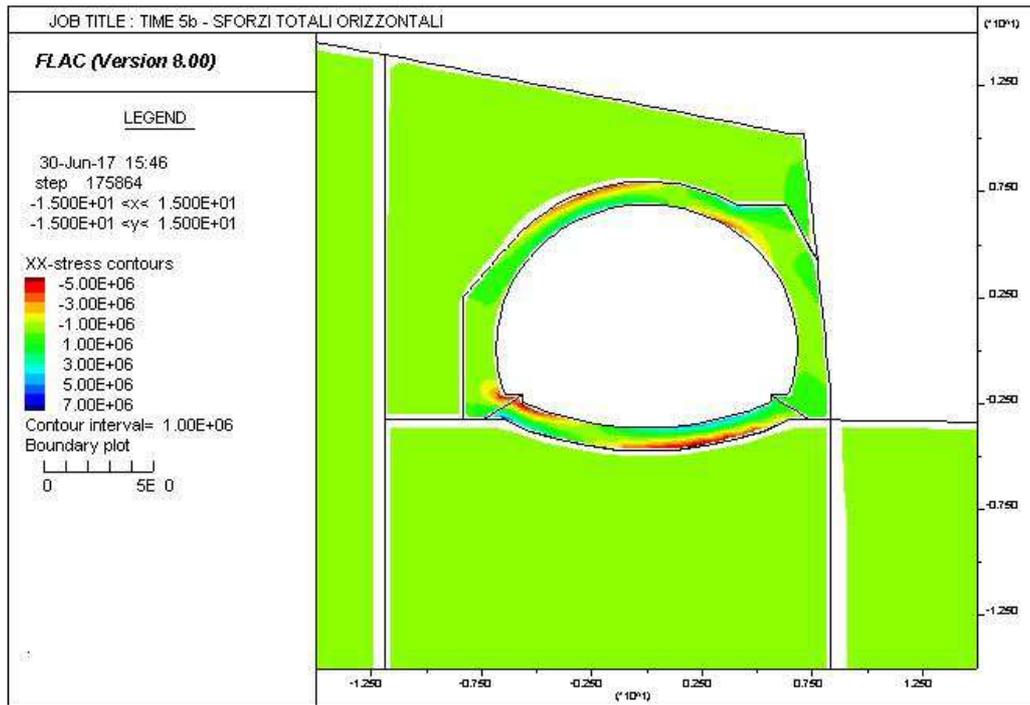
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



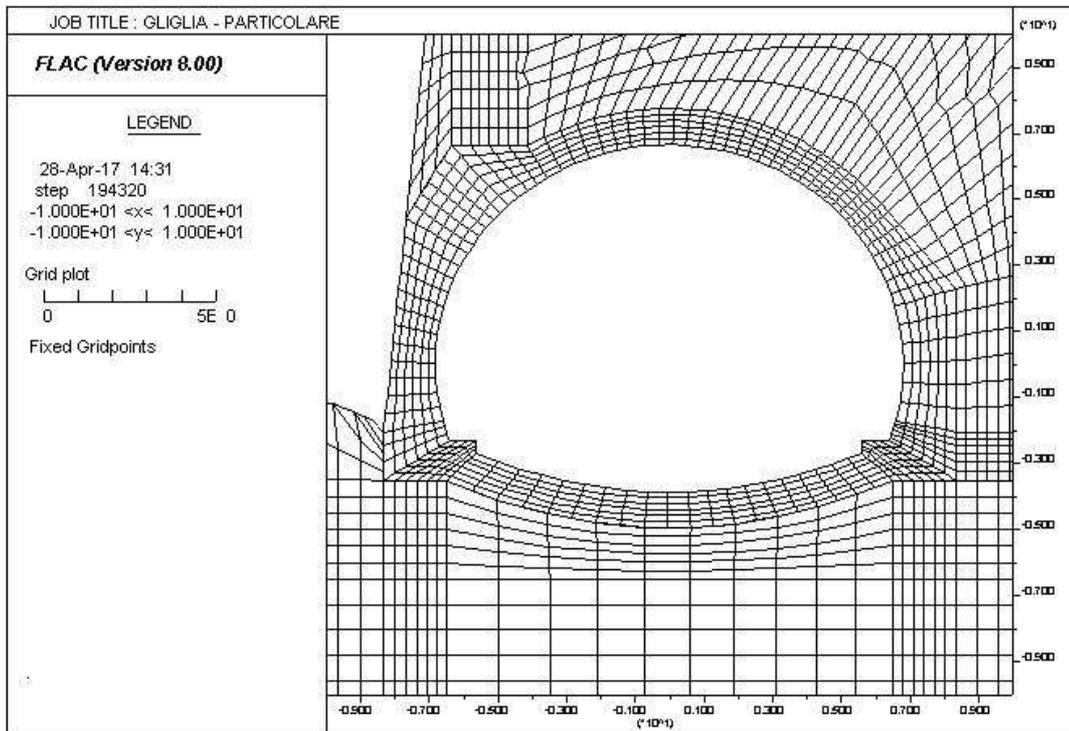
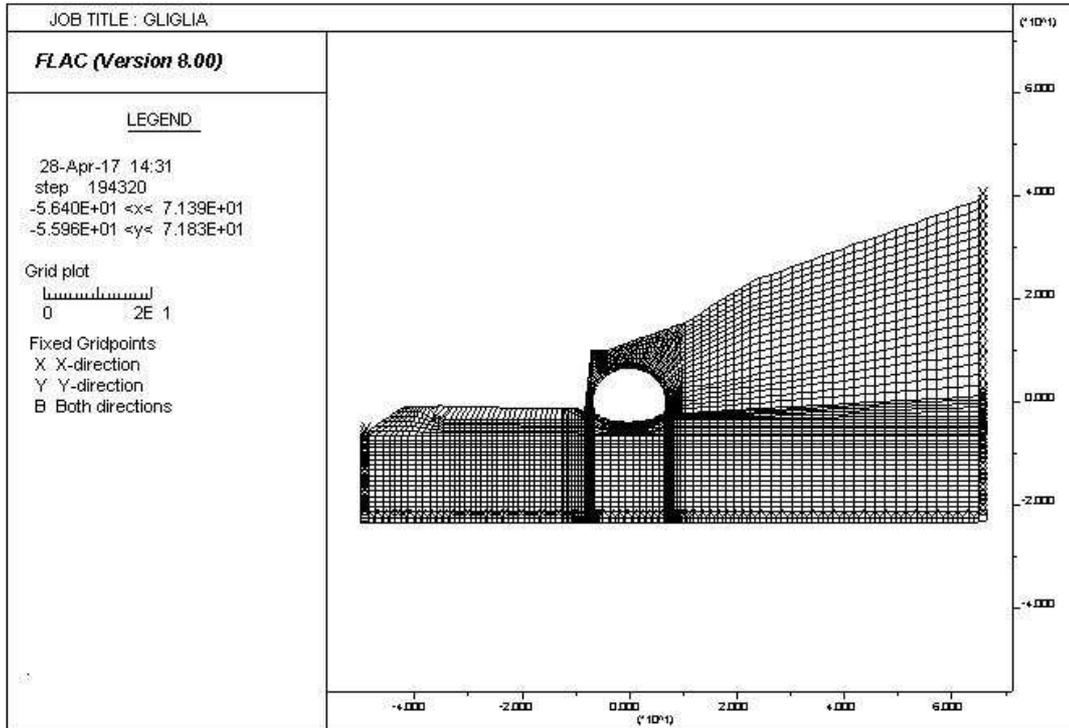
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



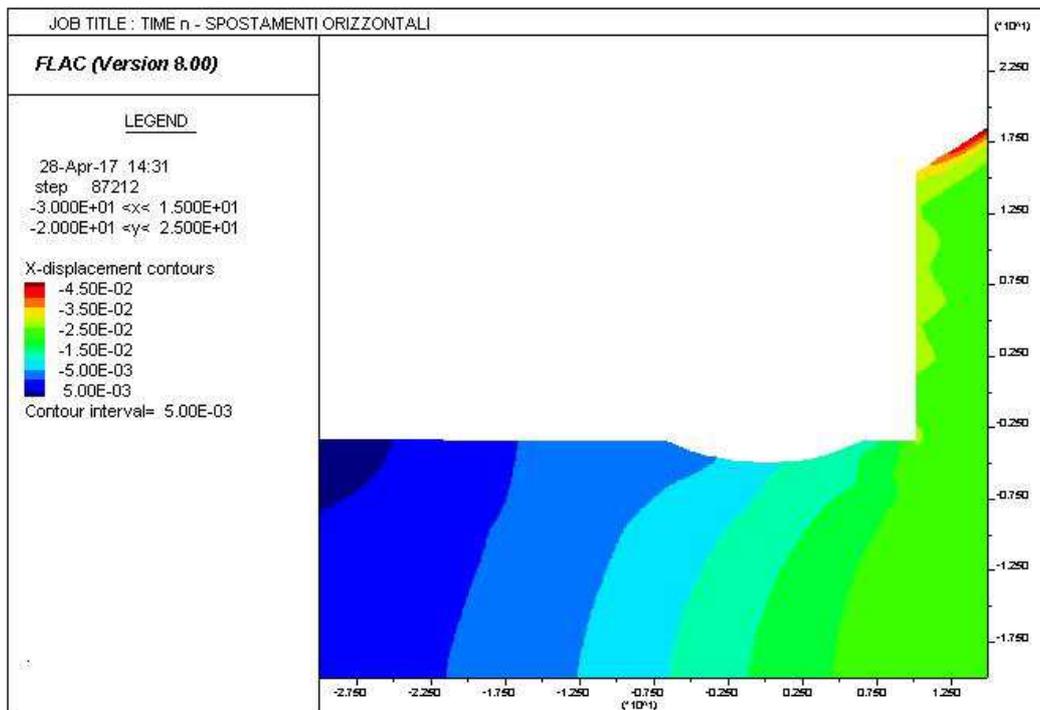
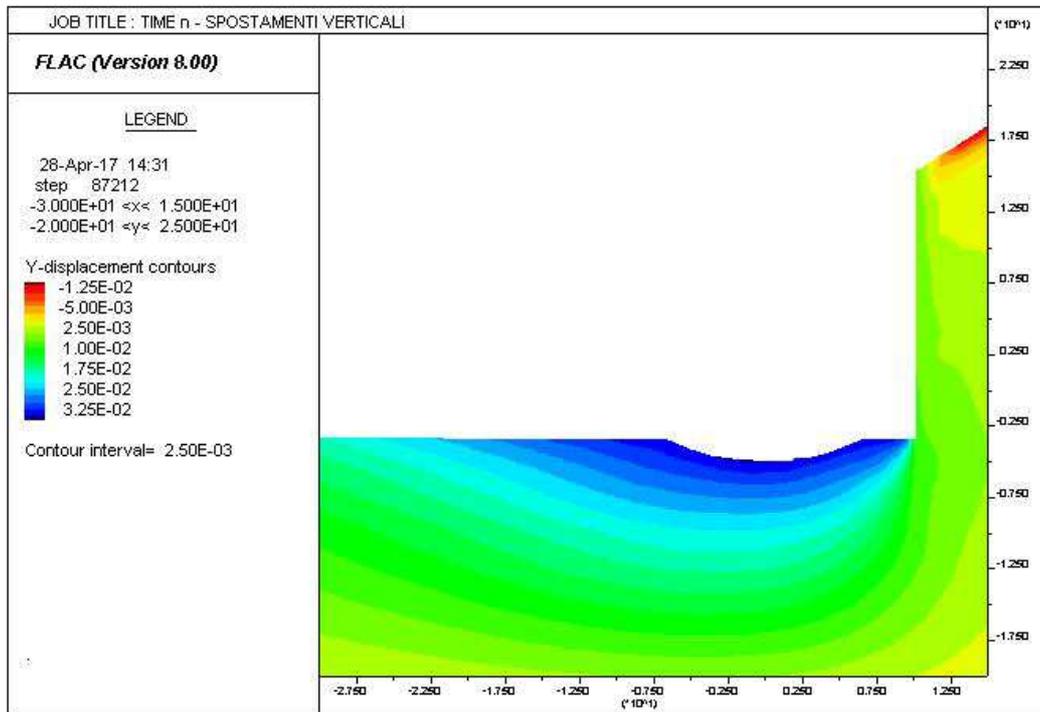
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



13.2 MODELLO 2 – GA asim nord

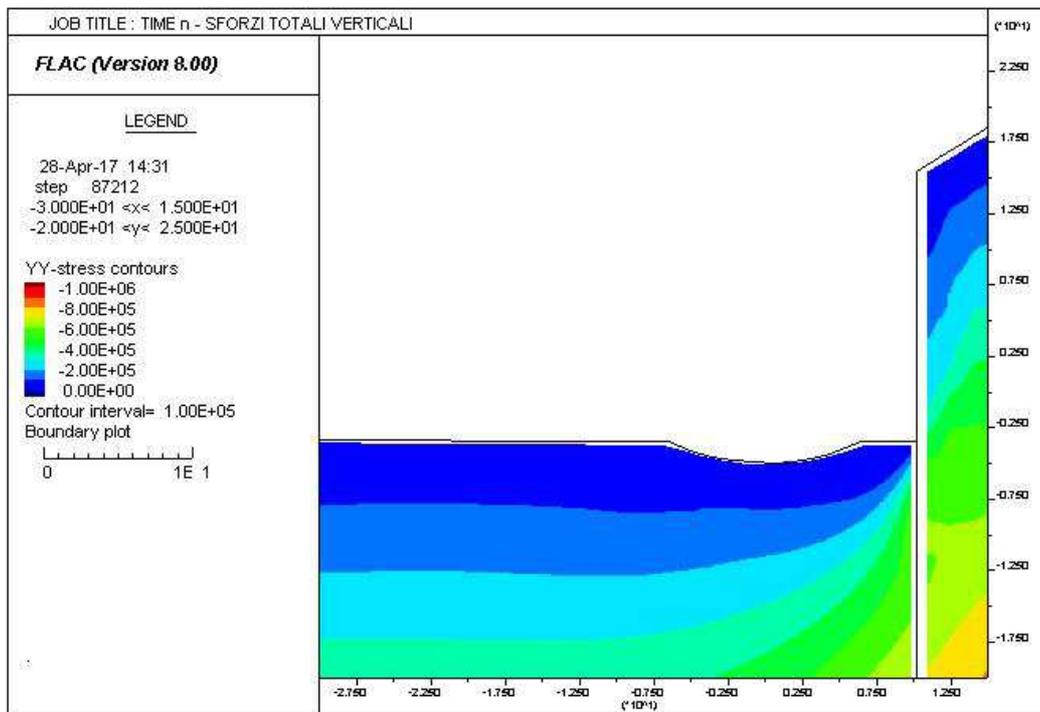
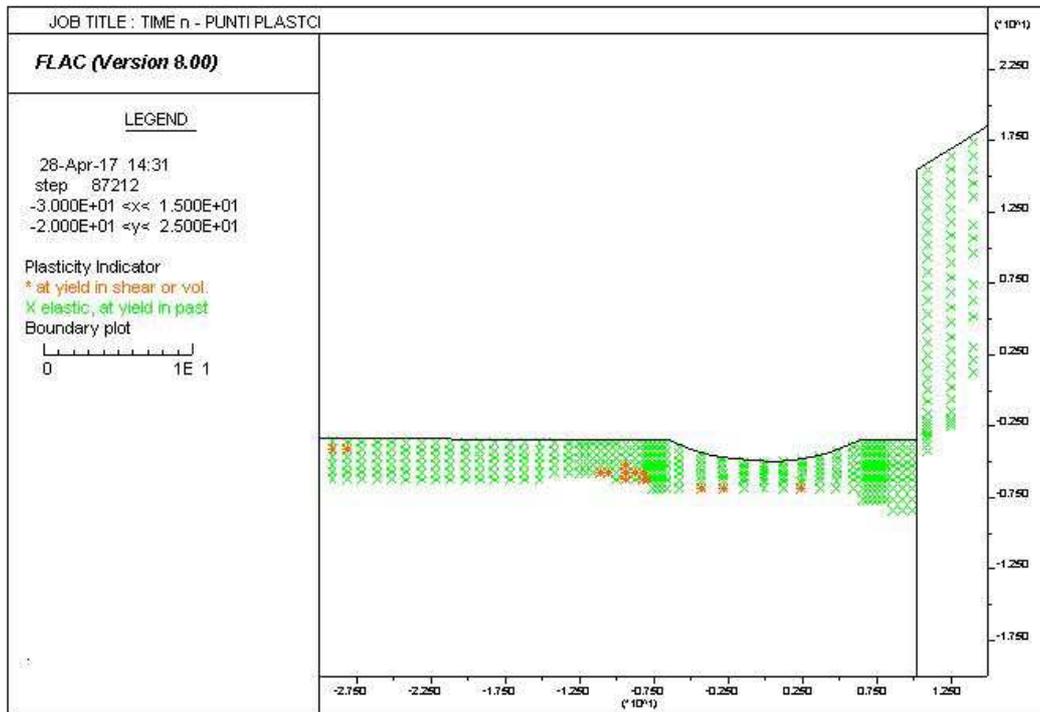


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



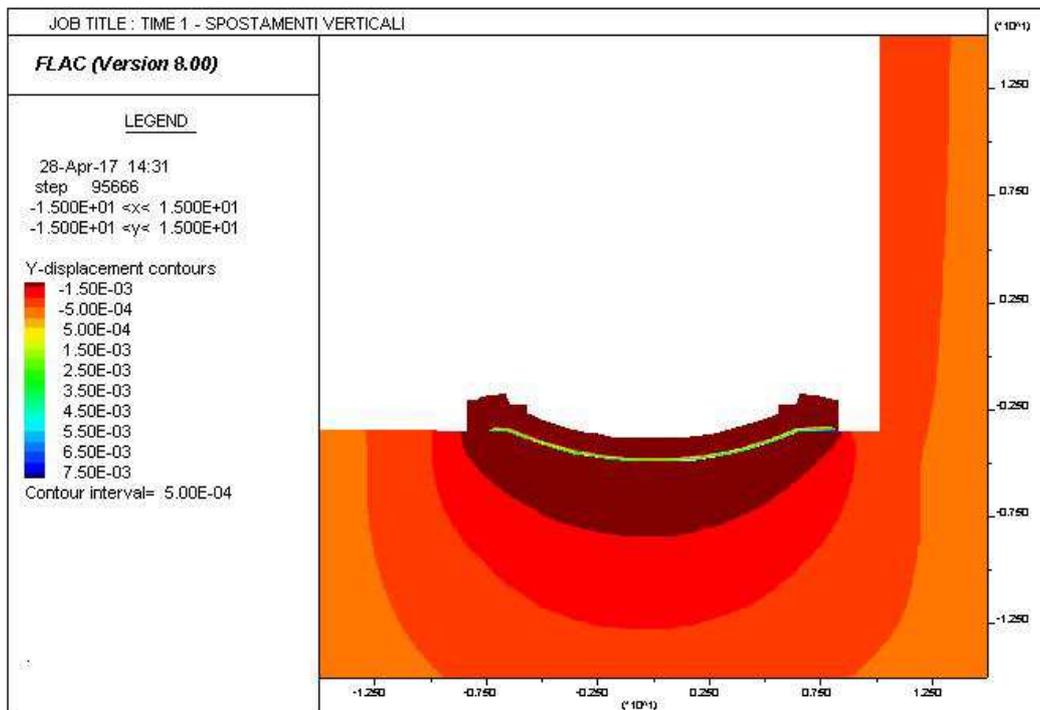
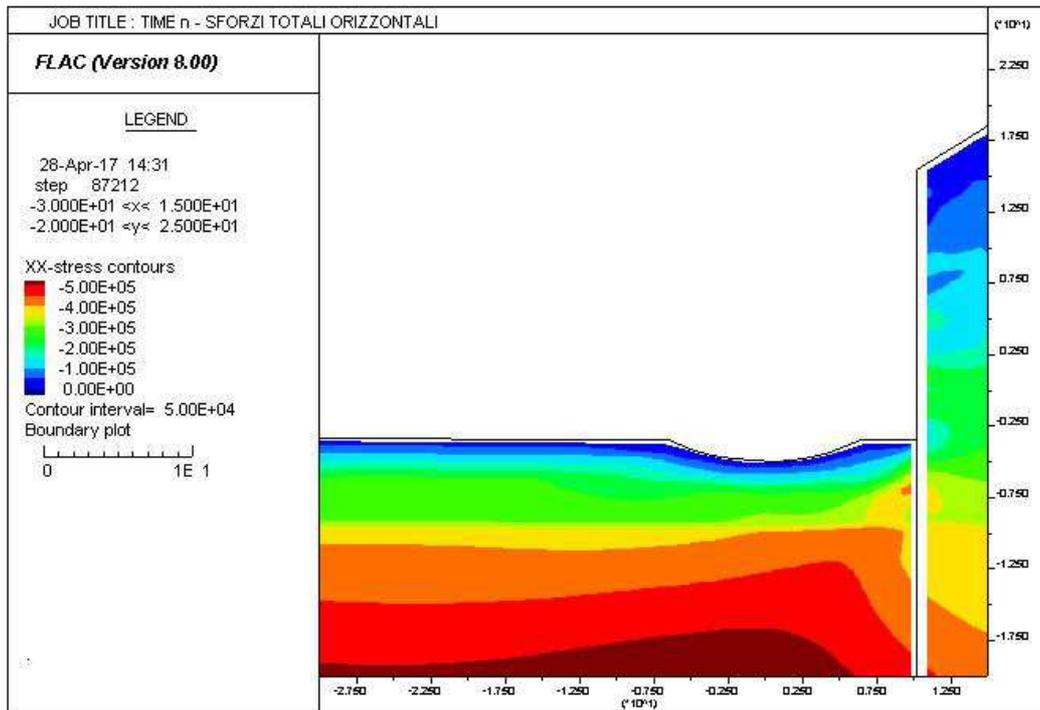
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---



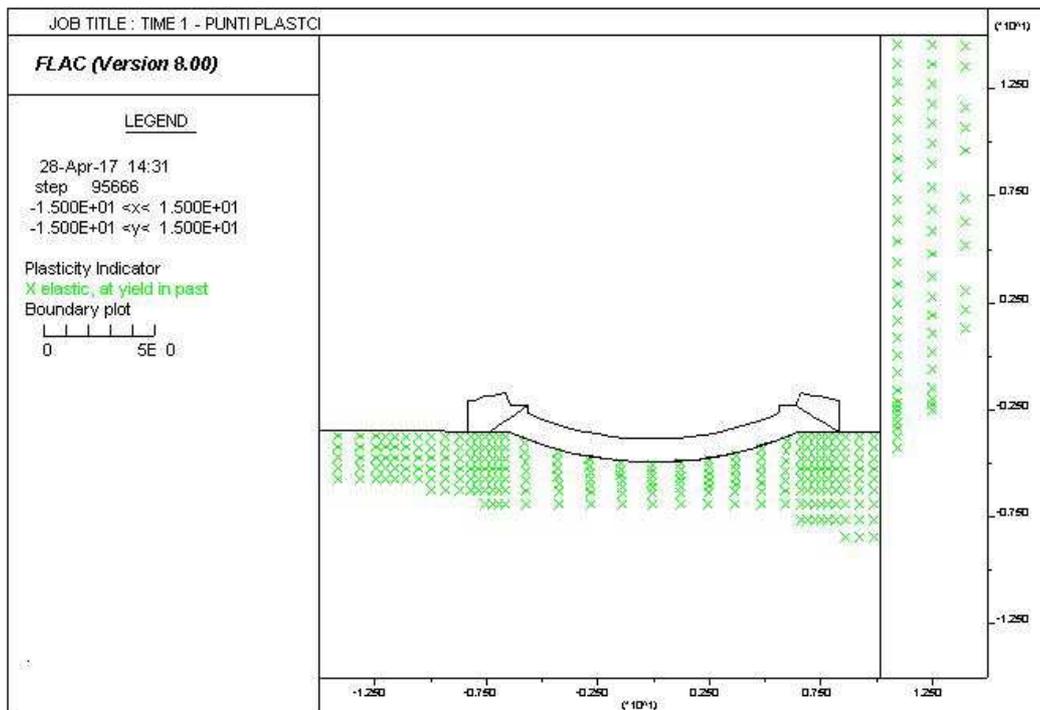
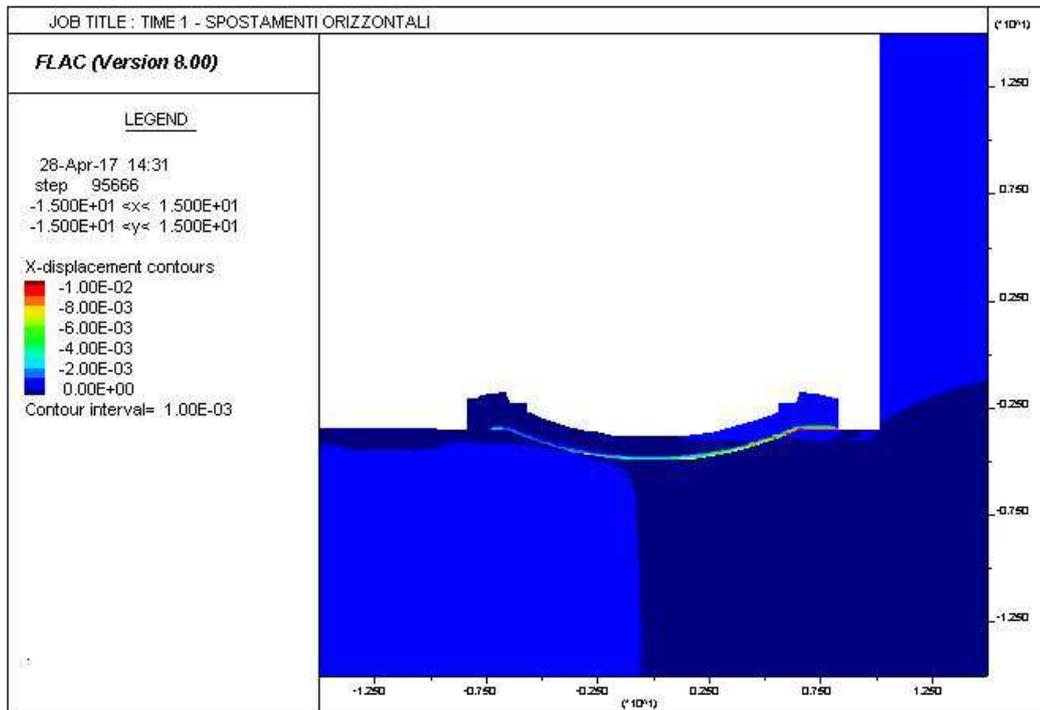
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

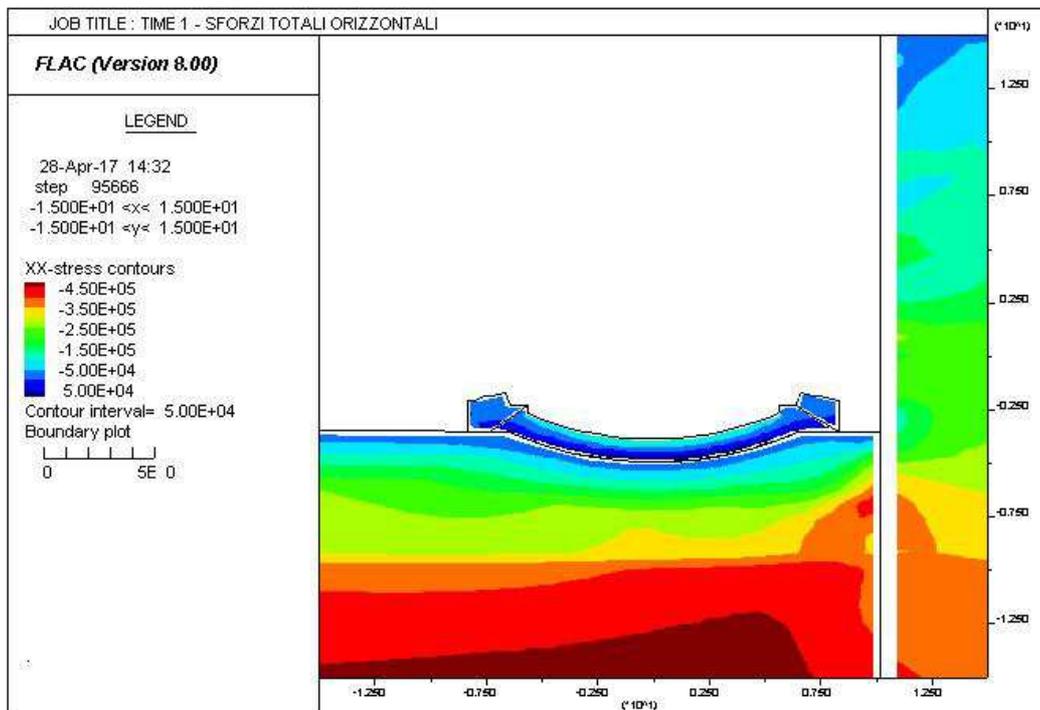
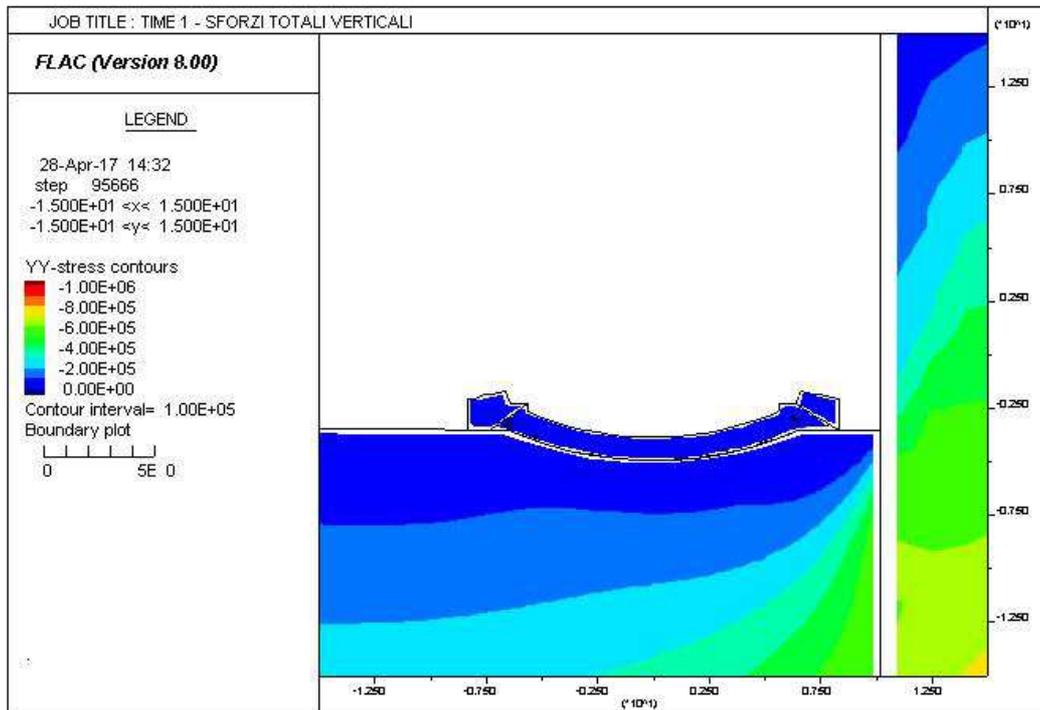


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

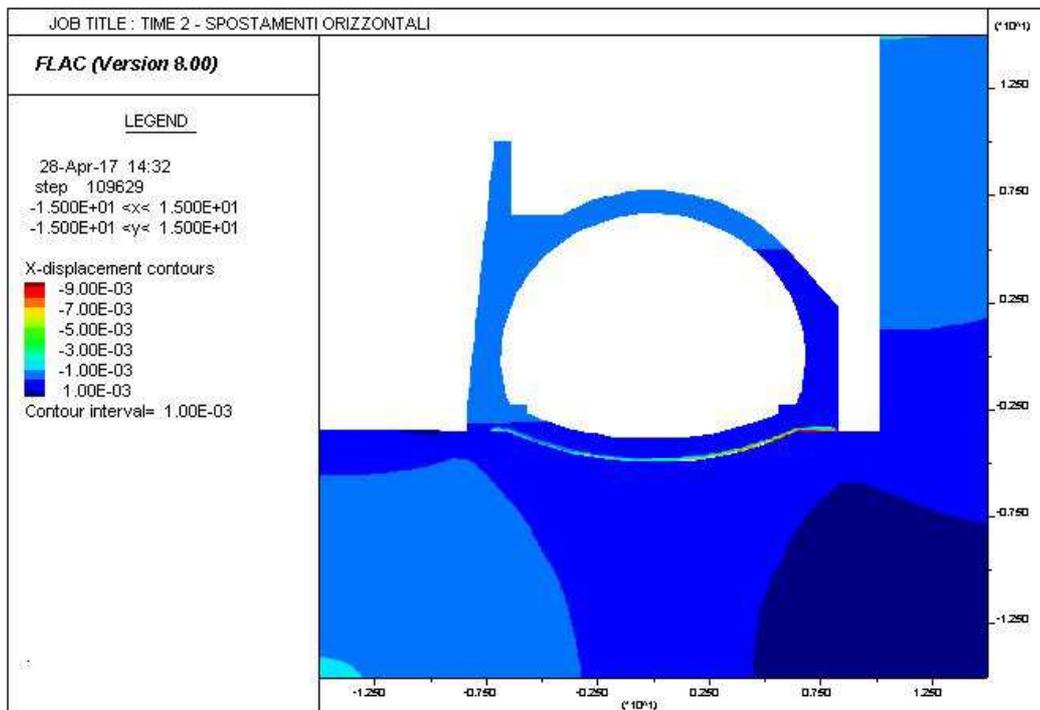
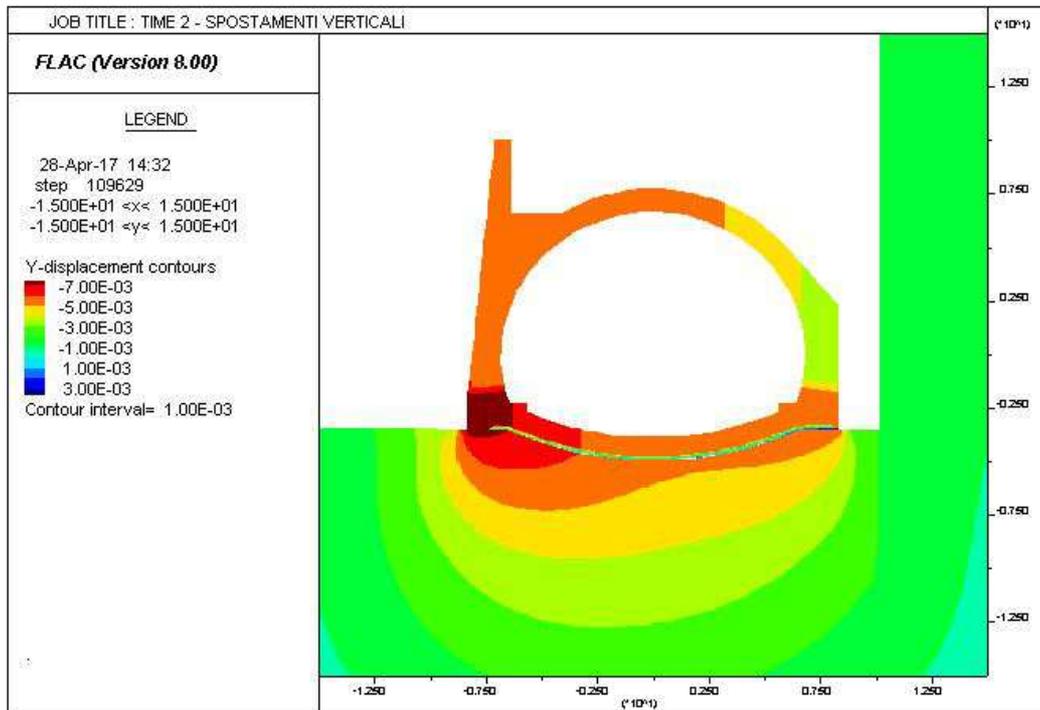


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



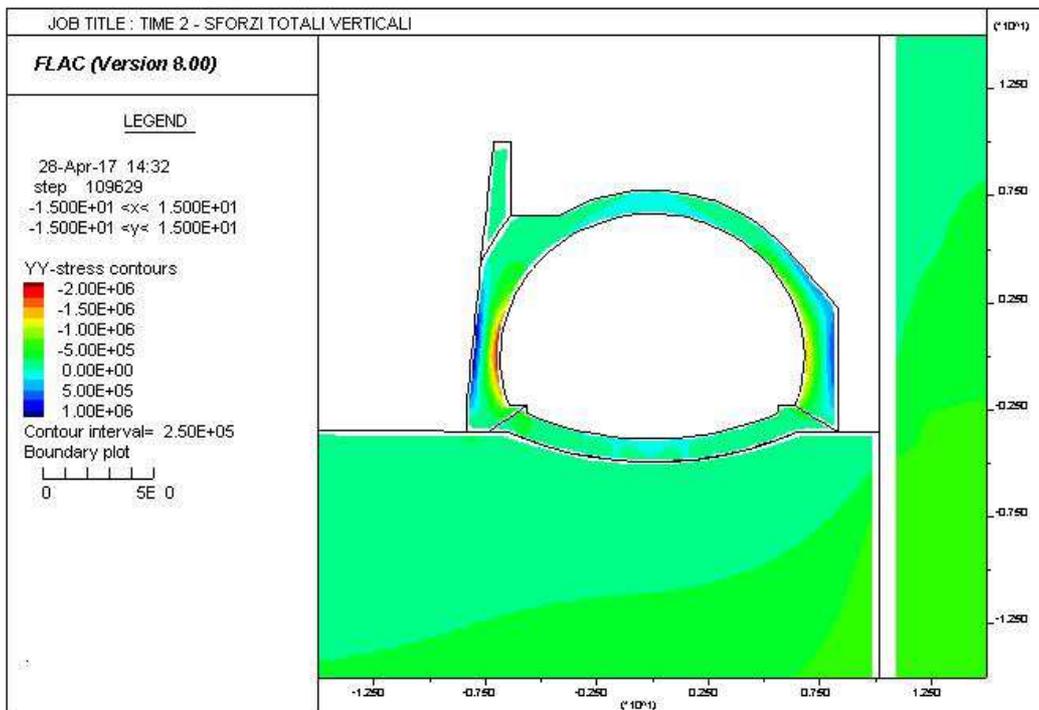
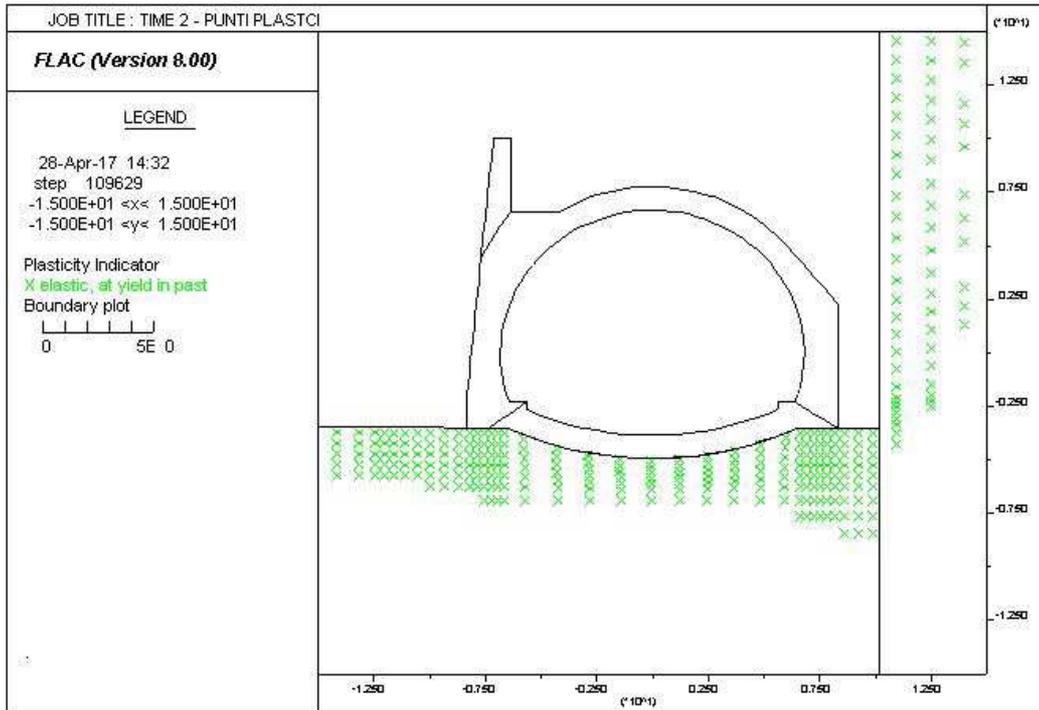
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

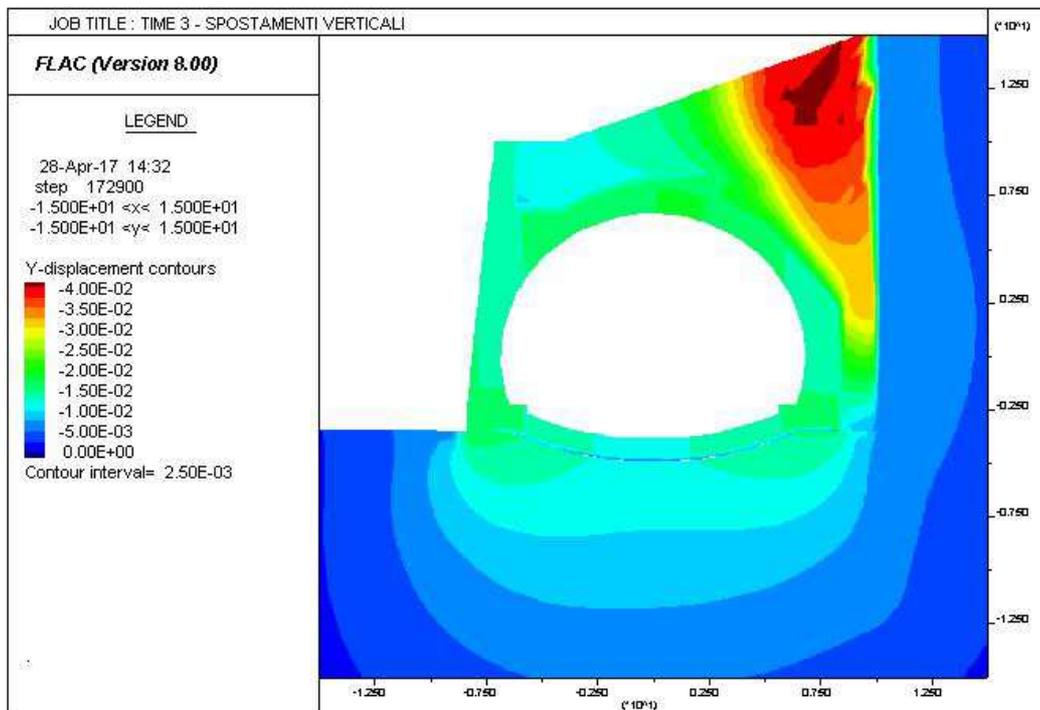
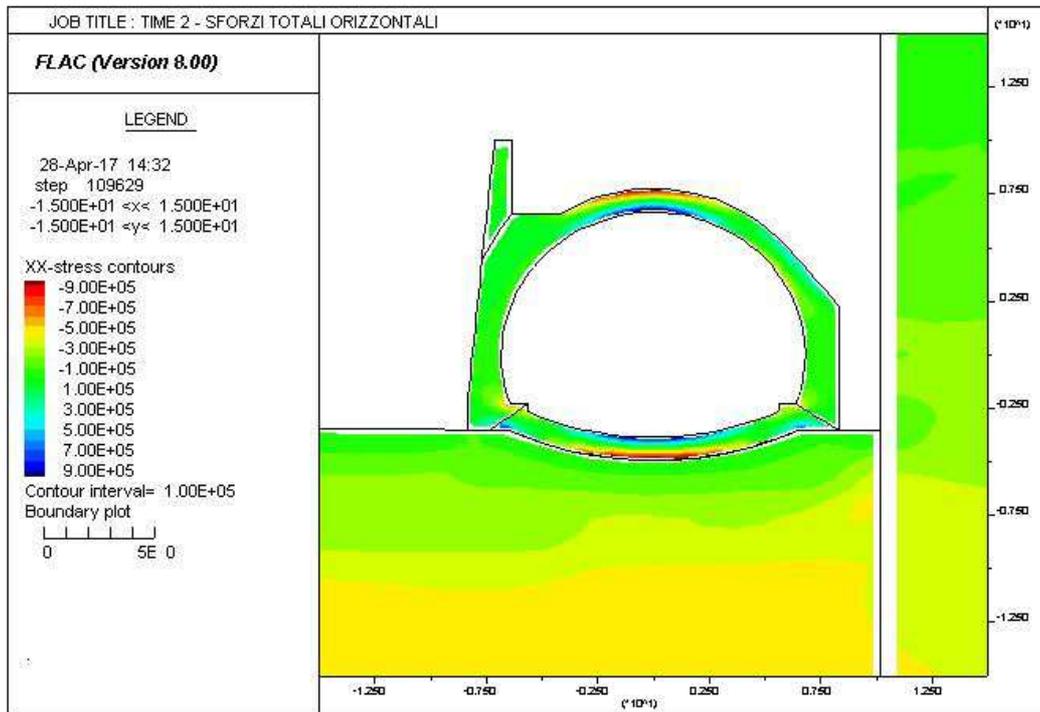


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

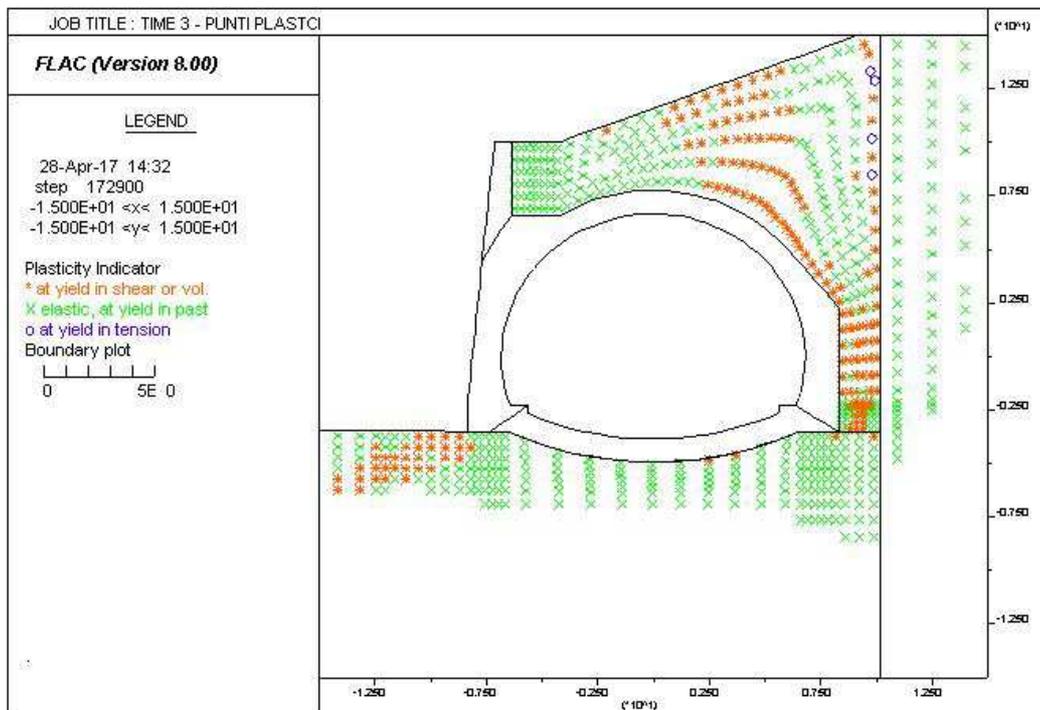
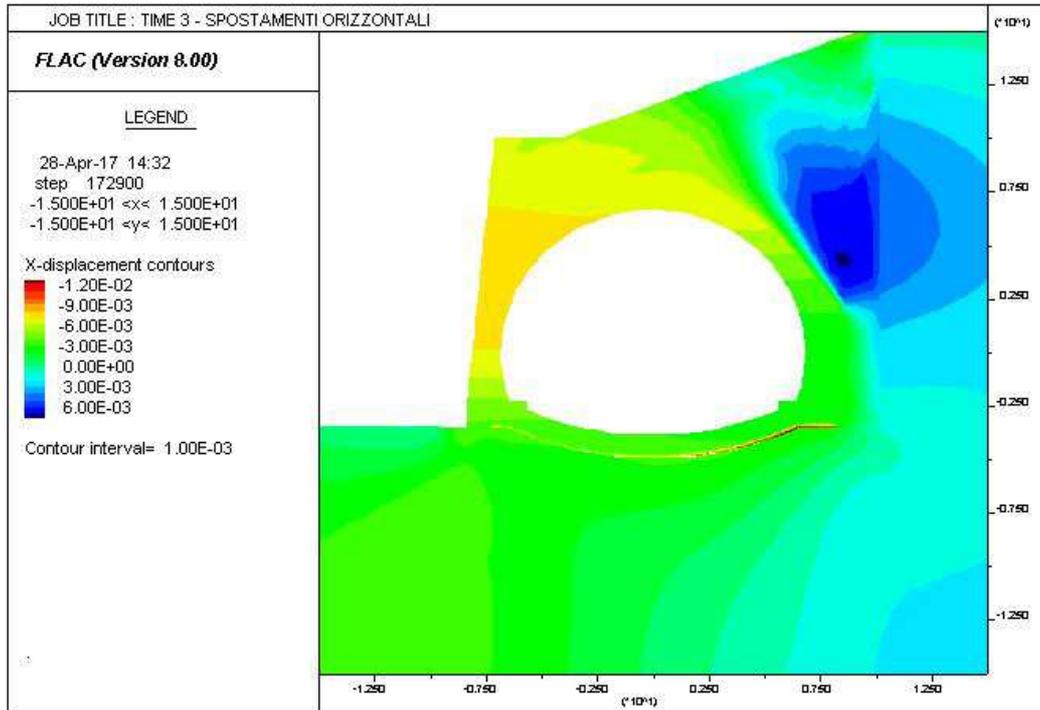


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

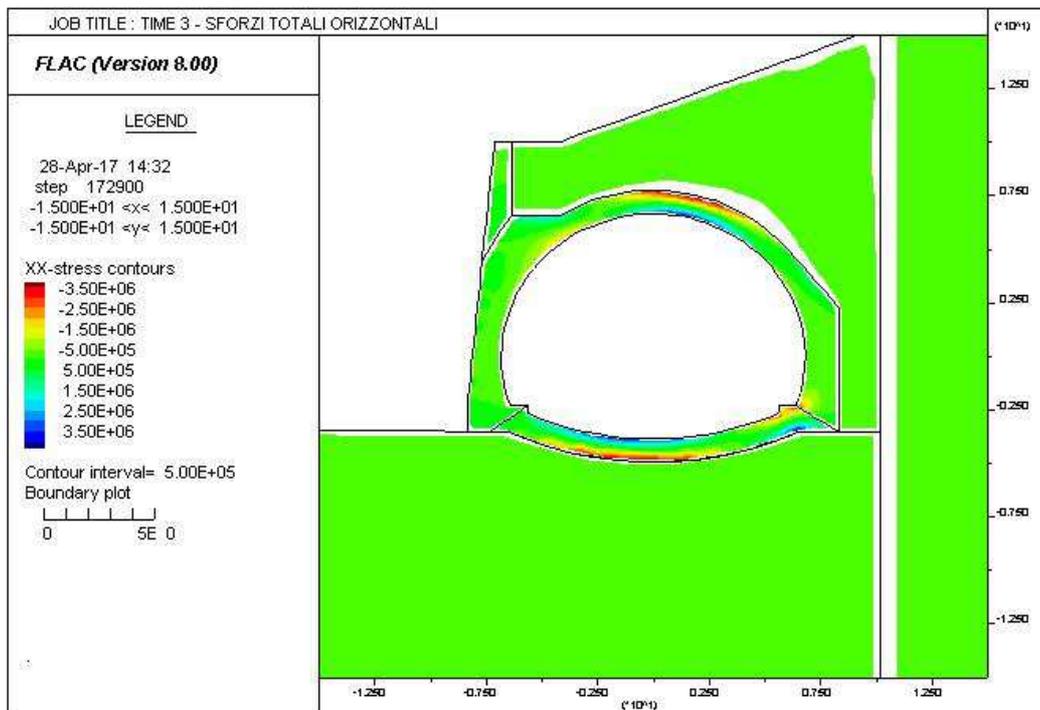
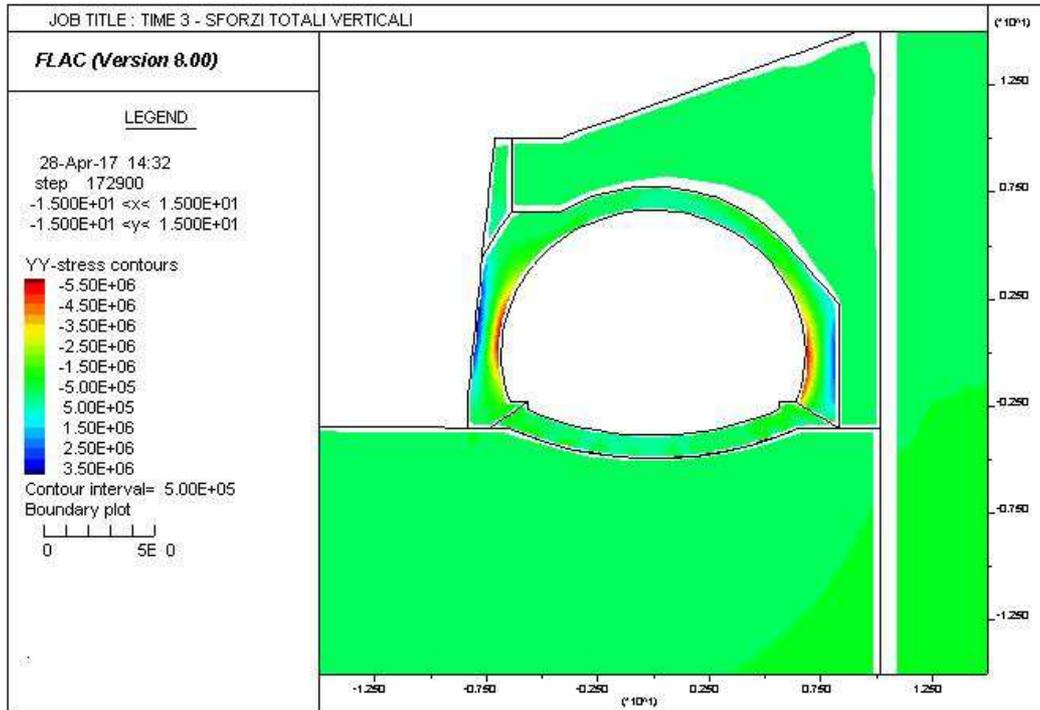


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

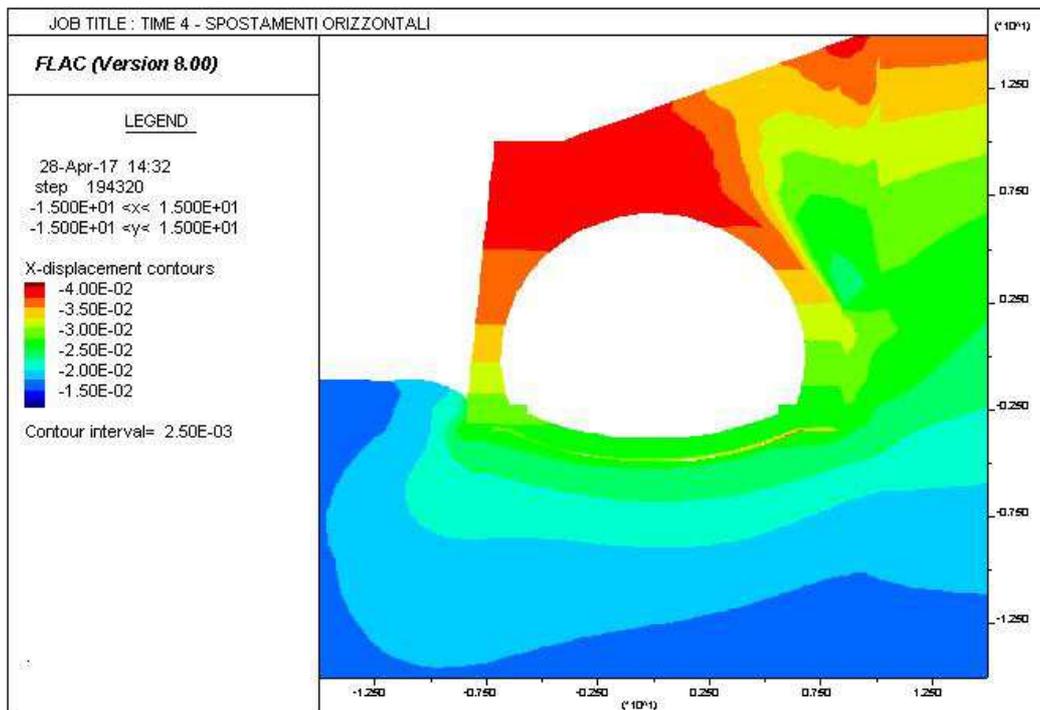
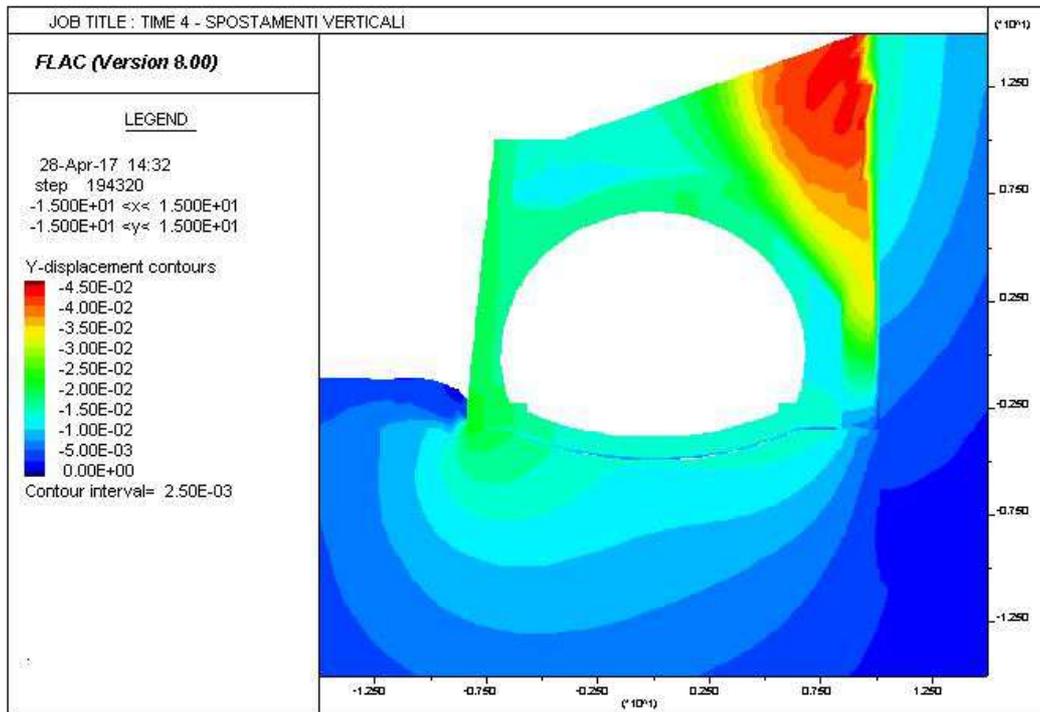
---



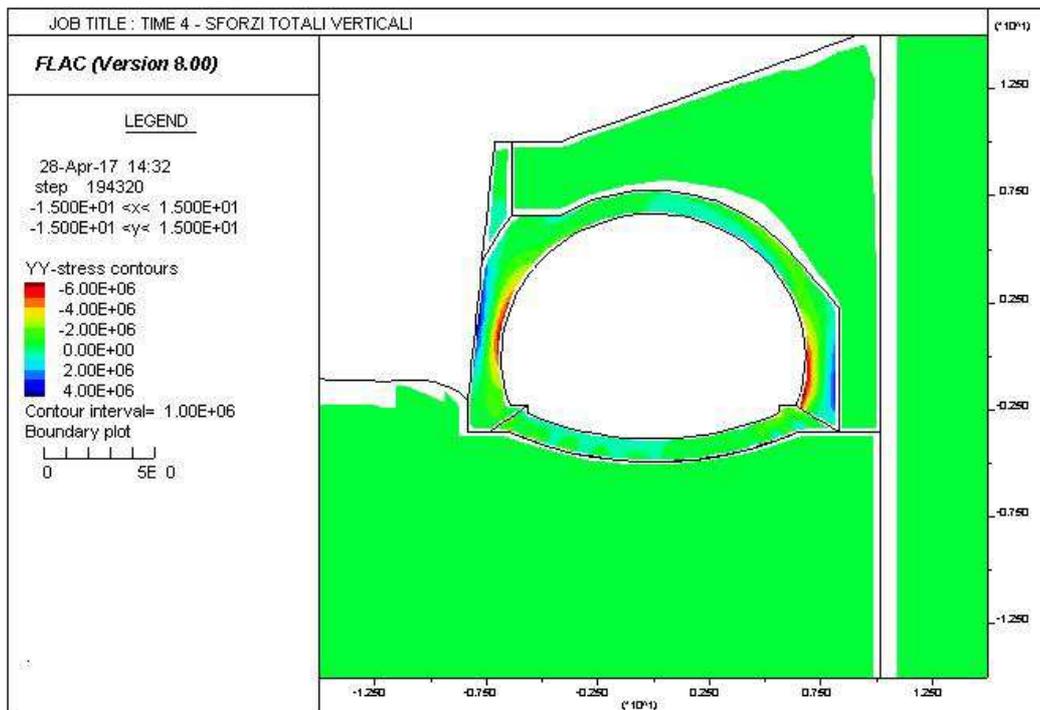
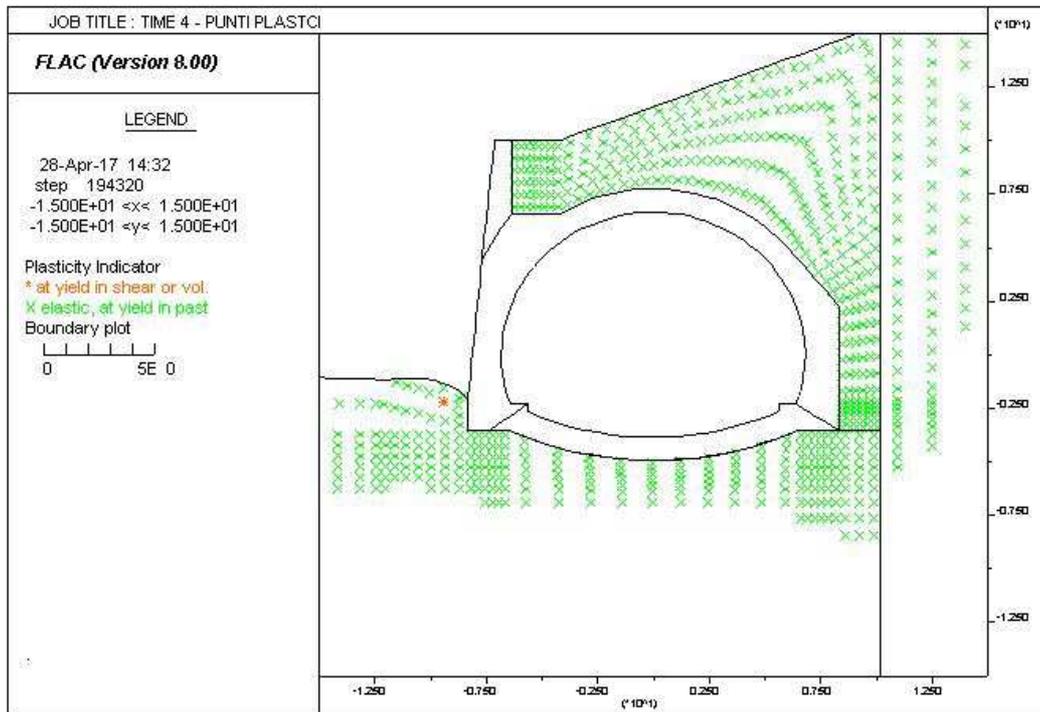
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

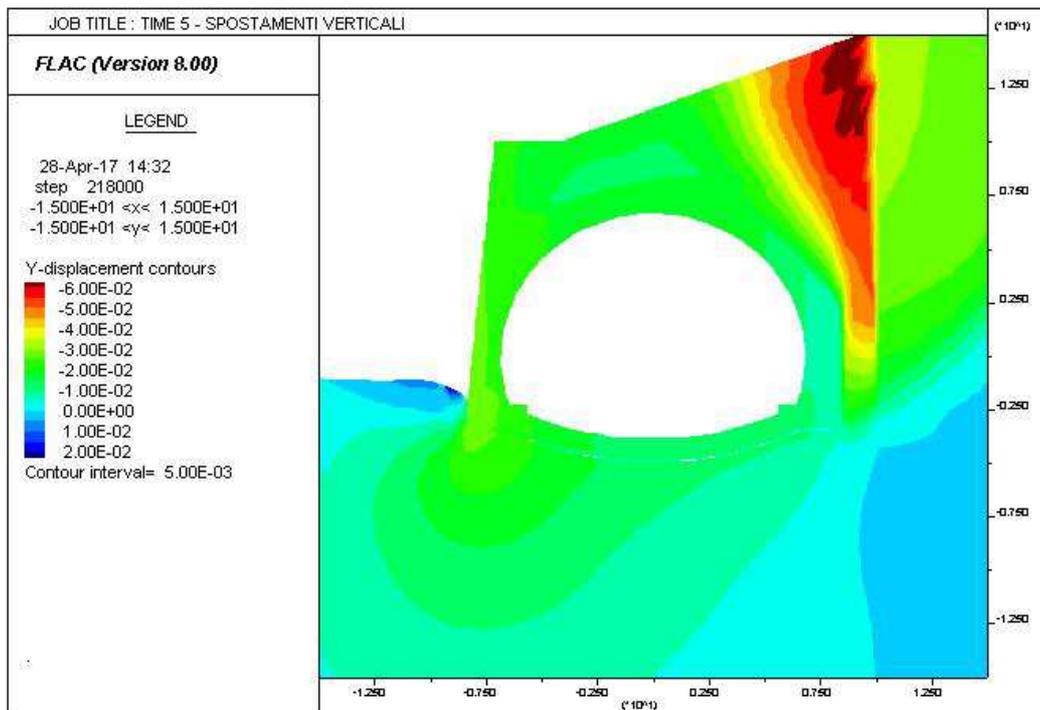
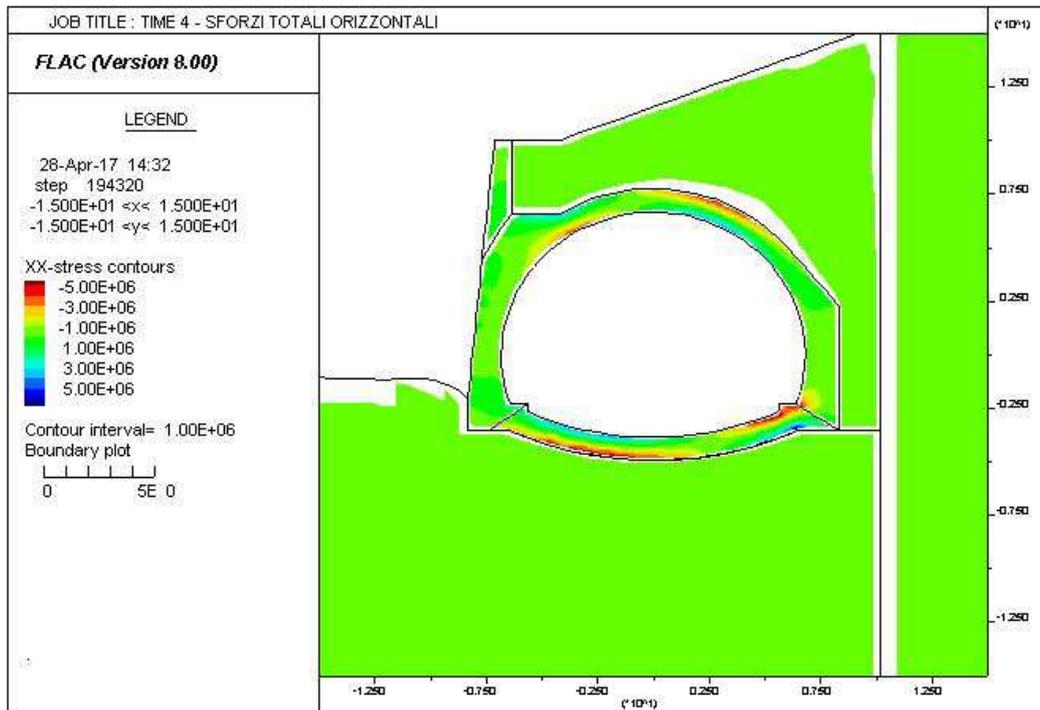


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

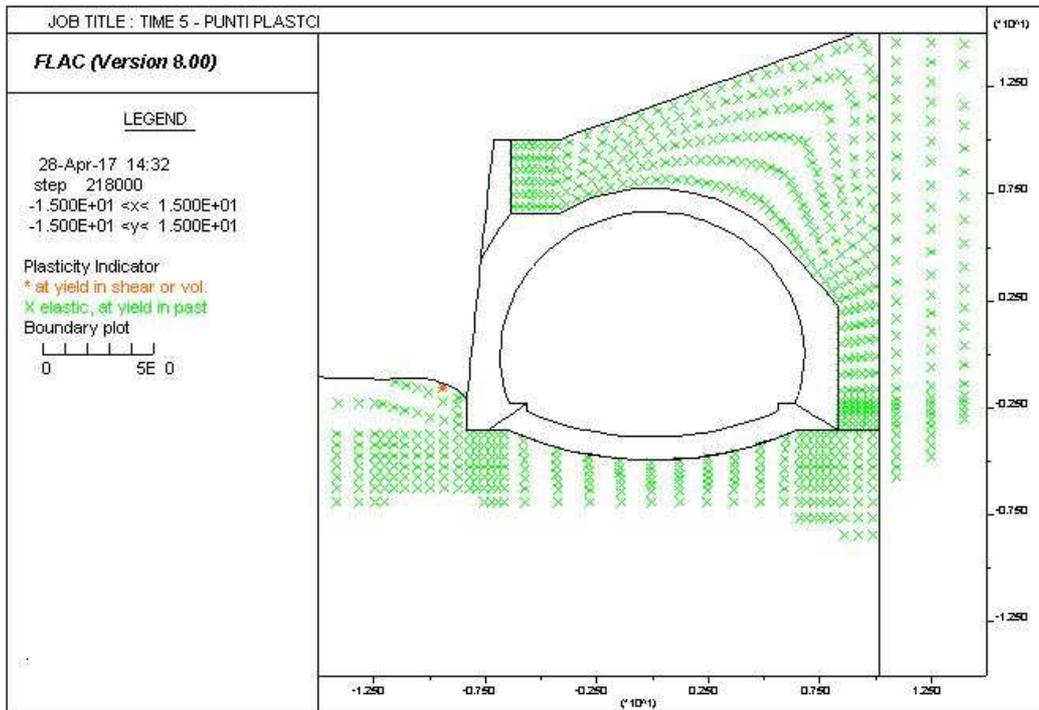
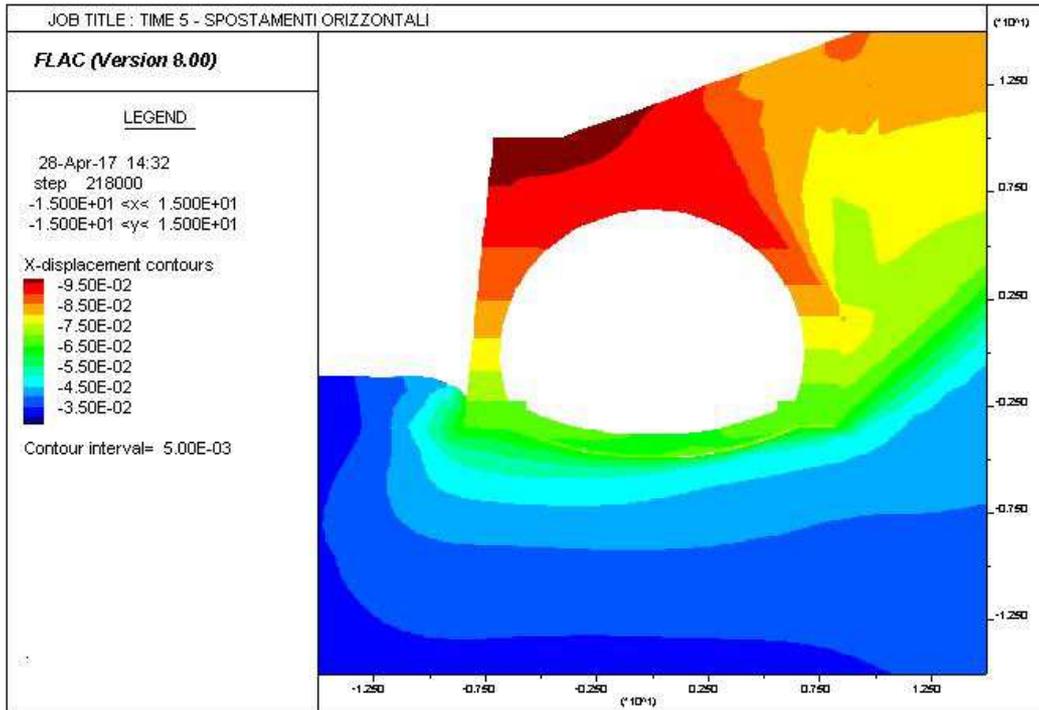


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

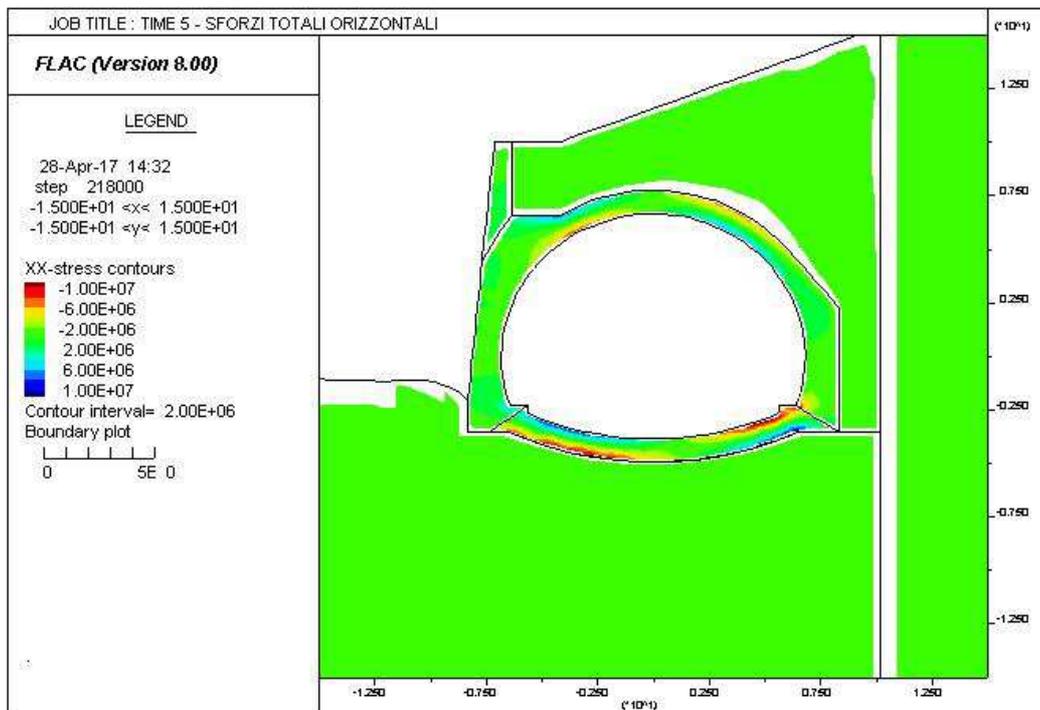
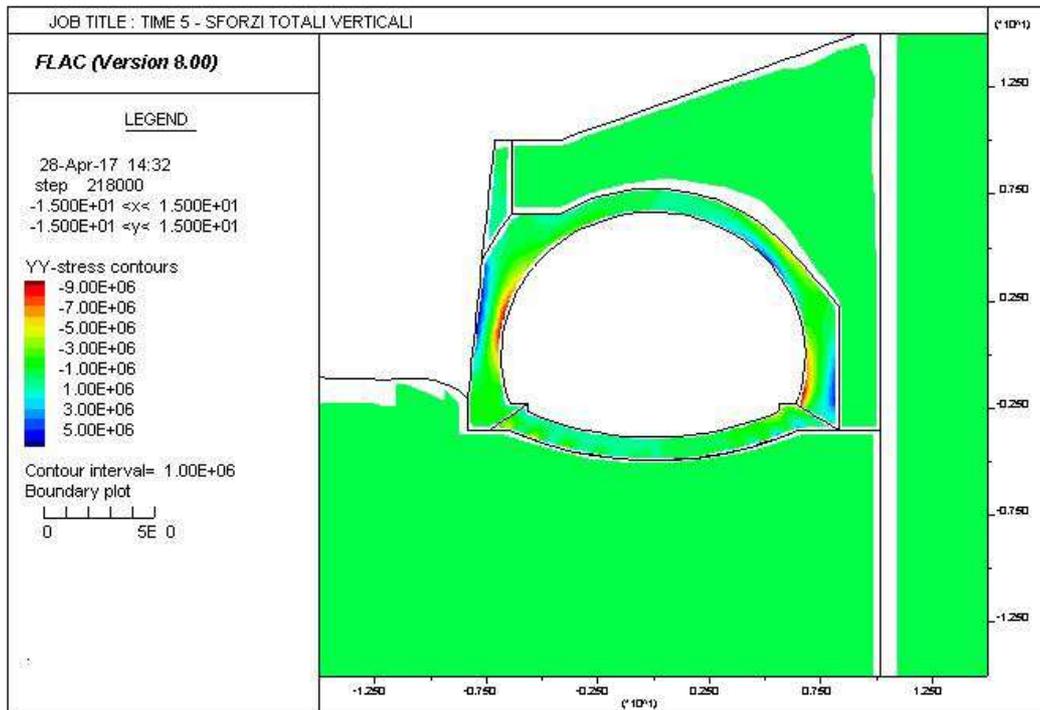
---



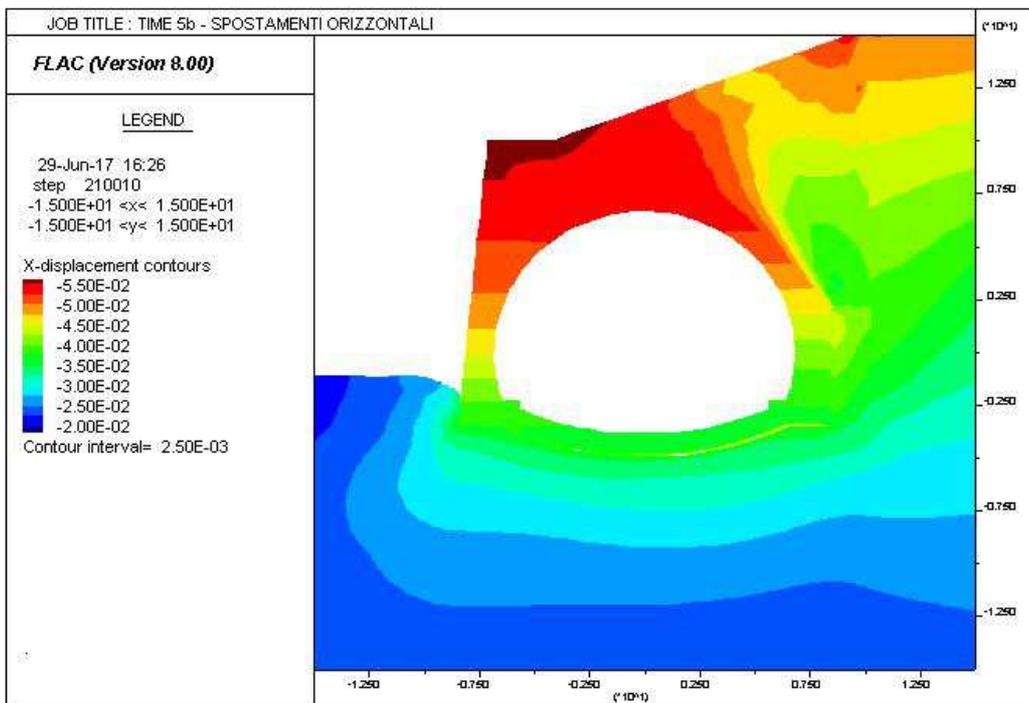
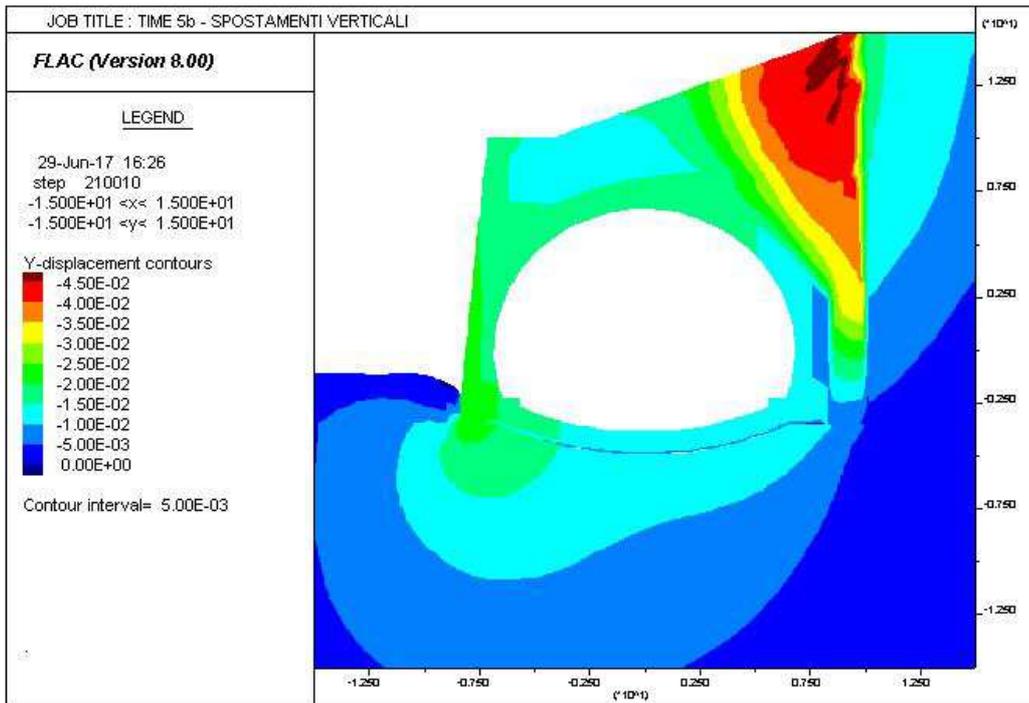
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



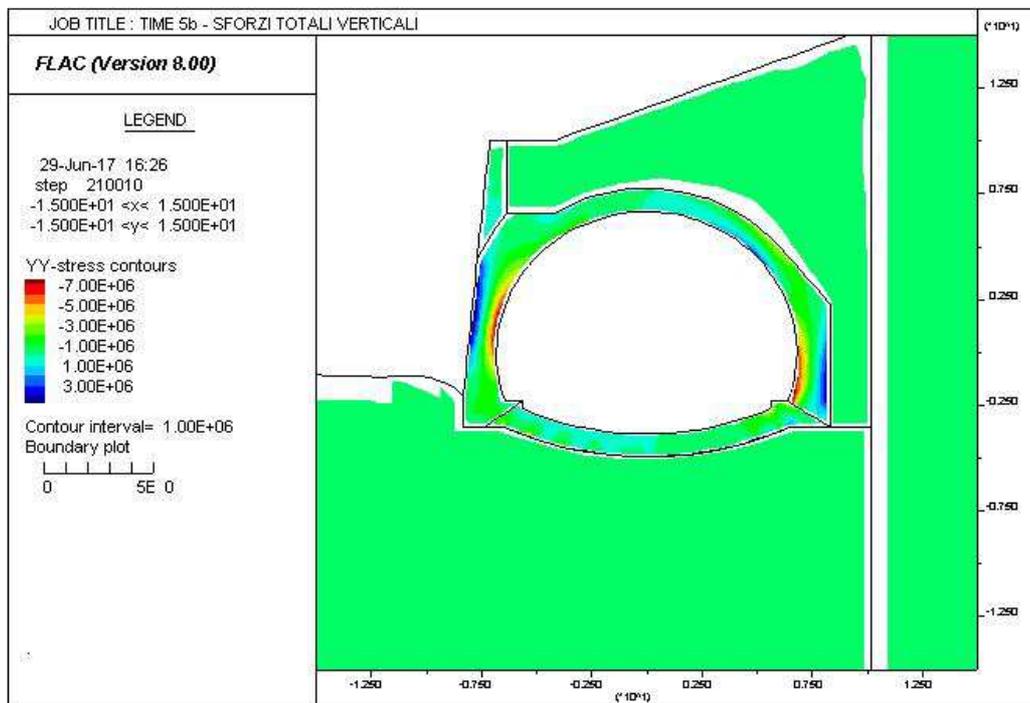
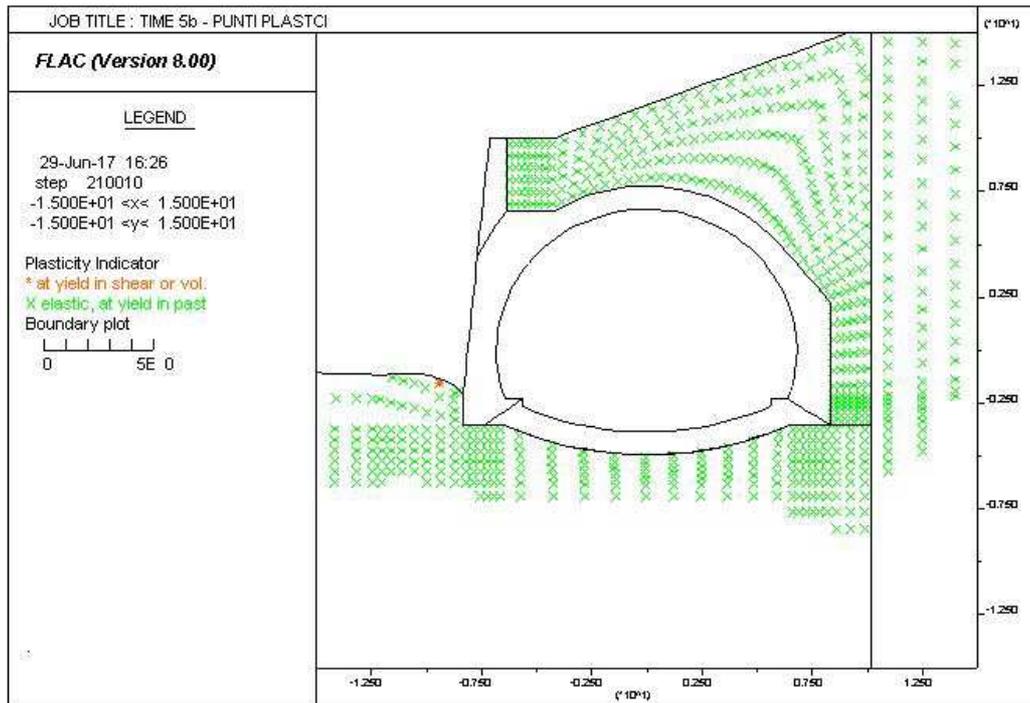
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

