

# AUTOSTRADA VALDASTICO

## A31 NORD

### 1° LOTTO

### Piovene Rocchette - Valle dell'Astico

## PROGETTO DEFINITIVO

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

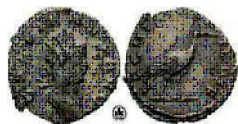
#### COMMITTENTE



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 COGOLLO**  
**GALLERIE ARTIFICIALI E PORTALI - RELAZIONE DI CALCOLO**

Progressivo Rev.  
**07 02 04 002 02**

Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Controllo	Approvazione	SCALA: --
00	MARZO 2017	PRIMA EMISSIONE	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	NOME FILE: J16L1_07_02_04_002_0101_OPD_02.doc
01	GIUGNO 2017	REVISIONE PER VERIFICA	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	CM. PROGR. FG. LIV. REV. J16L1_07_02_04_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 Cogollo

Gallerie artificiali e portali - Relazione di calcolo

## I N D I C E

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>SOFTWARE UTILIZZATI</b>	<b>11</b>
	<b>3.1 FLAC 8.0</b>	<b>11</b>
	3.1.1 <i>Analisi alle differenze finite</i>	11
	3.1.2 <i>Leggi di comportamento e parametri del materiale</i>	12
	3.1.3 <i>Rivestimento</i>	13
<b>4</b>	<b>DESCRIZIONE DELL’INTERVENTO</b>	<b>14</b>
	<b>4.1 Imbocco sud</b>	<b>14</b>
	4.1.1 <i>Fasi esecutive</i>	16
	<b>4.2 Imbocco nord</b>	<b>19</b>
	4.2.1 <i>Fasi esecutive</i>	19
<b>5</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</b>	<b>22</b>
	<b>6.1 RESISTENZA DEI MATERIALI</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI</b>	<b>23</b>
	<b>7.1 SPINTA DEL TERRENO</b>	<b>23</b>
	<b>7.2 CARICO IDRAULICO</b>	<b>23</b>
	<b>7.3 CARICO STRADALE</b>	<b>23</b>
	<b>7.4 PESO TBM</b>	<b>24</b>
	<b>7.5 CARICO SISMICO</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>CRITERI DI VERIFICA</b>	<b>27</b>
	<b>8.1 Stati limite ultimi (S.L.U.)</b>	<b>27</b>
	8.1.1 <i>Verifica a Pressoflessione</i>	28
	8.1.2 <i>Verifica al Taglio</i>	29
	<b>8.2 Stati limite di esercizio (S.L.E.)</b>	<b>30</b>
	8.2.1 <i>Verifica a Fessurazione</i>	31
	Stato limite di apertura delle fessure	31
<b>9</b>	<b>ANALISI NUMERICHE</b>	<b>33</b>
	<b>9.1 FASI DI CALCOLO</b>	<b>33</b>
	<b>9.2 PARAMETRI GEOTECNICI</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>MODELLO 1 – GA con sella</b>	<b>39</b>

<b>10.1</b>	<b>Spostamenti</b>	<b>39</b>
<b>10.2</b>	<b>Verifiche a pressoflessione</b>	<b>39</b>
10.2.1	<i>Stato Limite Ultimo</i>	42
10.2.2	<i>Stato Limite di Esercizio</i>	46
<b>10.3</b>	<b>Verifiche a taglio</b>	<b>47</b>
<b>11</b>	<b>MODELLO 2 – GA</b>	<b>50</b>
<b>11.1</b>	<b>Spostamenti</b>	<b>50</b>
<b>11.2</b>	<b>Verifiche a pressoflessione</b>	<b>50</b>
11.2.1	<i>Stato Limite Ultimo</i>	52
11.2.2	<i>Stato Limite di Esercizio</i>	56
<b>11.3</b>	<b>Verifiche a taglio</b>	<b>57</b>
<b>12</b>	<b>VERIFICA AL FUOCO</b>	<b>59</b>
<b>12.1</b>	<b>Software di calcolo</b>	<b>60</b>
<b>12.2</b>	<b>Schematizzazione del problema</b>	<b>61</b>
<b>12.3</b>	<b>Proprietà termiche dei materiali</b>	<b>64</b>
<b>12.4</b>	<b>Output del programma</b>	<b>67</b>
<b>12.5</b>	<b>Verifica strutturale</b>	<b>68</b>
<b>13</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>70</b>
<b>14</b>	<b>ALLEGATI</b>	<b>72</b>
<b>14.1</b>	<b>MODELLO 1 – GA con sella</b>	<b>72</b>
<b>14.2</b>	<b>MODELLO 2 – GA</b>	<b>91</b>

### Indice delle tabelle

Tabella 1: Carico sismico SLV – Modello 1 – GA con sella .....	34
Tabella 2: Carico sismico SLD – Modello 1 – GA con sella .....	34
Tabella 3: Carico sismico SLV – Modello 2 – GA .....	35
Tabella 4: Carico sismico SLD – Modello 2 – GA .....	35
Tabella 5: Stratigrafia per Cogollo Sud .....	36
Tabella 6: Spostamento verticale [mm] .....	39
Tabella 7: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3.....	42
Tabella 8: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4.....	44
Tabella 9: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5.....	45
Tabella 10: Verifica a pressoflessione SLU – Step 6.....	46
Tabella 11: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3 .....	46

Tabella 12: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4 .....	47
Tabella 13: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b .....	47
Tabella 14: Verifica a pressoflessione SLE – Step 6 .....	47
Tabella 15: Verifica a taglio – Step 3 .....	48
Tabella 16: Verifica a taglio – Step 4 .....	48
Tabella 17: Verifica a taglio – Step 5 .....	48
Tabella 18: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli.....	49
Tabella 19: Verifica a taglio – Step 6 .....	49
Tabella 20: Spostamento verticale [mm] .....	50
Tabella 21: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3.....	53
Tabella 22: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4.....	54
Tabella 23: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5.....	55
Tabella 24: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3 .....	56
Tabella 25: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4 .....	56
Tabella 26: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b .....	57
Tabella 27: Verifica a taglio – Step 3 .....	57
Tabella 28: Verifica a taglio – Step 4 .....	58
Tabella 29: Verifica a taglio – Step 5 .....	58
Tabella 30: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli.....	58
Tabella 31: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria .....	61
Tabella 32 – Analisi al fuoco – Modello 1 .....	69
Tabella 33 – Analisi al fuoco – Modello 2 .....	69

### Indice delle figure

<b>Figura 1 - Planimetria imbocco sud .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2 - Profili imbocco sud .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 3 - Planimetria imbocco nord .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 4 - Profili imbocco nord.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 7 - Dima d’attacco + sella + conci .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 8 - Sella + Galleria artificiale .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 9 - Galleria artificiale.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 10 - Becco di flauto .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 11 - Fase 1.....</b>	<b>17</b>

Figura 12 - Fase 2.....	17
Figura 13 - Fase 3.....	17
Figura 14 - Fase 4.....	18
Figura 15 - Fase 5.....	18
Figura 16 - Fase 6.....	18
Figura 17 - Dima d’attacco + sella + conci .....	19
Figura 18 - Sella + Galleria artificiale .....	19
Figura 19 - Stratigrafia imbocco sud.....	20
Figura 20 - Stratigrafia imbocco nord.....	21
Figura 21 - Carico stradale (l’intensità delle forze nodali è funzione della dimensione della mesh) .....	24
Figura 22 - Peso TBM (l’intensità delle forze nodali è funzione della dimensione della mesh) .....	24
Figura 23 - Definizione del carico sismico .....	33
Figura 24 - Modello “GA con sella”.....	36
Figura 25 - Modello “GA con sella” - particolare.....	37
Figura 26 - Modello “GA” .....	37
Figura 27 - Modello “GA” - particolare.....	38
Figura 28 - Diagrammi N e M – Step 3.....	40
Figura 29 - Diagrammi N e M – Step 4.....	40
Figura 30 - Diagrammi N e M – Step 5.....	41
Figura 31 - Diagrammi N e M – Step 5b.....	41
Figura 32 - Diagrammi N e M – Step 6.....	42
Figura 33 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3 .....	43
Figura 34 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4 .....	44
Figura 35 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5 .....	45
Figura 36 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 6 .....	46
Figura 37 - Diagrammi N e M – Step 3.....	51
Figura 38 - Diagrammi N e M – Step 4.....	51
Figura 39 - Diagrammi N e M – Step 5.....	52
Figura 40 - Diagrammi N e M – Step 5b.....	52
Figura 41 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3 .....	53
Figura 42 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4 .....	54
Figura 43 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5 .....	55
Figura 44 – Sezione di calcolo – Modello 1 .....	62
Figura 45 – Sezione di calcolo – Modello 2 .....	62
Figura 46 – Mesh di calcolo – Modello 1 e Modello 2 .....	63

Figura 47 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7) .....	64
Figura 48 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a) .....	64
Figura 49 –Fattore di riduzione del valore di resistenza $f_{ck}$ per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1) .....	65
Figura 50 –Fattore di riduzione del valore di $\epsilon_{c1}$ per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1) .....	65
Figura 51 – Fattore di riduzione del valore di $\epsilon_{cu}$ per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1) .....	66
Figura 52 – 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) .....	66
Figura 53 – 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) .....	67
Figura 54 – Analisi termica – Modello 1 e Modello 2 .....	68
Figura 55 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato” .....	71

## 1 INTRODUZIONE

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

All’imbocco sud, per la partenza della TBM è prevista una sella di 100m che diventerà poi l’arco rovescio della galleria artificiale; in fase definitiva sono previsti inoltre altri 120m di galleria artificiale di cui 30m per la canna nord e 47m per la canna sud da realizzarsi prima degli scavi in corrispondenza delle selle, per permettere la deviazione del traffico stradale di superficie.

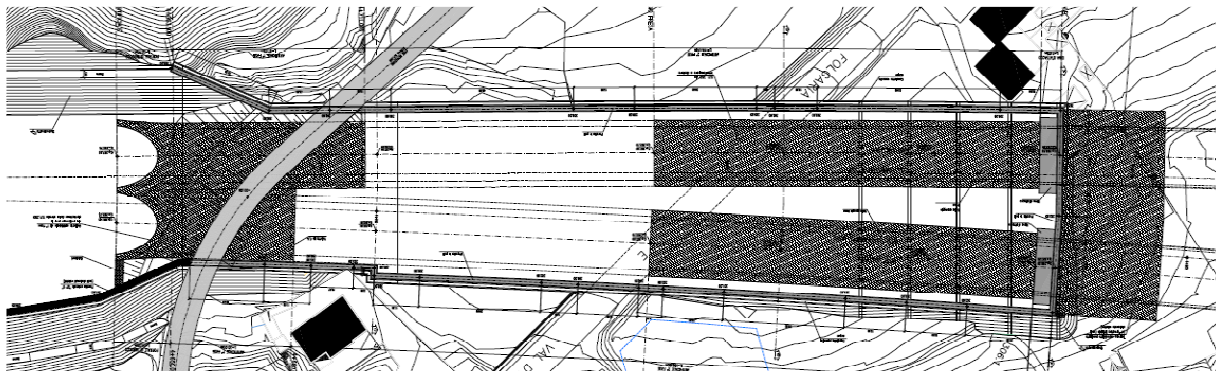


Figura 1 - Planimetria imbocco sud

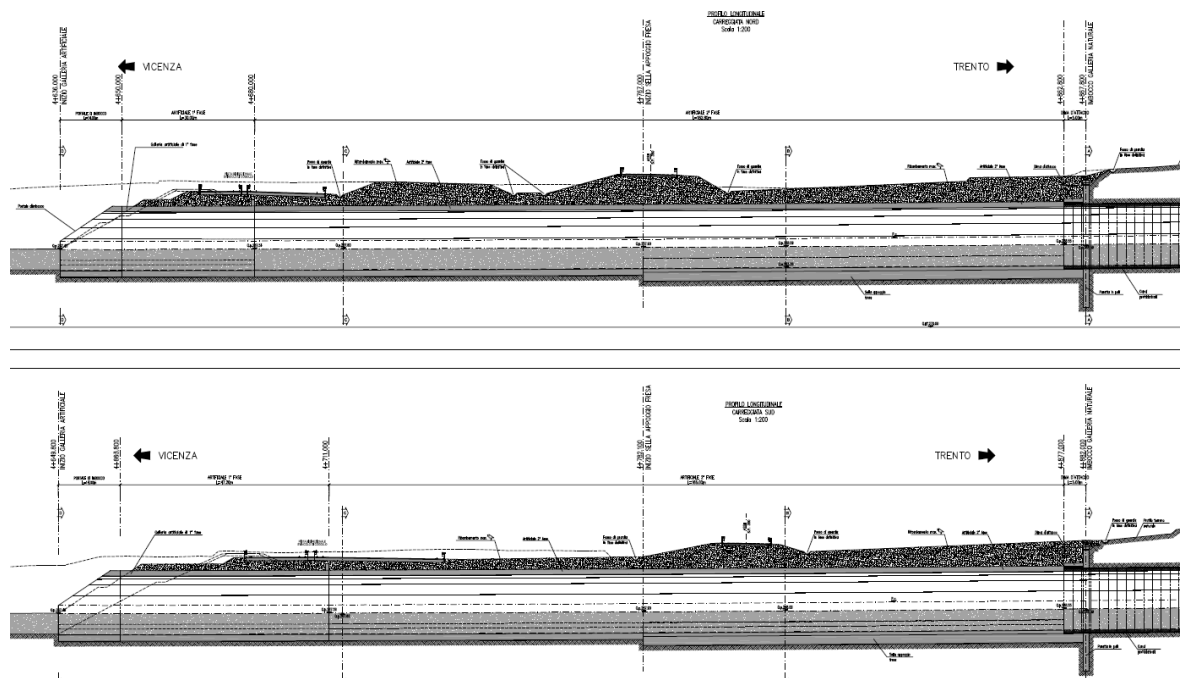


Figura 2 - Profili imbocco sud



All'imbocco nord, con spazi di lavoro ridotti, tutta la galleria artificiale è interessata dalla presenza della sella, che permette l'uscita e lo smontaggio della TBM.

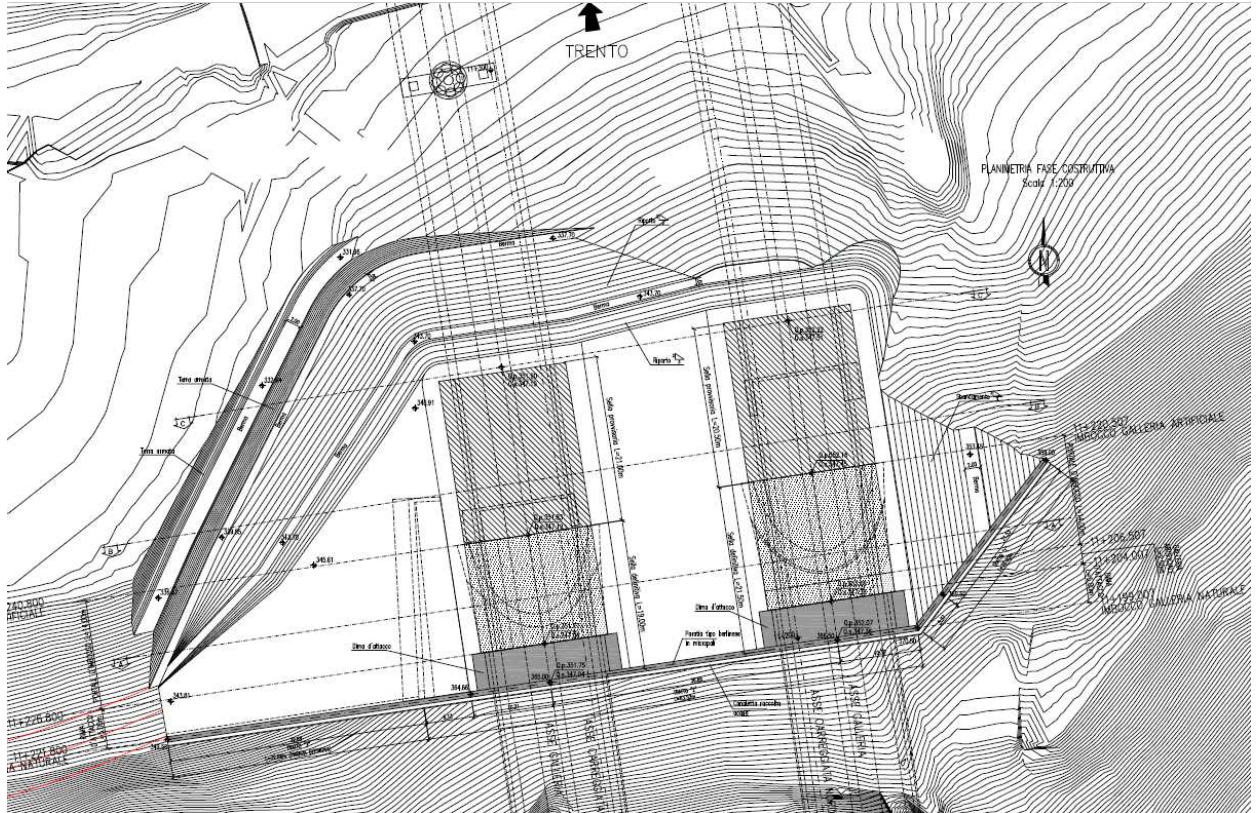


Figura 3 - Planimetria imbocco nord



## **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, Raccomadazioni 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.

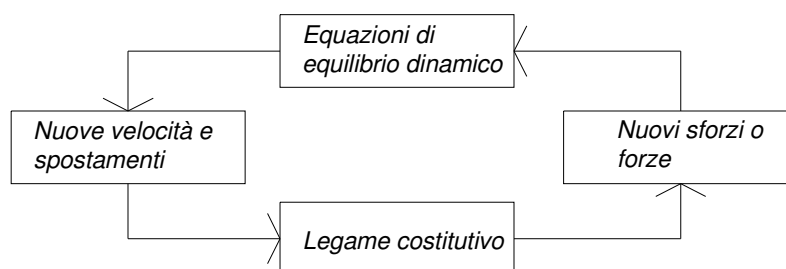


Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

### 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:

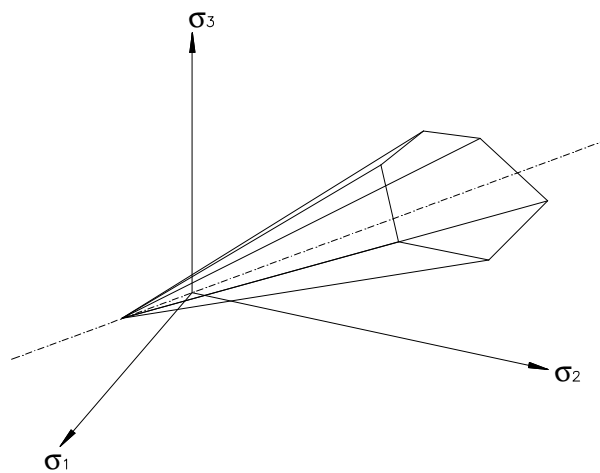


Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni

### 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

Per i primi 100 m della zona dell’imbocco è prevista una sella, di spessore minimo pari a 2m, per la partenza della TBM; la sella diventerà parte integrante della galleria artificiale come rivestimento definitivo dopo il ritombamento. La galleria artificiale, in calcestruzzo C28/35, ha spessore minimo pari a 1.2 m in calotta e 1.4 m in arco rovescio, dove non è prevista la sella, anch’essa in calcestruzzo C28/35.

A ridosso della paratia d’imbocco, per 5 m, lo scavo è protetto da una dima a carattere provvisoria, mentre a lungo termine sono i conci installati dalla TBM a prendere il carico del terreno di ritombamento.

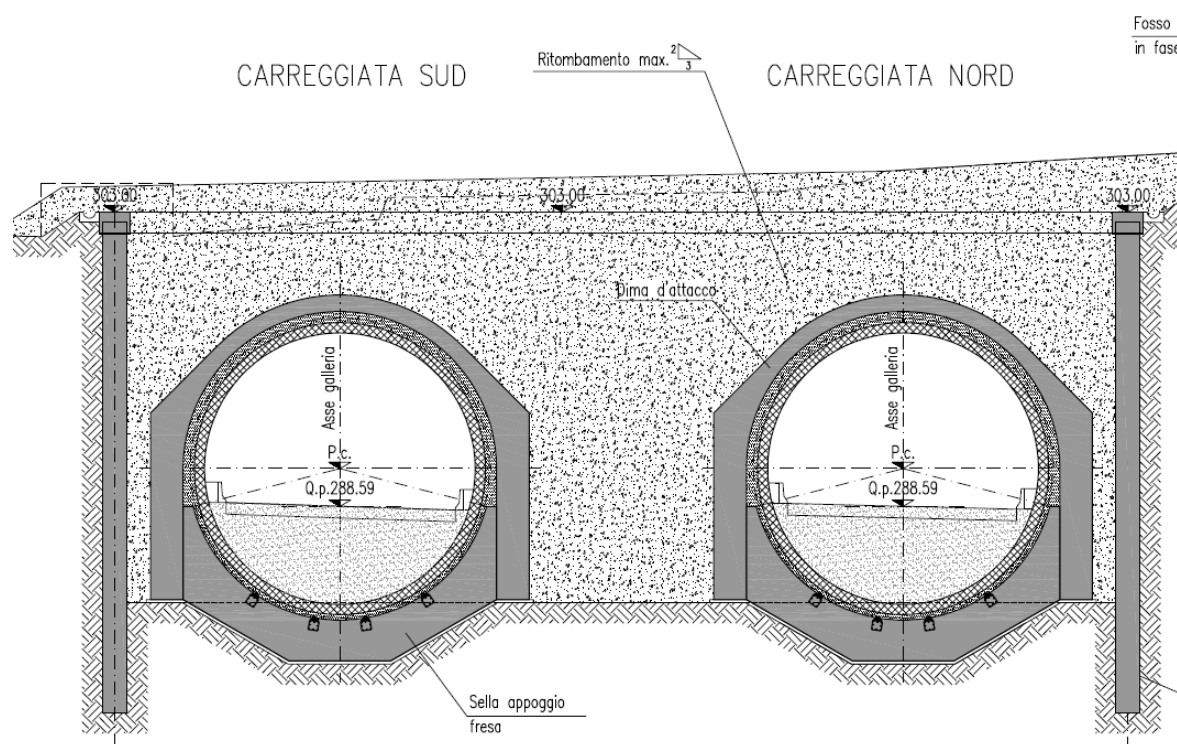
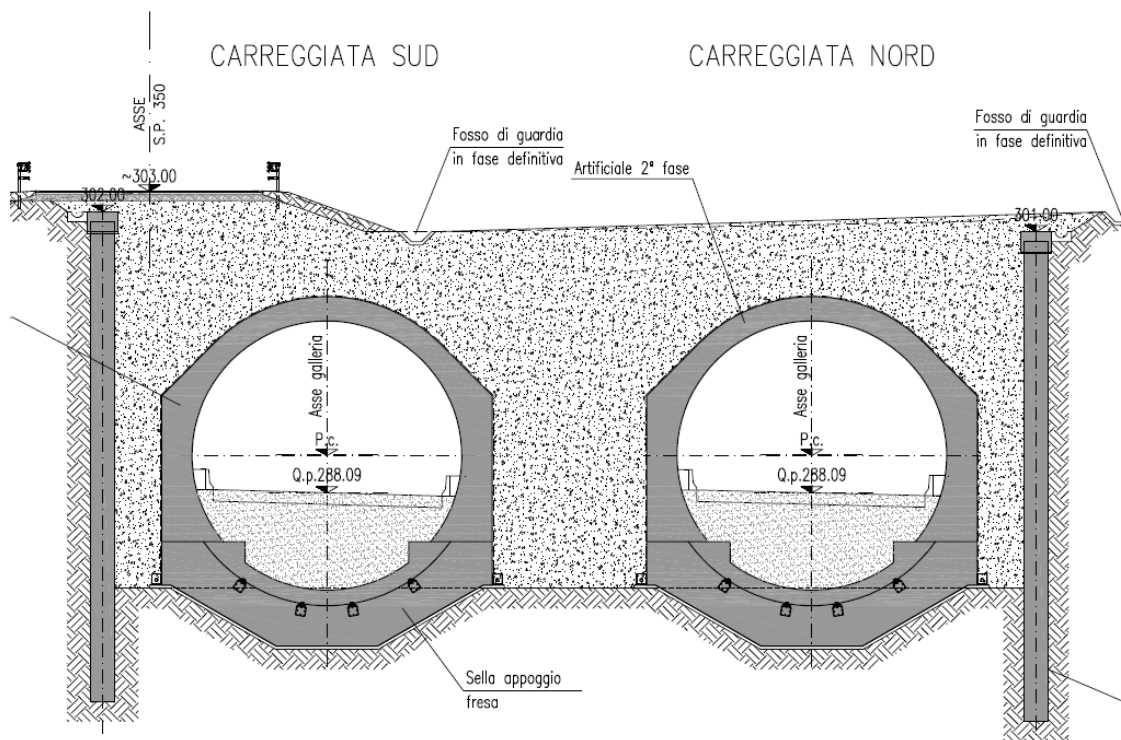
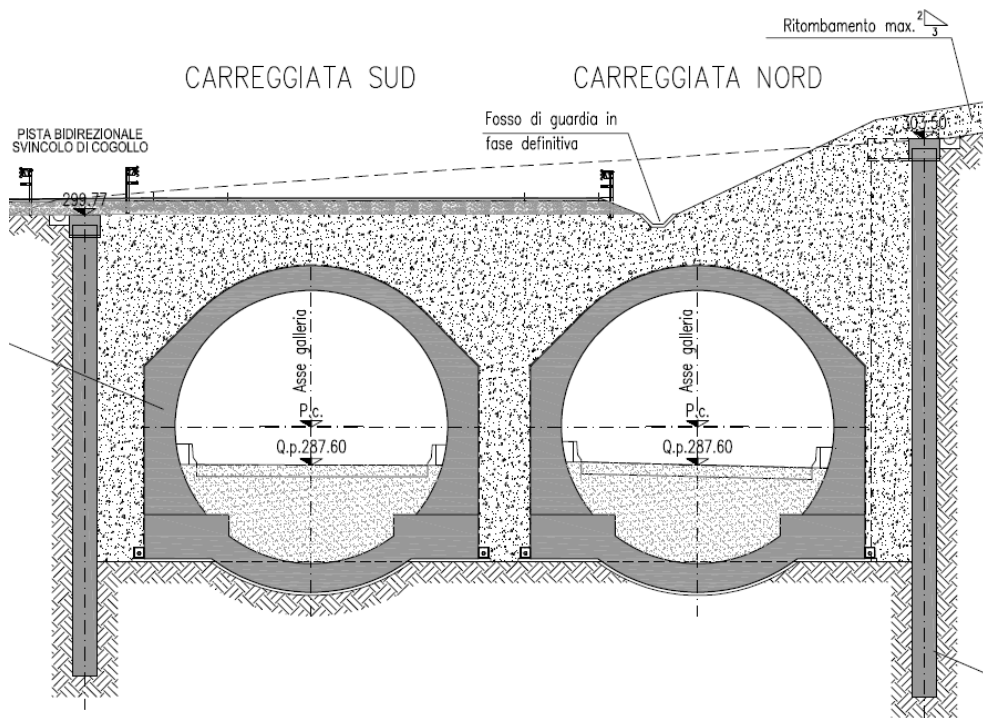


Figura 7 - Dima d’attacco + sella + conci



**Figura 8 - Sella + Galleria artificiale**



**Figura 9 - Galleria artificiale**



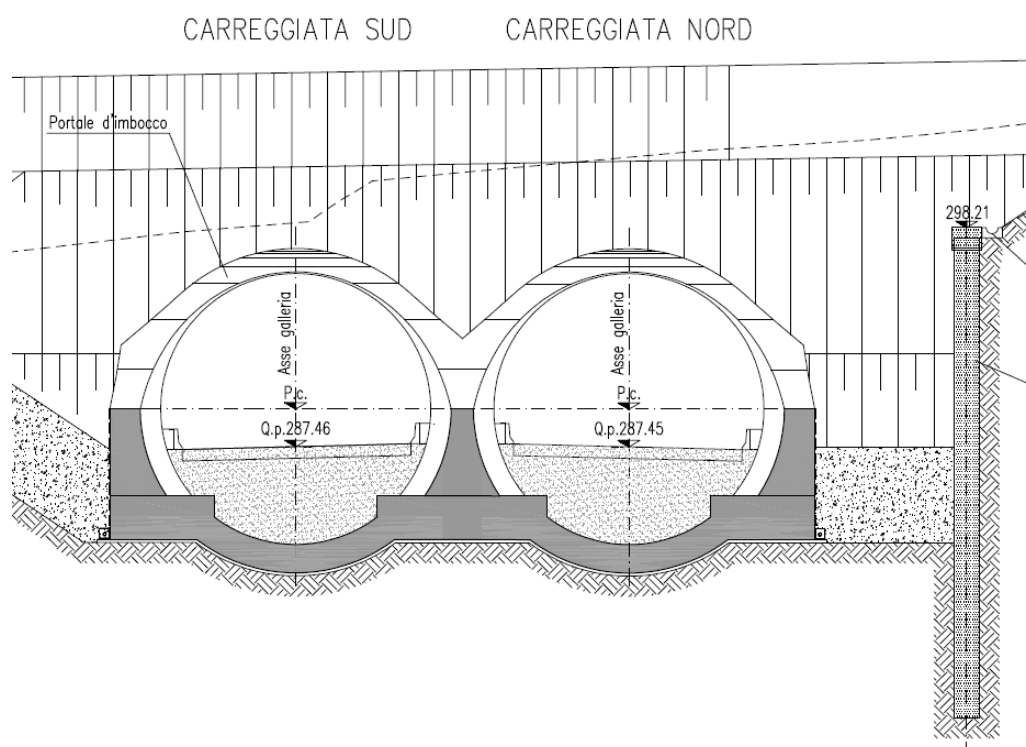


Figura 10 - Becco di flauto

#### 4.1.1 Fasi esecutive

Per l'area di imbocco, sono state individuate 6 macro fasi:

- Fase 1: realizzazione del primo tratto della paratia in pali, senza bloccare il traffico veicolare di superficie;
- Fase 2: scavo di ribasso e realizzazione della galleria artificiale in corrispondenza della successiva deviazione della strada esistente;
- Fase 3: ritombamento e deviazione provvisoria della strada S.P. 350; a questo punto è possibile completare la palificata;
- Fase 4: realizzazione delle selle per l'appoggio della fresa, getto delle dime di attacco e consolidamento a tergo della paratia nella zona di partenza; una volta posizionato il telaio di spinta è possibile partire con lo scavo della prima galleria e poi ripartire con la seconda;
- Fase 5: completamento delle gallerie artificiali;
- Fase 6: completamento del ritombamento con ripristino strada s.p. 350 e realizzazione dello svincolo di Cogollo.

Nelle figure seguenti, per ogni macro fase sono rappresentate in azzurro le opere già realizzate ed in rosso quelle in fase di realizzazione.

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

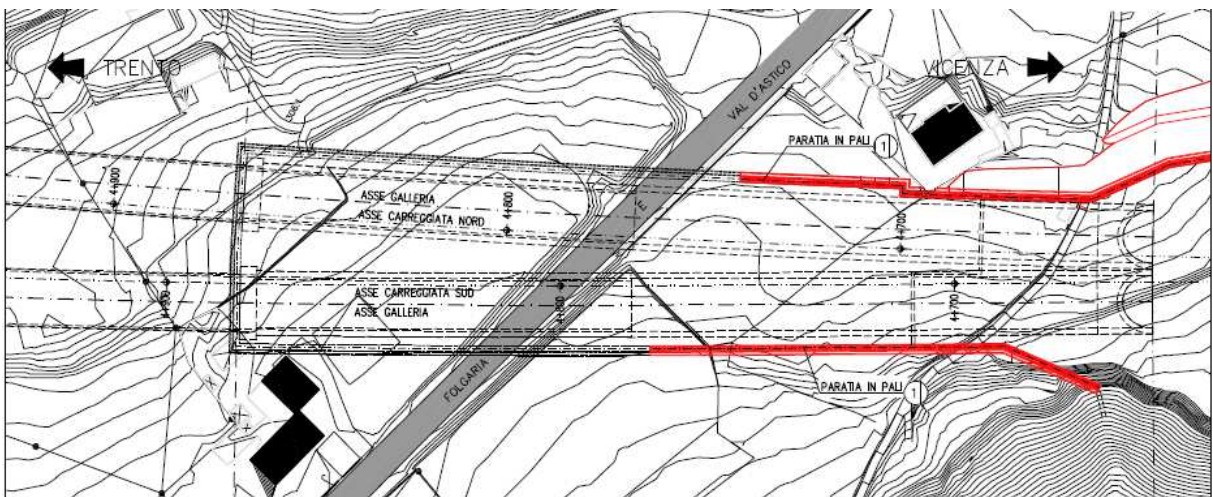


Figura 11 - Fase 1

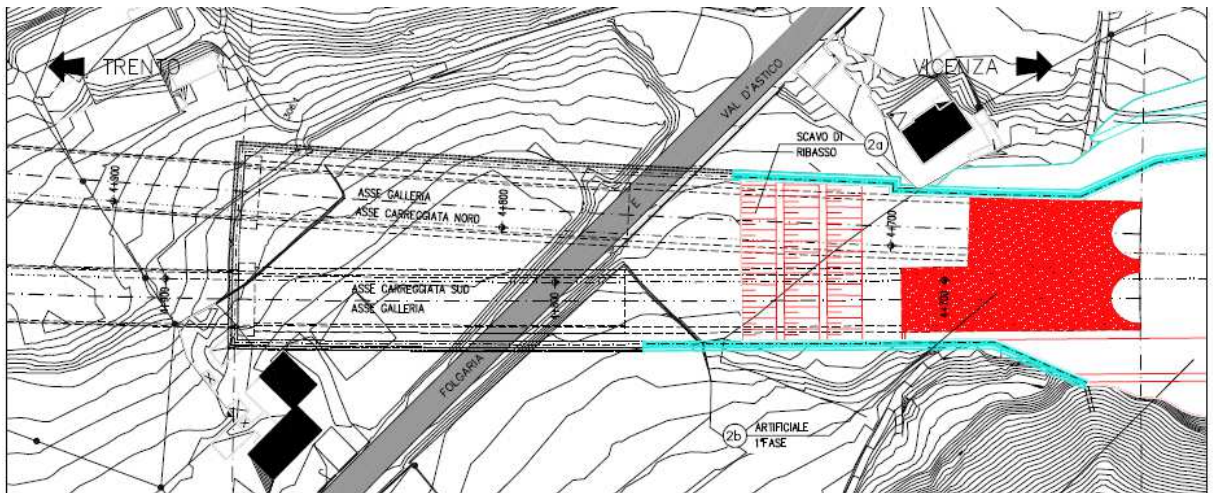


Figura 12 - Fase 2

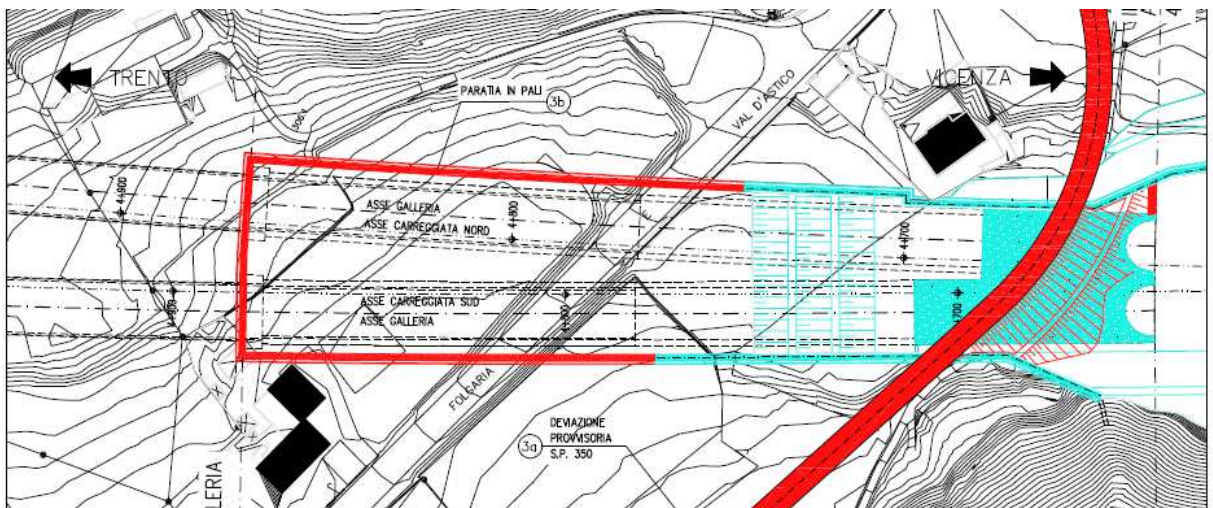


Figura 13 - Fase 3

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

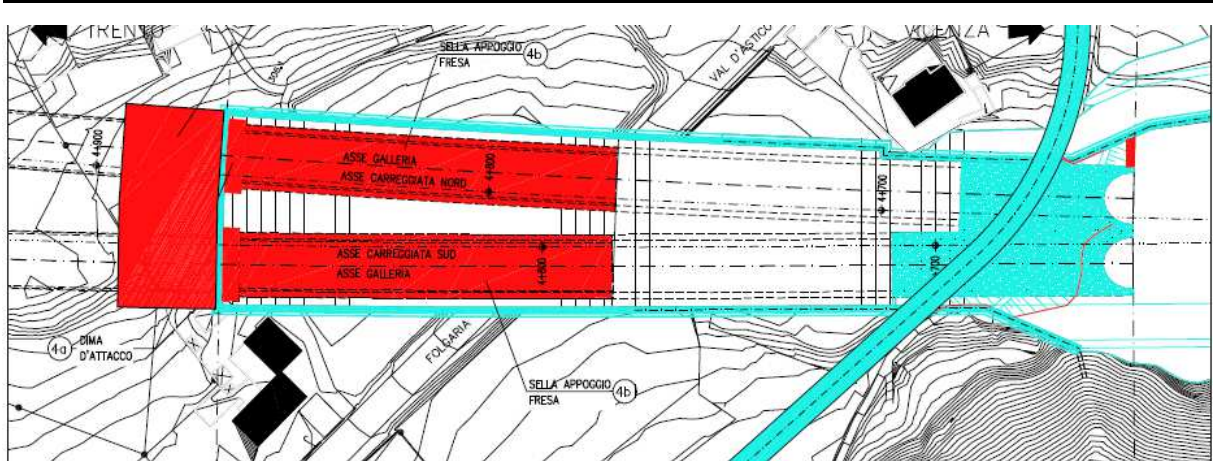


Figura 14 - Fase 4

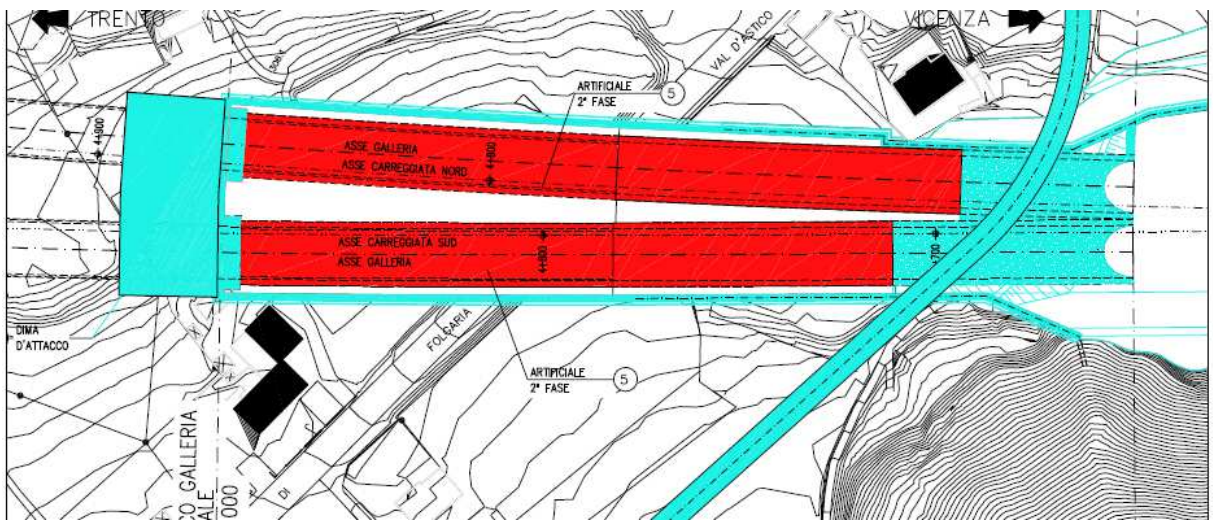


Figura 15 - Fase 5

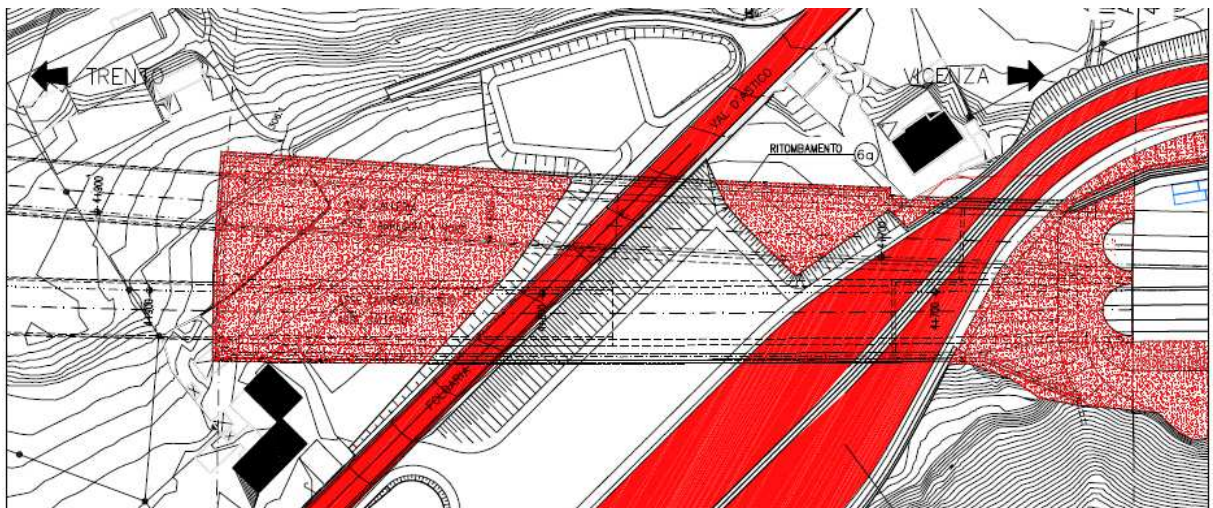
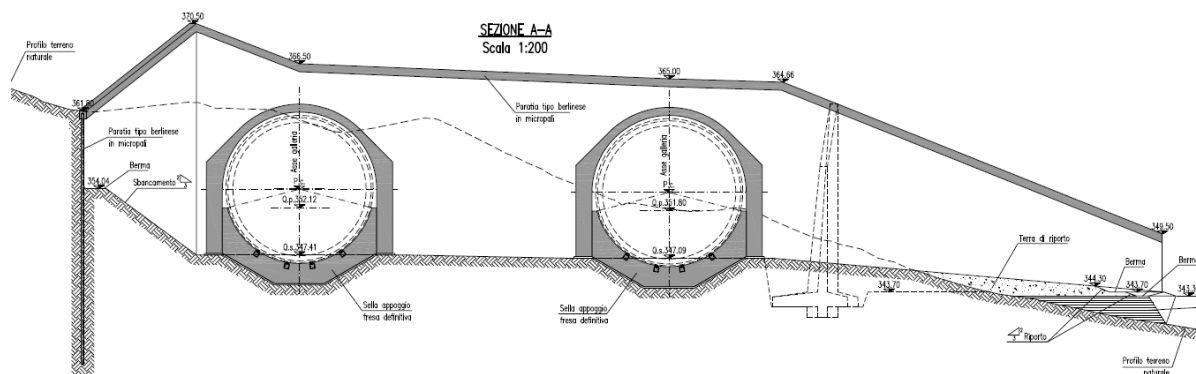


Figura 16 - Fase 6

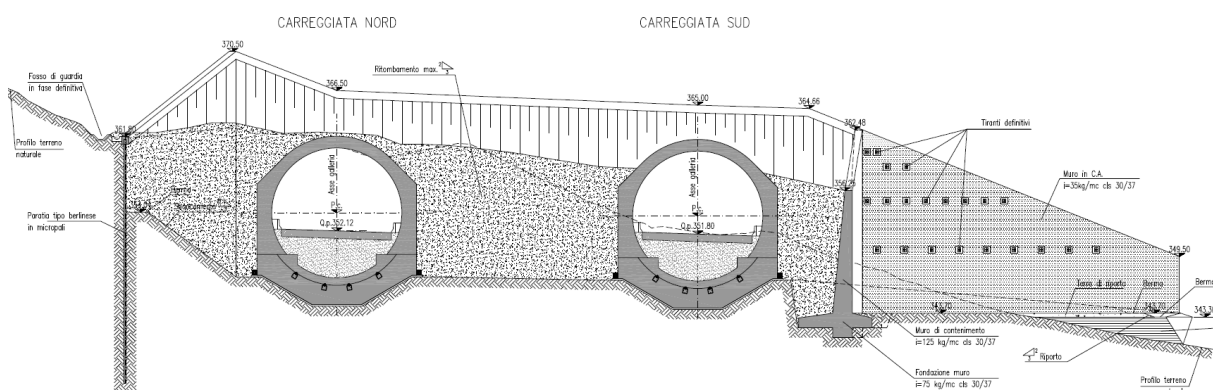
## 4.2 Imbocco nord

Nella zona di uscita della TBM è prevista la realizzazione di una sella di spessore pari a 2m e di lunghezza pari a 21.5 m in canna nord e a 19 m in canna sud. La galleria artificiale ingloba la sella con un getto definitivo in arco rovescio di almeno 77 cm e in calotta registra uno spessore minimo di 1.2m.

A ridosso della paratia di imbocco, è prevista una dima lunga 5m a protezione dello scavo ed in fase definitiva il carico del terreno è sostenuto dagli ultimi anelli montati dalla TBM.



**Figura 17 - Dima d'attacco + sella + conci**



**Figura 18 - Sella + 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 sella e dima per permettere arrivo della TBM ed il suo smontaggio;
- Fase 3: scavo di ribasso per realizzazione muro definitivo;
- Fase 4: ritombamento.

## 5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L’imbocco sud della Galleria “Cogollo” interessa completamente i depositi glaciali, costituiti da ghiaie eterometriche fino a massi di 1m<sup>3</sup> circa, immerse in abbondante matrice limoso-sabbioso-argillosa.

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.

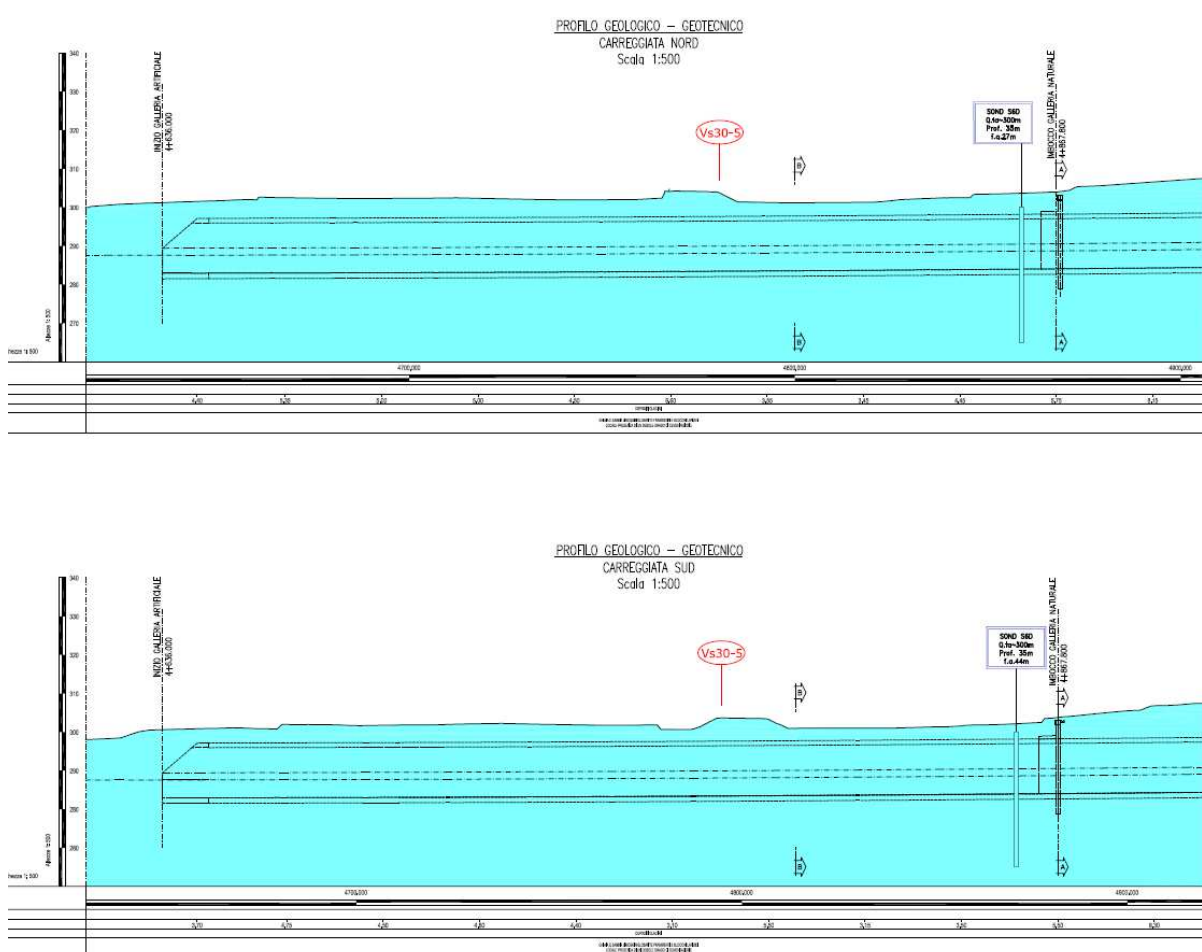


Figura 19 - Stratigrafia imbocco sud

L’imbocco nord della Galleria “Cogollo” risulta principalmente interessato dal substrato roccioso, con detriti ghiaioso-sabbiosi nella parte di calotta.

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.

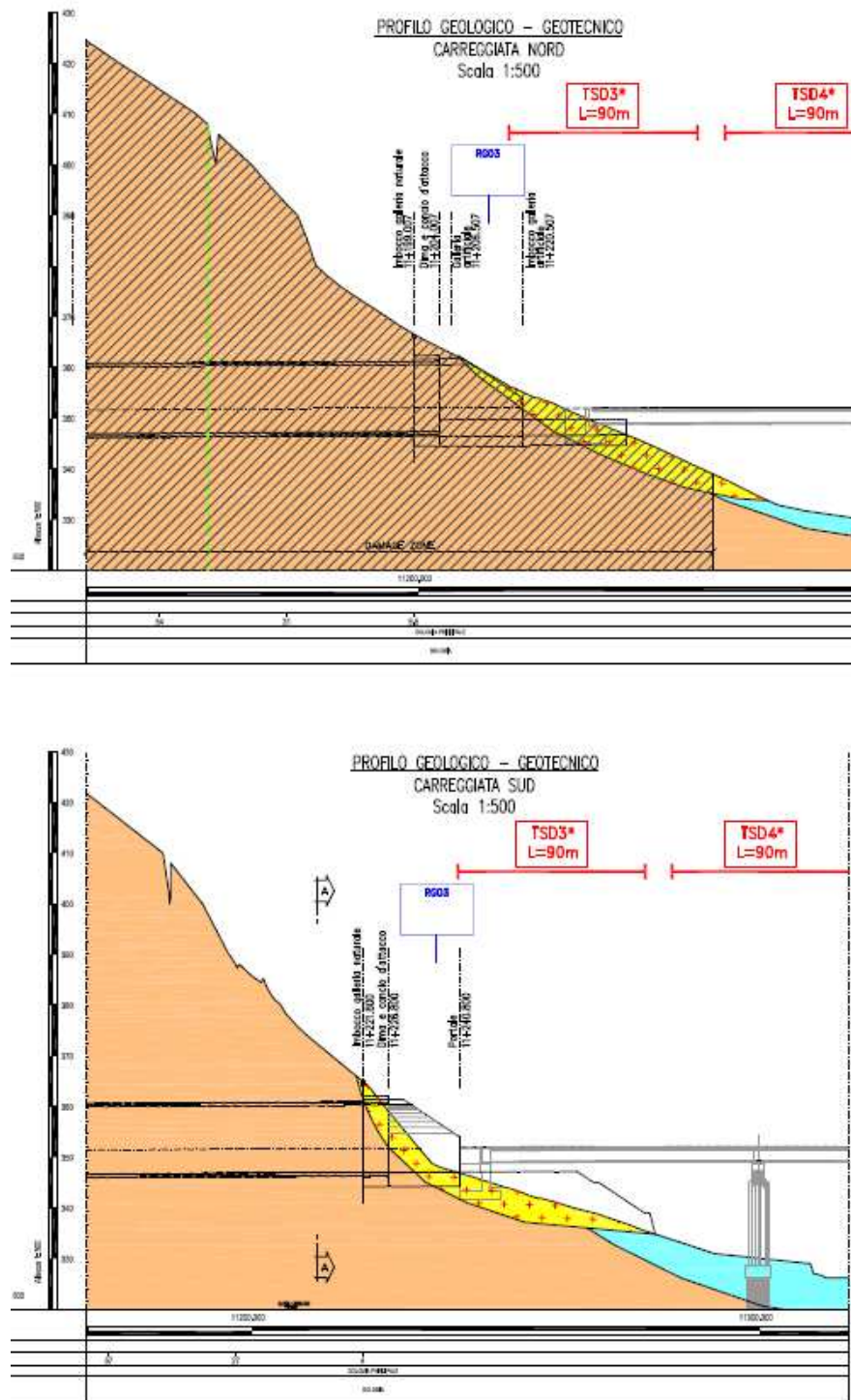


Figura 20 - Stratigrafia imbocco nord

## 6 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

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

- calcestruzzo per sella: C28/35;
- 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.

### **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 6 m, mentre all'imbocco nord la copertura non arriva a 3 m.

In fase di verifica, si procederà all'analisi della sezione all'imbocco sud, che risulta nella condizione più gravosa.

### **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 STRADALE**

Nella zona di inizio della sella in arco rovescio, in corrispondenza della massima copertura della galleria artificiale, è prevista anche la realizzazione della strada per la deviazione temporanea del traffico.

Il carico è stato stimato in accordo allo schema di carico 1 di Figura 5.1.2 del DM2008: i carichi concentrati da 300kN su 2 assi tandem, agiscono su un'impronta pari alla larghezza della corsia (3m) per una lunghezza di 2,2m (interasse di 1.2m tra i  $Q_{ik} + 0.5m$  per lato come su larghezza). Risulta una pressione di 91kPa che sommati ai 9kPa di carico distribuito da normativa portano ad una pressione totale di 100kPa; questa pressione viene applicata nel modello bidimensionale su una larghezza di 3m, partendo dall'asse della galleria, e imponendo 9kPa sulla restante parte della linea di superficie.

Il carico non subisce ulteriori incremento come carico variabile, in quanto viene applicato al modello bidimensionale senza considerare la diffusione del carico fuori piano con l'aumento della profondità.



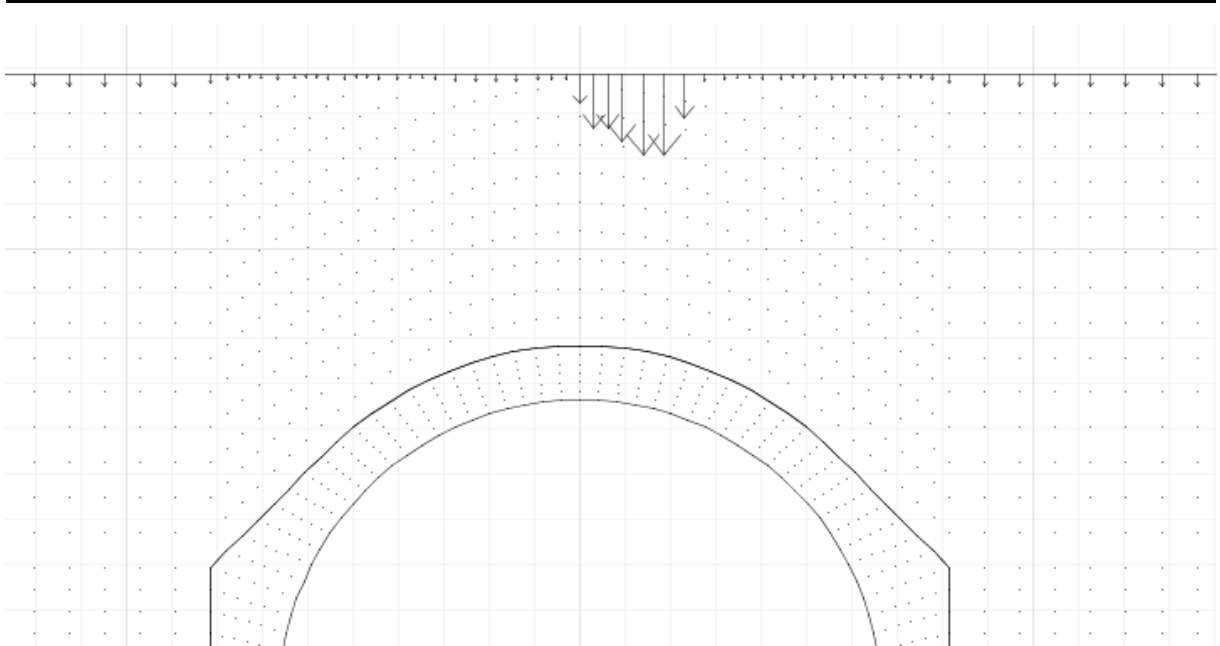


Figura 21 - Carico stradale (l'intensità delle forze nodali è funzione della dimensione della mesh)

#### 7.4 PESO TBM

In questa fase progettuale, sulla base di documentazione da progetti simili, si ipotizza una pressione di 200kPa agente in verticale sull'area della sella, al fine di simulare il peso della TBM. Nella successiva fase progettuale sarà necessario un modello tridimensionale in grado di studiare adeguatamente i carichi trasmessi dal telaio di spinta, in funzione anche della geometria della macchina e delle necessità di cantiere.

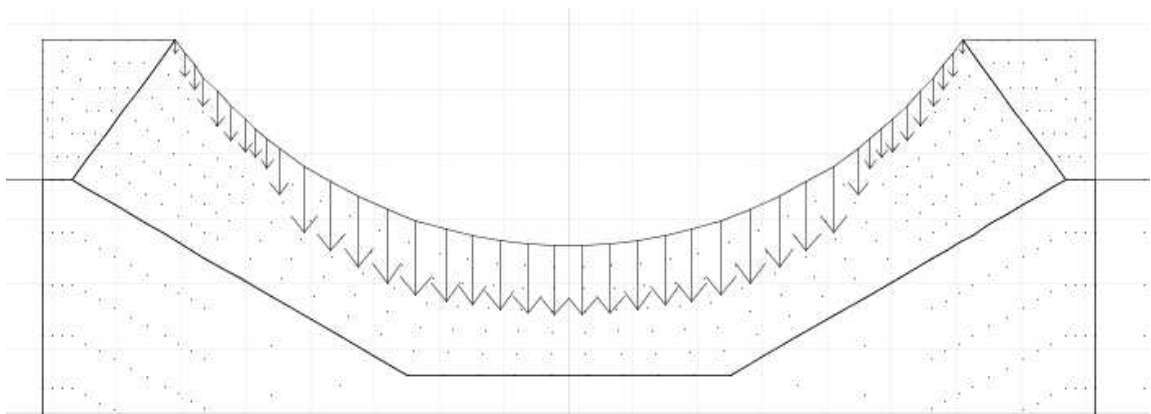


Figura 22 - Peso TBM (l'intensità delle forze nodali è funzione della dimensione della mesh)

## 7.5 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 Cogollo che si sviluppa interamente nel comune di Cogollo del Cengio, 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\_OPD, 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  $a_g = 0.251$  g.

In SLD,  $a_g = 0.109$  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 A,  $S_S$  è pari a 1, mentre  $S_T$  è pari a 1.0. Di conseguenza, per l'imbocco sud all'SLV  $k_h$  è pari a 0.301 e all'imbocco nord  $k_h = 0.251$ , mentre all'SLD  $k_h$  è pari a 0.131 e all'imbocco nord  $k_h = 0.109$ .

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

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):

$\sigma_c = 0,45 \times f_{ck} = 12.6 \text{ MPa}$  per combinazione quasi permanente

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

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;

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

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

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 Cogollo.

Le 2 sezioni di calcolo sono eseguite all’imbocco sud alla stessa progressiva, in corrispondenza della massima copertura, pari a 6 m, e al passaggio sotto la deviazione provvisoria del traffico stradale. Il primo modello “GA con sella” analizza la galleria artificiale con la sella inglobata nell’arco rovescio, mentre nel secondo modello “GA” l’arco rovescio ha uno spessore ridotto, tipico di questa tipologia di opera sotterranea.

### 9.1 FASI DI CALCOLO

Si riporta la metodologia impiegata per simulare le fasi di realizzazione della galleria.

- step 0 geostatico: vengono inizializzati gli sforzi nel terreno, ponendo già la condizione di sommità del modello coincidente con la quota di fondo scavo e imponendo un coefficiente di spinta a riposo pari a 0.4
- step 1: attivazione della sella/arco rovescio.
- step 2: attivazione della calotta/getto integrativo dell’arco rovescio sopra la sella.
- step 3: ritombamento fino alla sistemazione definitiva.
- step 4: imposizione del carico stradale.
- step 5: applicazione delle spinte in fase sismica SLV.
- step 5b (dipendente da step 4): applicazione delle spinte in fase sismica SLD.

Nel modello “GA con sella”, a seguire dello step 1, viene simulato il carico della TBM nello step 6 indipendente dall’albero progettuale base.

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

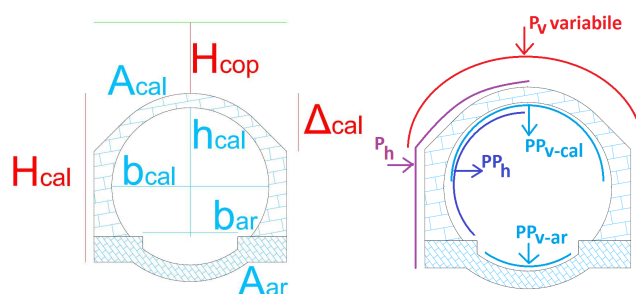


Figura 23 - Definizione del carico sismico

<p><b>Spinta terreno orizzontale</b></p> <p><math>H_{cal}</math>    14.2    [m]</p> <p><math>H_{cop}</math>    6    [m]</p> <p><math>\gamma</math>    22    [kN/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>S_h</math>    2703.8    [kN]</p> <p><b><math>P_h \times Flac</math>    190.4    [kPa]</b></p> <p><math>A_{cal}</math>    48.8    [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>A_{AR}</math>    49.9    [m<sup>2</sup>]</p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_h</math>    371.6    [kN]</p> <p><math>h_{cal}</math>    10.9    [m]</p> <p><b><math>PP_h \times Flac</math>    34.1    [kPa]</b></p>	<p><b>Spinta terreno verticale</b></p> <p><b><math>P_v \times Flac</math>    19.9    [kPa]</b></p> <p><math>\Delta_{cal}</math>    4.9    [m]</p> <p><b><math>\Delta P_v \times Flac</math>    16.2    [kPa]</b></p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_{v-cal}</math>    183.7    [kN]</p> <p><math>b_{cal}</math>    13.3    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math>    13.8    [kPa]</b></p> <p><math>PP_{v-ar}</math>    187.9    [kN]</p> <p><math>b_{ar}</math>    8    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math>    23.5    [kPa]</b></p>
---	--

Tabella 1: Carico sismico SLV – Modello 1 – GA con sella

<p><b>Spinta terreno orizzontale</b></p> <p><math>H_{cal}</math>    14.2    [m]</p> <p><math>H_{cop}</math>    6    [m]</p> <p><math>\gamma</math>    22    [kN/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>S_h</math>    1174.2    [kN]</p> <p><b><math>P_h \times Flac</math>    82.7    [kPa]</b></p> <p><math>A_{cal}</math>    48.8    [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>A_{AR}</math>    49.9    [m<sup>2</sup>]</p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_h</math>    161.4    [kN]</p> <p><math>h_{cal}</math>    10.9    [m]</p> <p><b><math>PP_h \times Flac</math>    14.8    [kPa]</b></p>	<p><b>Spinta terreno verticale</b></p> <p><b><math>P_v \times Flac</math>    8.6    [kPa]</b></p> <p><math>\Delta_{cal}</math>    4.9    [m]</p> <p><b><math>\Delta P_v \times Flac</math>    7.1    [kPa]</b></p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_{v-cal}</math>    79.8    [kN]</p> <p><math>b_{cal}</math>    13.3    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math>    6.0    [kPa]</b></p> <p><math>PP_{v-ar}</math>    81.6    [kN]</p> <p><math>b_{ar}</math>    8    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math>    10.2    [kPa]</b></p>
--	---

Tabella 2: Carico sismico SLD – Modello 1 – GA con sella

<p><b>Spinta terreno orizzontale</b></p> <p><math>H_{cal}</math>    14.2    [m]</p> <p><math>H_{cop}</math>    6    [m]</p> <p><math>\gamma</math>    22    [kN/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>S_h</math>    2703.8    [kN]</p> <p><b><math>P_h \times Flac</math>    190.4    [kPa]</b></p> <p><math>A_{cal}</math>    48.8    [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>A_{AR}</math>    30.2    [m<sup>2</sup>]</p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_h</math>    297.4    [kN]</p> <p><math>h_{cal}</math>    10.9    [m]</p> <p><b><math>PP_h \times Flac</math>    27.3    [kPa]</b></p>	<p><b>Spinta terreno verticale</b></p> <p><b><math>P_v \times Flac</math>    19.9    [kPa]</b></p> <p><math>\Delta_{cal}</math>    4.9    [m]</p> <p><b><math>\Delta P_v \times Flac</math>    16.2    [kPa]</b></p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_{v-cal}</math>    183.7    [kN]</p> <p><math>b_{cal}</math>    13.3    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math>    13.8    [kPa]</b></p> <p><math>PP_{v-ar}</math>    113.7    [kN]</p> <p><math>b_{ar}</math>    8    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math>    14.2    [kPa]</b></p>
---	--

Tabella 3: Carico sismico SLV – Modello 2 – GA

<p><b>Spinta terreno orizzontale</b></p> <p><math>H_{cal}</math>    14.2    [m]</p> <p><math>H_{cop}</math>    6    [m]</p> <p><math>\gamma</math>    22    [kN/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>S_h</math>    1174.2    [kN]</p> <p><b><math>P_h \times Flac</math>    82.7    [kPa]</b></p> <p><math>A_{cal}</math>    48.8    [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>A_{AR}</math>    30.2    [m<sup>2</sup>]</p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_h</math>    129.2    [kN]</p> <p><math>h_{cal}</math>    10.9    [m]</p> <p><b><math>PP_h \times Flac</math>    11.9    [kPa]</b></p>	<p><b>Spinta terreno verticale</b></p> <p><b><math>P_v \times Flac</math>    8.6    [kPa]</b></p> <p><math>\Delta_{cal}</math>    4.9    [m]</p> <p><b><math>\Delta P_v \times Flac</math>    7.1    [kPa]</b></p> <p><b>Inerzia riv. orizzontale</b></p> <p><math>PP_{v-cal}</math>    79.8    [kN]</p> <p><math>b_{cal}</math>    13.3    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-cal} \times Flac</math>    6.0    [kPa]</b></p> <p><math>PP_{v-ar}</math>    49.4    [kN]</p> <p><math>b_{ar}</math>    8    [m]</p> <p><b><math>PP_{v-ar} \times Flac</math>    6.2    [kPa]</b></p>
--	--

Tabella 4: Carico sismico SLD – Modello 2 – GA

## 9.2 PARAMETRI GEOTECNICI

Il terreno al di sotto del piano di scavo per la realizzazione della galleria artificiale è indicato nel seguito come “Detrito –c”, che rimane al di sotto del materiale di ritombamento, con caratteristiche simili a quelle del “Detrito – a” considerato nell’analisi delle paratie di imbocco:

Terreno	Profondità da p.c. [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\phi$ [°]	$c'$ [kPa]
Ritombamento	0 - 20	22*	50	30	0
Detrito - c	> 20	23	200	37	0

Tabella 5: Stratigrafia per Cogollo Sud

\*Peso del terreno sovrastimato al fine di massimizzare le sollecitazioni sul rivestimento

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 17m di diametro, il modello ha una larghezza di 120m e un’altezza di 55m.

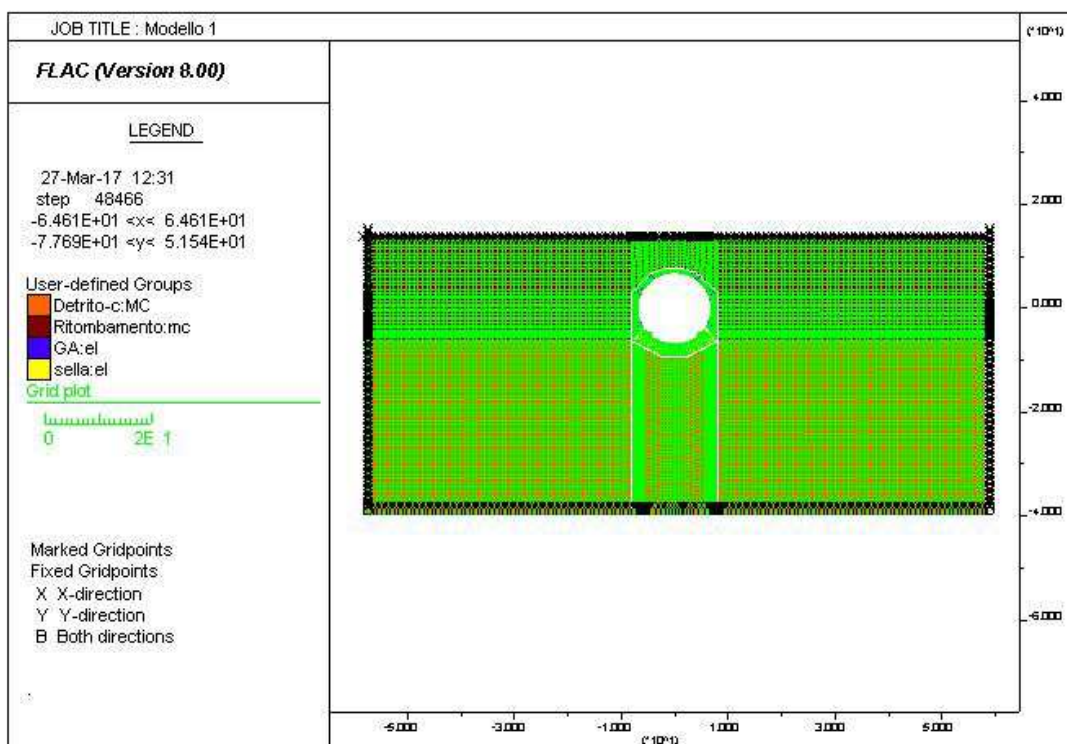


Figura 24 - Modello “GA con sella”

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

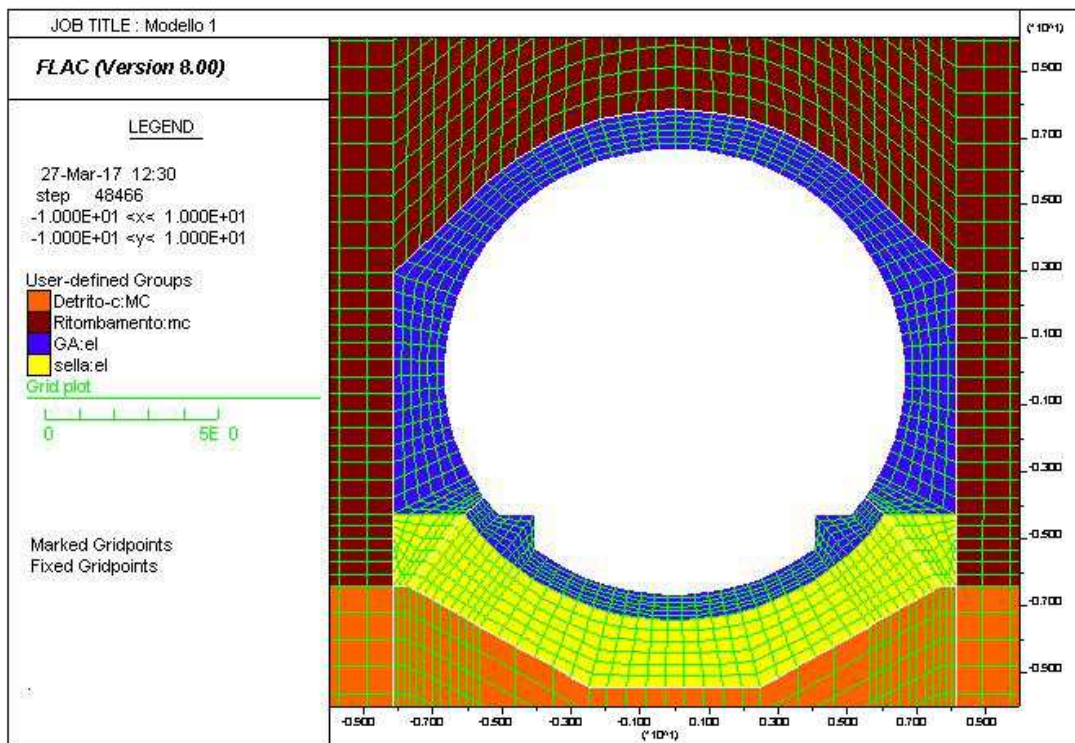


Figura 25 - Modello “GA con sella” - particolare

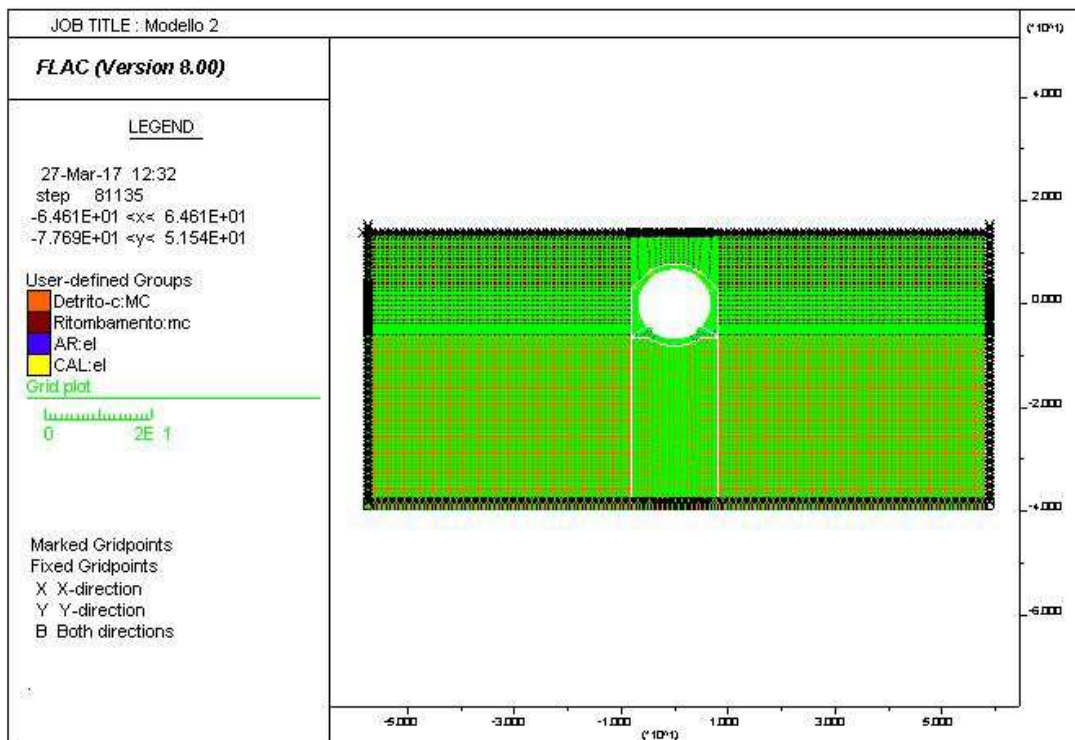


Figura 26 - Modello “GA”

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

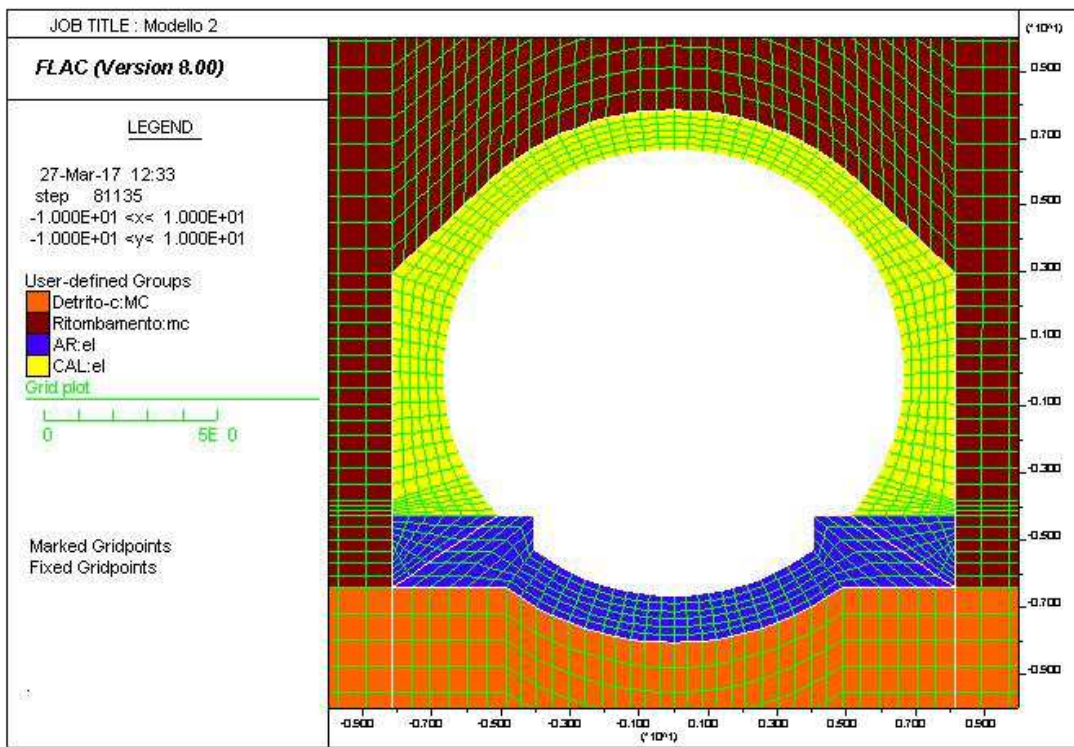


Figura 27 - Modello "GA" - particolare

## 10 MODELLO 1 – GA con sella

### 10.1 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	7.14	35.19	38.29	38.31
Arco rovescio	7.28	33.93	36.37	37.96
Convergenza diametrale	-0.14	1.26	1.92	0.35

Tabella 6: Spostamento verticale [mm]

Nello step 6, la sella ha uno spostamento verticale di 17.33mm e assenza di deformazioni plastiche nel terreno sottostante, quindi la sella torna nella configurazione Step 2 dopo il passaggio della TBM.

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

### 10.2 Verifiche a pressoflessione

Per reggere il passaggio della TBM, la sella è armata con ferri principali  $\varnothing 26$  ogni 10 cm lato terreno e con  $\varnothing 26/20$  cm lato TBM. Considerando l’avanzamento della TBM, si prevedono inoltre dei  $\varnothing 26$  come ripartitori e gli spilli saranno dei  $\varnothing 16$  a maglia 30x40 cm.

Per la calotta si prevedono dei ferri  $\varnothing 24$  ogni 20cm su ambo i lati, con ripartitori  $\varnothing 14$  e spilli  $\varnothing 14$  a maglia 30x40 cm. L’arco rovescio, inglobando la sella, ne mantiene i ferri lato terreno ed in intradosso vengono posizionati  $\varnothing 26$  ogni 20 cm.

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 diverse parti della galleria.

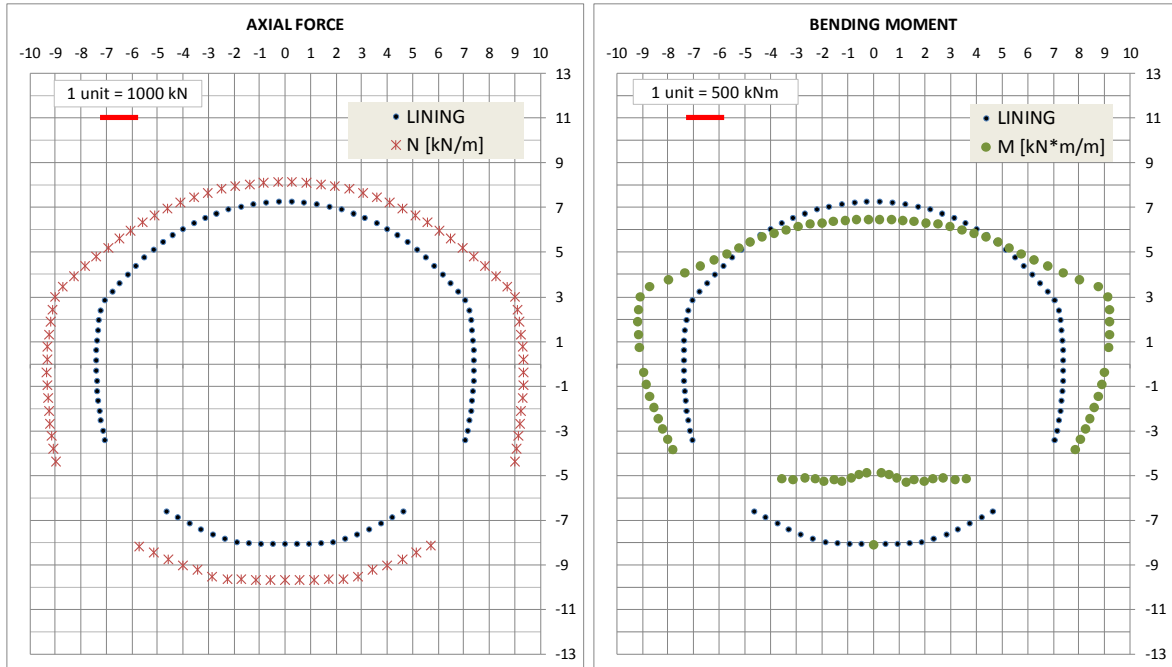


Figura 28 - Diagrammi N e M – Step 3

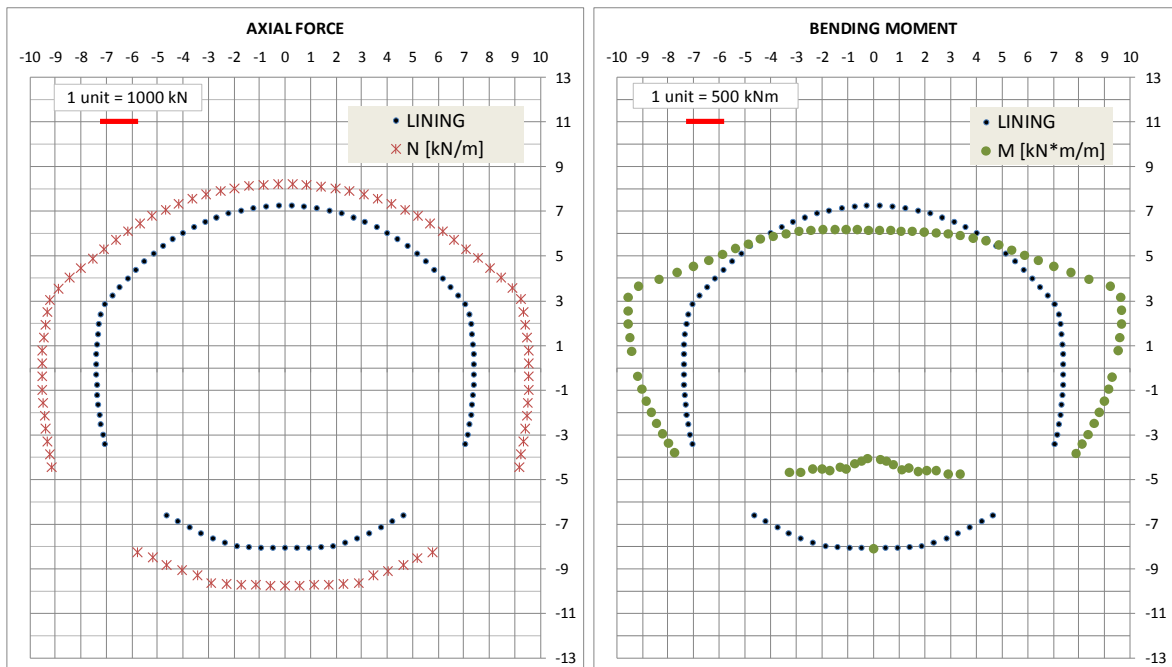


Figura 29 - Diagrammi N e M – Step 4

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

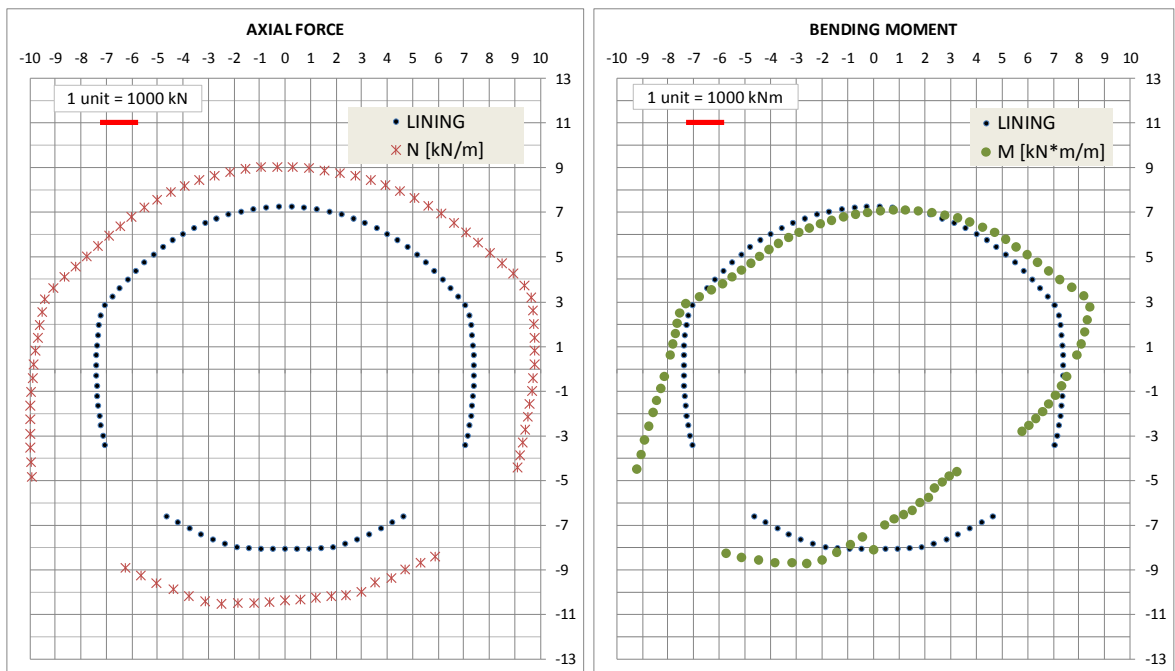


Figura 30 - Diagrammi N e M – Step 5

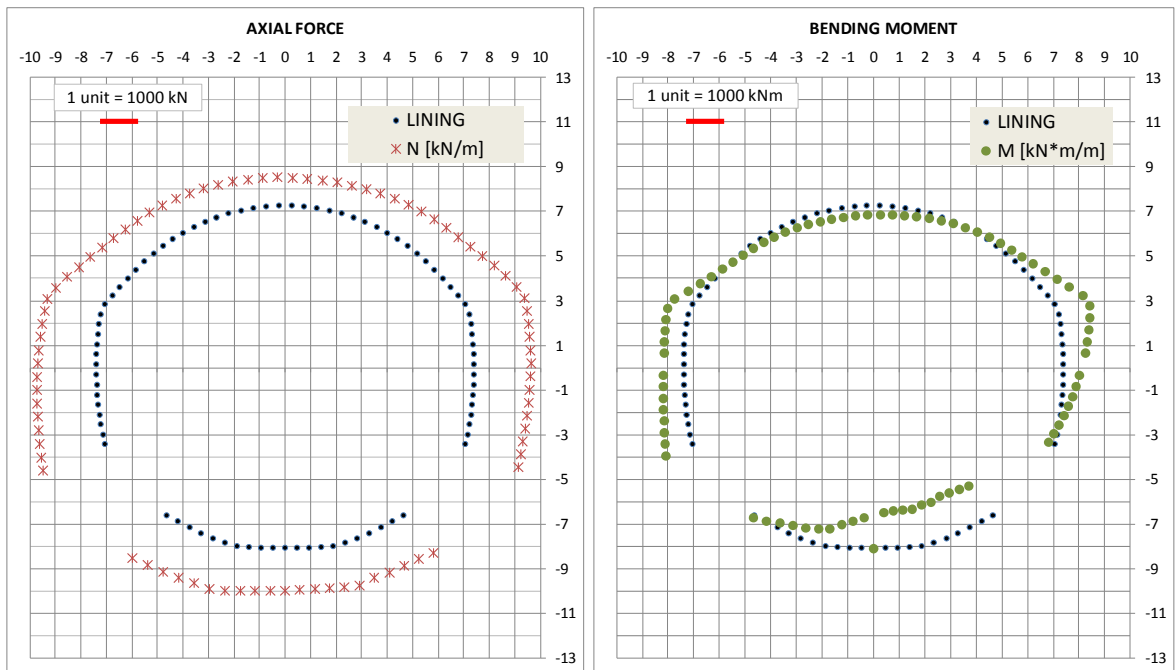
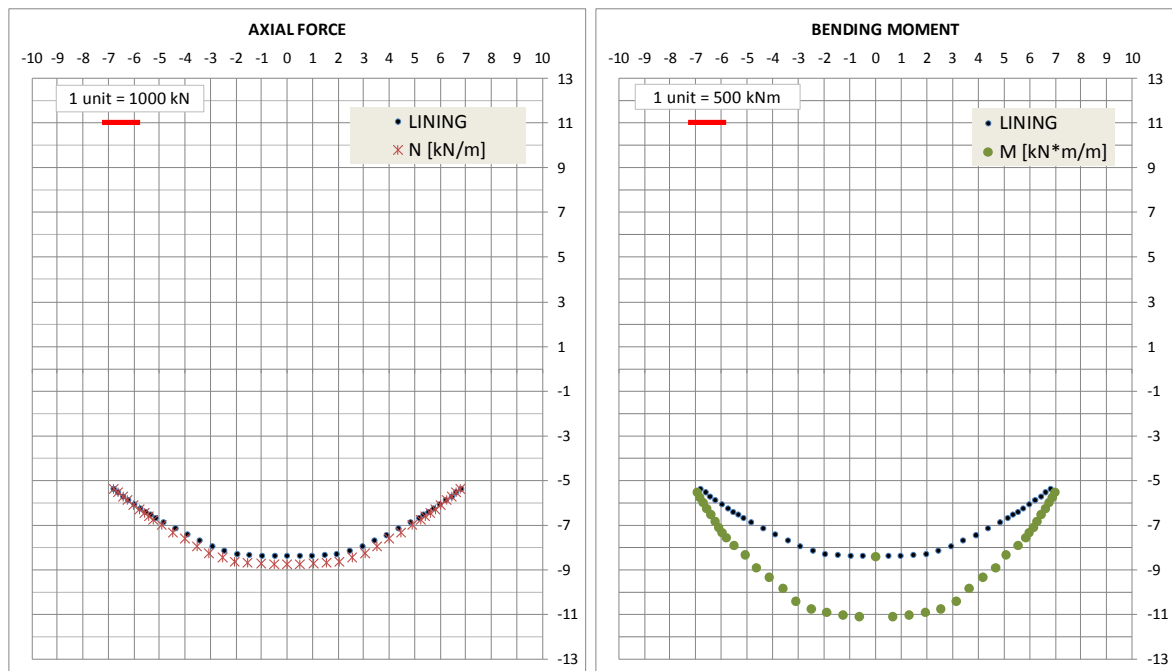


Figura 31 - Diagrammi N e M – Step 5b



**Figura 32 - Diagrammi N e M – Step 6**

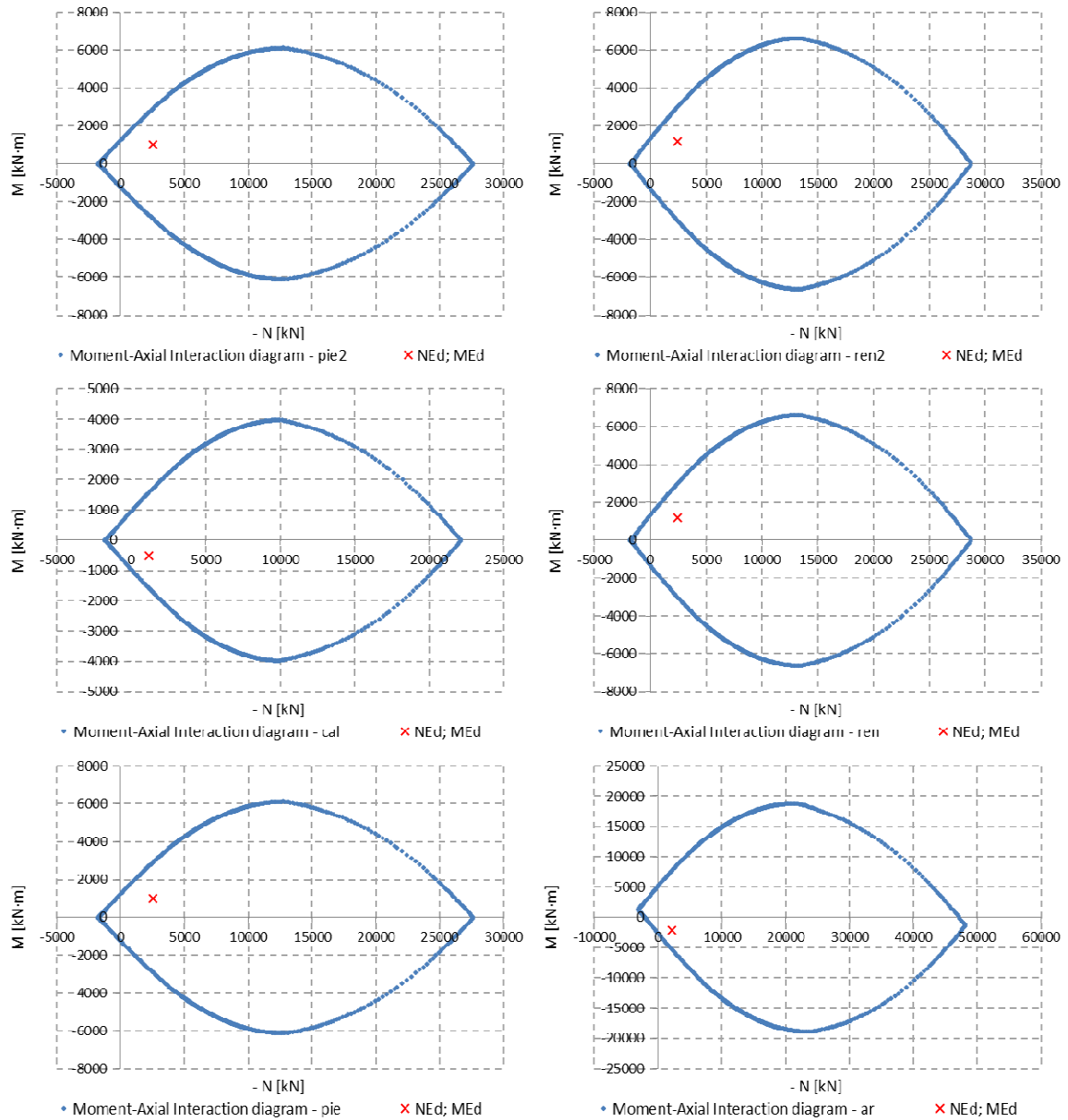
### 10.2.1 Stato Limite Ultimo

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	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2525	1023	2902	2.8
ren2	1.59	22.62	22.62	7.60	7.60	-2480	1185	3014	2.5
cal	1.20	22.62	22.62	7.60	7.60	-1164	-499	-1572	3.1
ren	1.59	22.62	22.62	7.60	7.60	-2480	1185	3013	2.5
pie	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2525	1023	2902	2.8
ar	2.65	53.09	26.55	7.70	7.70	-2090	-2117	-5194	2.5

Tabella 7: 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	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2780	1173	3056	2.6
ren2	1.59	22.62	22.62	7.60	7.60	-2748	1411	3184	2.3
cal	1.20	22.62	22.62	7.60	7.60	-1244	-704	-1611	2.3
ren	1.59	22.62	22.62	7.60	7.60	-2777	1455	3202	2.2
pie	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2814	1229	3075	2.5

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

ar	2.65	53.09	26.55	7.70	7.70	-2176	-2630	-5296	2.0
----	------	-------	-------	------	------	-------	-------	-------	-----

Tabella 8: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

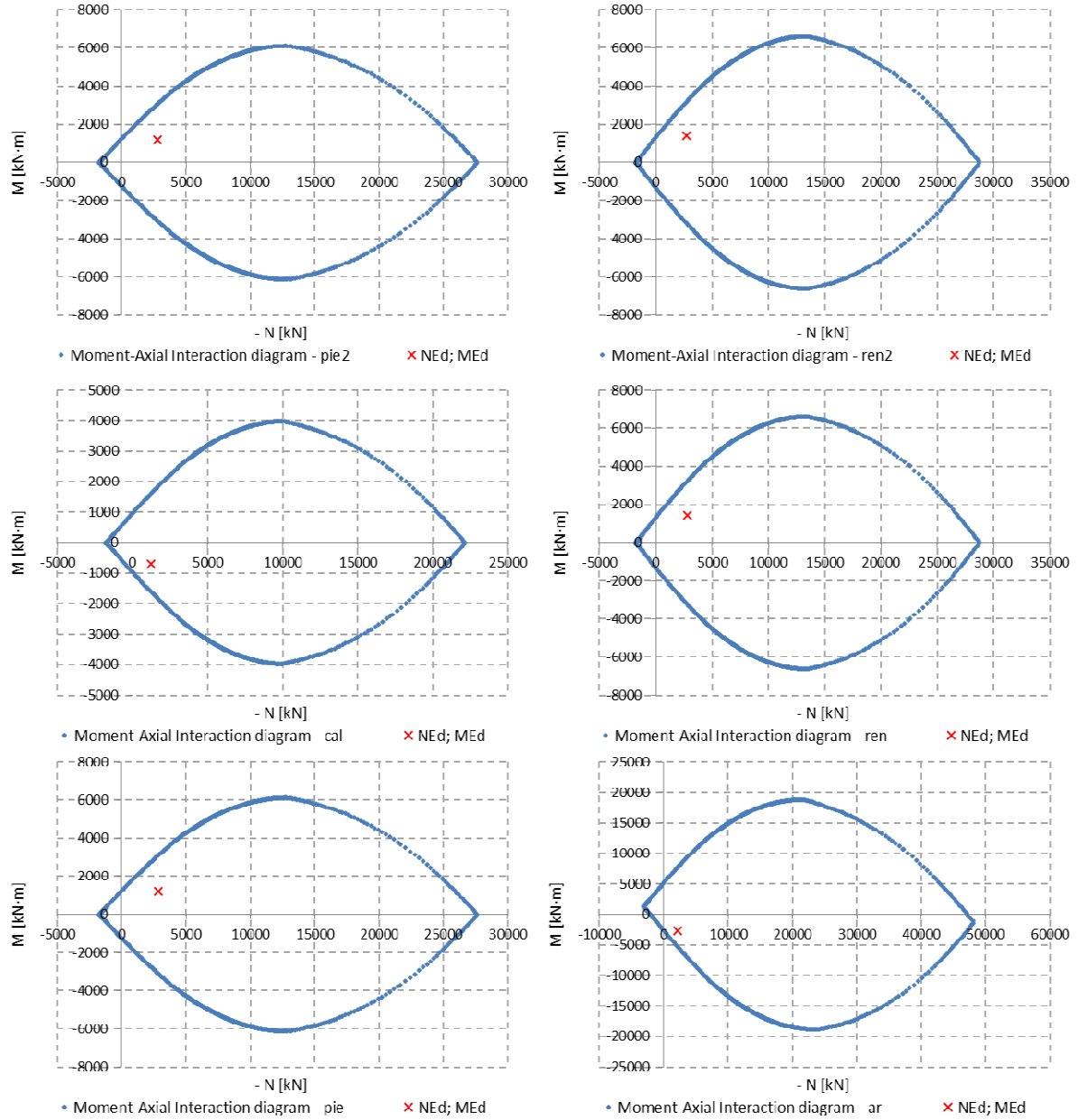


Figura 34 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

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	2.44	22.62	22.62	7.60	7.60	-3174	2404	5517	2.3
ren2	1.21	22.62	22.62	7.60	7.60	-1832	-517	-1918	3.7

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

cal	1.20	22.62	22.62	7.60	7.60	-1832	-489	-1903	3.9
ren	1.92	22.62	22.62	7.60	7.60	-2487	1202	3708	3.1
pie	2.44	22.62	22.62	7.60	7.60	-2258	-1455	-4567	3.1
ar	2.64	53.09	26.55	7.70	7.70	-2111	-2467	-5194	2.1

Tabella 9: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5

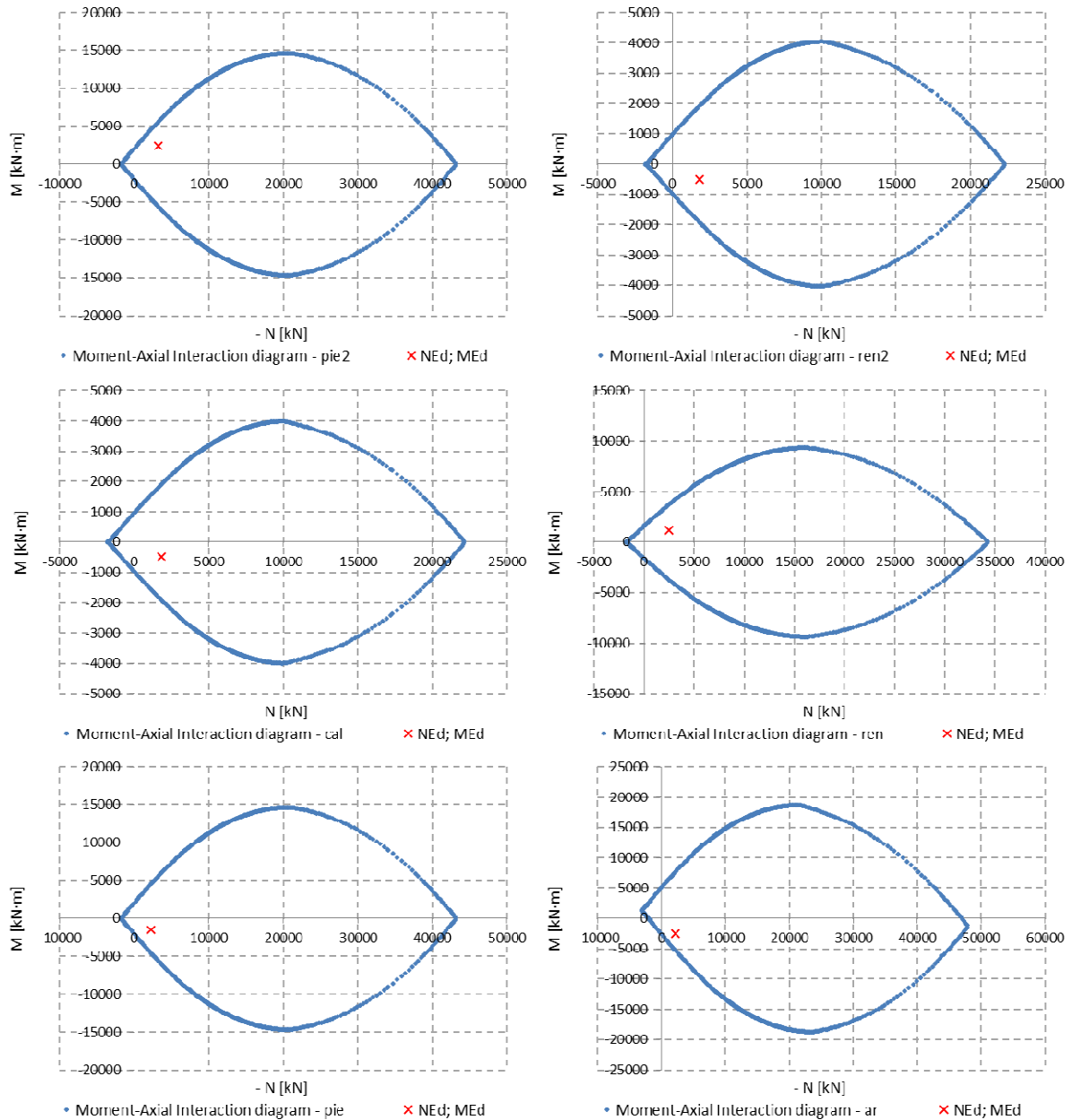
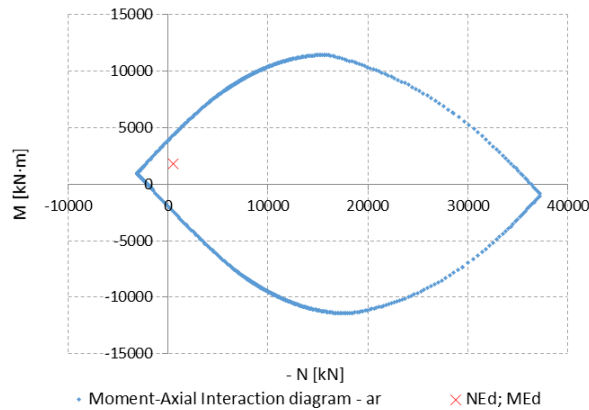


Figura 35 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5

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

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]	[-]
ar	2.01	53.09	26.55	8.90	8.90	-483	1769	4288	2.4

Tabella 10: Verifica a pressoflessione SLU – Step 6



**Figura 36 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 6**

### 10.2.2 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.

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	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1942.5	787.0	-3.2	11.9	0.01
ren2	1.59	22.62	22.62	7.6	7.6	-1907.9	911.4	-3.4	20.5	0.03
cal	1.20	22.62	22.62	7.6	7.6	-895.5	-384.0	-2.5	22.3	0.03
ren	1.59	22.62	22.62	7.6	7.6	-1907.7	911.9	-3.4	20.5	0.03
pie	1.5	22.62	22.62	7.6	7.6	-1942.5	787.0	-3.2	11.9	0.01
ar	2.65	53.09	26.55	7.7	7.7	-1607.4	-1628.6	-2.2	29.6	0.07

Tabella 11: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3

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	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-2138.8	902.0	-3.7	16.1	0.02
ren2	1.59	22.62	22.62	7.6	7.6	-2113.6	1085.3	-4.1	31.0	0.05
cal	1.20	22.62	22.62	7.6	7.6	-956.7	-541.5	-3.7	60.2	0.10
ren	1.59	22.62	22.62	7.6	7.6	-2136.2	1119.0	-4.2	34.0	0.05
pie	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-2164.2	945.3	-3.8	19.2	0.02
ar	2.65	53.09	26.55	7.7	7.7	-1673.7	-2023.0	-3.0	60.0	0.18

Tabella 12: 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	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-2322.7	808.7	-3.4	5.5
ren2	1.51	22.62	22.62	7.6	7.6	-2296.3	-798.3	-3.4	5.7
cal	1.20	22.62	22.62	7.6	7.6	-1267.6	-399.4	-2.6	7.9
ren	1.80	22.62	22.62	7.6	7.6	-2249.2	1141.7	-3.4	17.0
pie	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-2221.1	623.4	-2.9	-1.2
ar	2.65	53.09	26.55	7.7	7.7	-1966.8	-1783.1	-2.4	22.9

Tabella 13: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b

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]
ar	2.01	53.09	26.55	8.9	8.9	-371.5	1360.6	-3.1	113.6	0.19

Tabella 14: Verifica a pressoflessione SLE – Step 6

### 10.3 Verifiche a taglio

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



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

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	776	-2662	1960	1.319	2261.9	20362	-1.307	843	935	1.20
ren2	-407	-2432	1865	1.327	2261.9	19415	-1.253	797	879	2.16
cal	-116	-1373	1125	1.422	2261.9	12009	-1.143	534	546	4.69
ren	407	-2432	1865	1.327	2261.9	19415	-1.253	797	879	2.16
pie	-775	-2663	1960	1.319	2261.9	20362	-1.308	843	935	1.21
ar	-653	-2352	2562	1.279	2654.6	26386	-0.891	903	1029	1.58

Tabella 15: Verifica a taglio – Step 3

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	920	-2888	1960	1.319	2261.9	20362	-1.418	887	876	967
ren2	-406	-2702	1865	1.327	2261.9	19415	-1.392	846	836	918
cal	210	-1539	1125	1.422	2261.9	12009	-1.281	566	558	569
ren	427	-2728	1865	1.327	2261.9	19415	-1.405	850	840	922
pie	-921	-2923	1960	1.319	2261.9	20362	-1.436	892	881	972
ar	-775	-2475	2562	1.279	2654.6	26386	-0.938	934	921	1047

Tabella 16: Verifica a taglio – Step 4

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	-199	-2507	1445	1.372	2261.9	15207	-1.649	756	747	787
ren2	-387	-2321	1599	1.354	2261.9	16749	-1.386	753	743	799
cal	173	-1832	1125	1.422	2261.9	12009	-1.526	607	599	611
ren	-585	-2370	1434	1.373	2261.9	15097	-1.570	734	725	765
pie	-1036	-2221	1799	1.333	2261.9	18746	-1.185	768	757	833
ar	1044	-2721	2703	1.272	5309.3	27798	-0.979	1142	1125	1115

Tabella 17: Verifica a taglio – Step 5

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

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]	[-]
pie	-1036	1799	1619	14	8.3	1282.8	35	1160	6900	1.12

Tabella 18: Verifica a taglio – Step 5 – 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]	[-]
ar	-227	-282	1905	1.324	5309.3	19935	-0.141	641	578	2.82

Tabella 19: Verifica a taglio – Step 6

## 11 MODELLO 2 – GA

### 11.1 *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	7.84	37.06	39.75	43.99
Arco rovescio	9.34	36.14	37.99	46.11
Convergenza radiale	-1.5	0.92	1.76	-2.12

Tabella 20: Spostamento verticale [mm]

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

### 11.2 *Verifiche a pressoflessione*

In calotta e in arco rovescio si prevedono dei ferri  $\varnothing 24$  ogni 15cm su ambo i lati, con ripartitori  $\varnothing 14$  e spilli  $\varnothing 14$  a maglia 30x40 cm.

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 diverse parti della galleria.

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

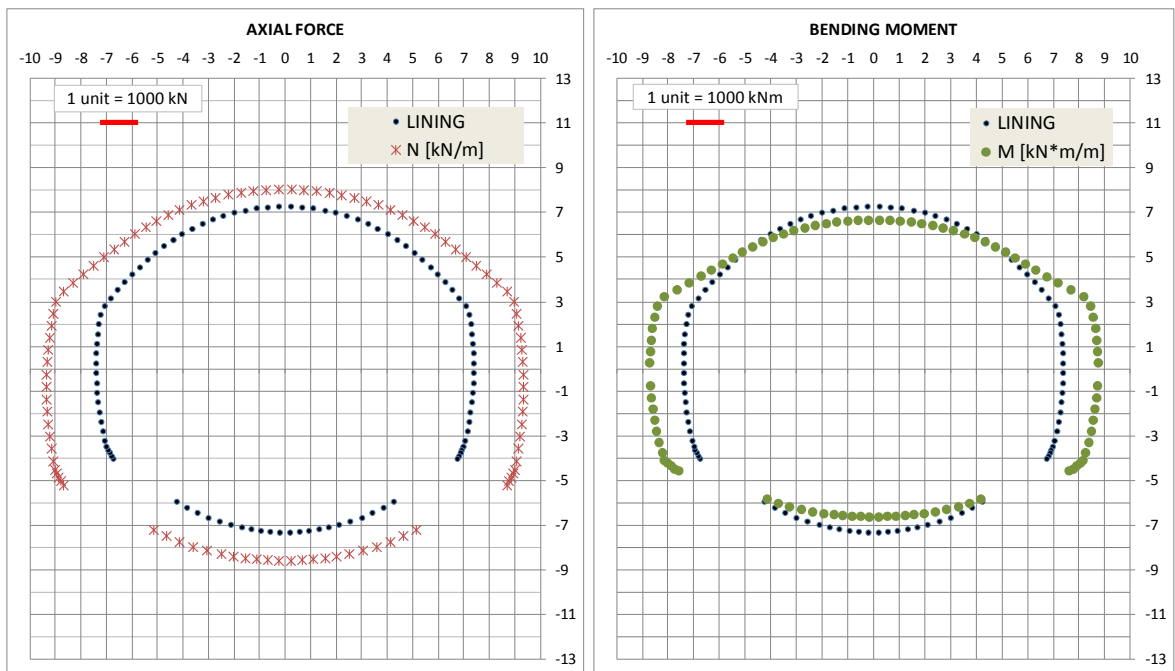


Figura 37 - Diagrammi N e M – Step 3

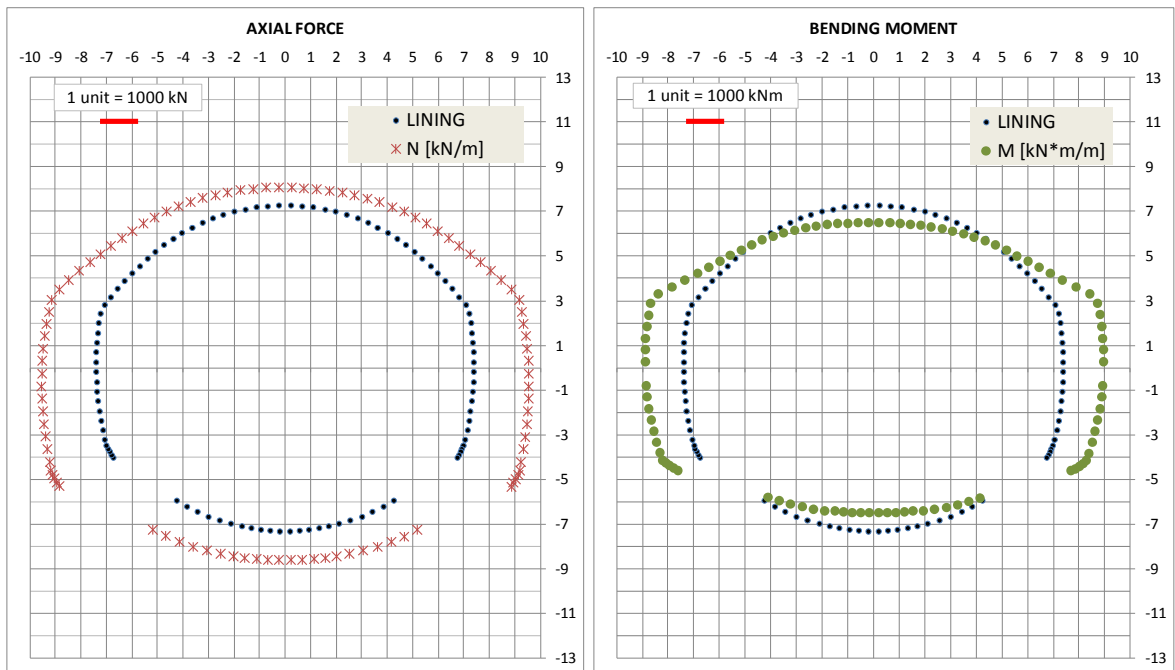
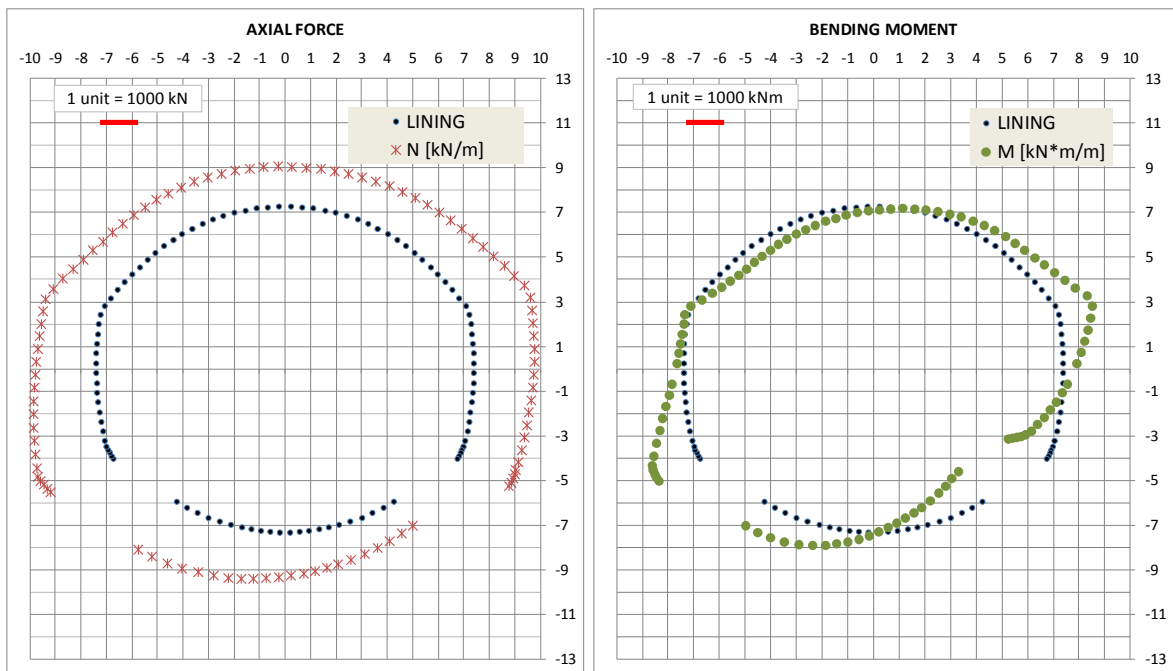
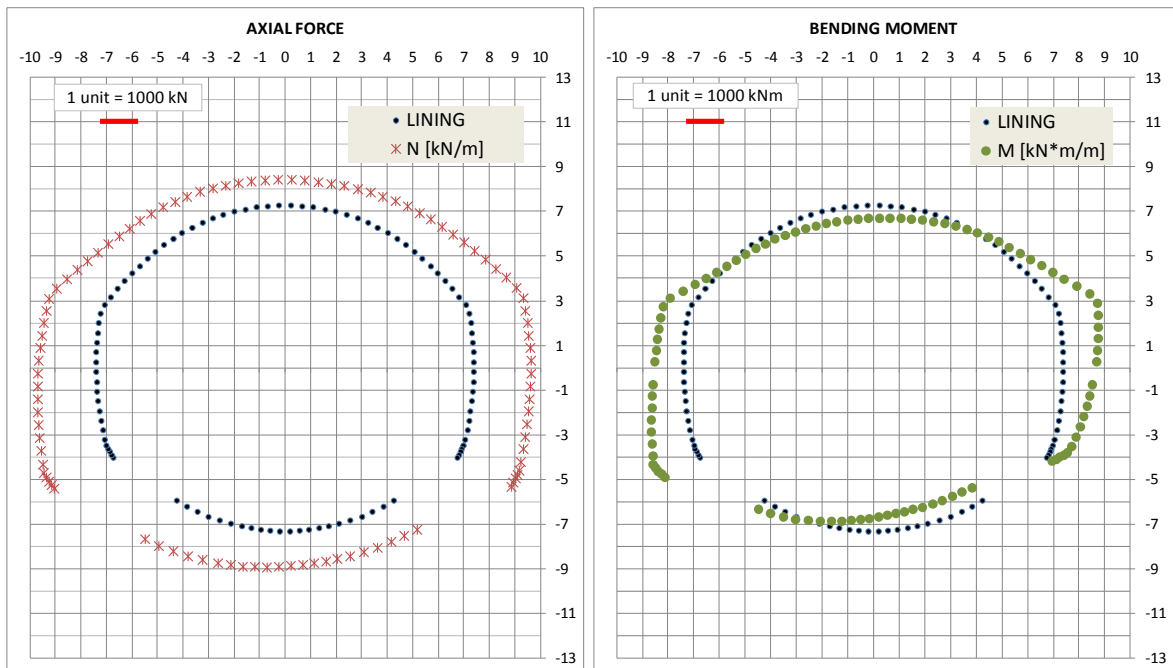


Figura 38 - Diagrammi N e M – Step 4



**Figura 39 - Diagrammi N e M – Step 5**



**Figura 40 - Diagrammi N e M – Step 5b**

### 11.2.1 Stato Limite Ultimo

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

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

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	1.51	30.16	30.16	7.60	7.60	-2538	1728	3291	1.9
ren2	1.52	30.16	30.16	7.60	7.60	-2508	1728	3278	1.9
cal	1.20	30.16	30.16	7.60	7.60	-1015	-741	-1802	2.4
ren	1.52	30.16	30.16	7.60	7.60	-2501	1727	3272	1.9
pie	1.51	30.16	30.16	7.60	7.60	-2532	1727	3285	1.9
ar	1.40	30.16	30.16	7.60	7.60	-1671	-923	-2523	2.7

Tabella 21: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

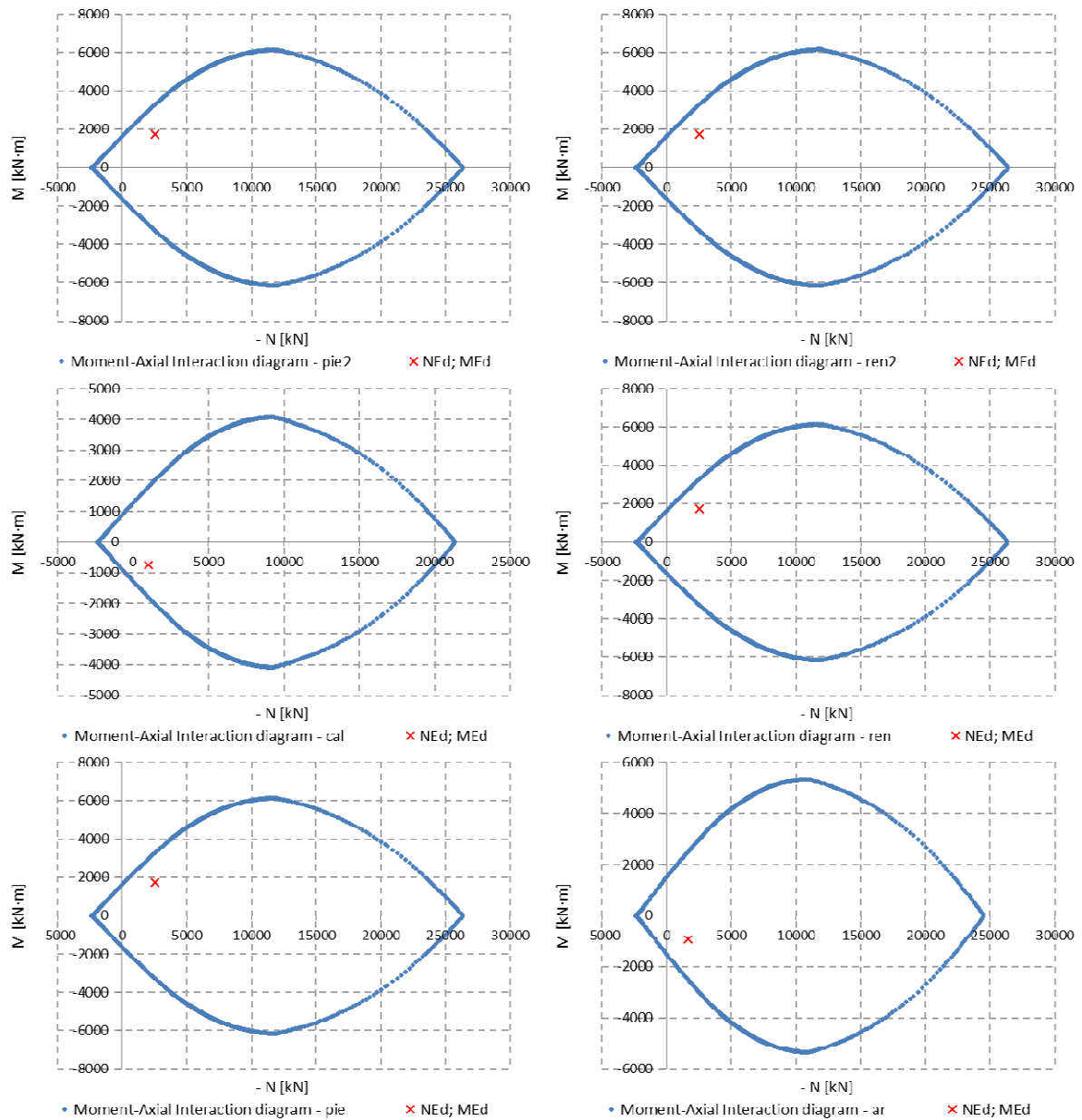


Figura 41 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

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

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	1.51	30.16	30.16	7.60	7.60	-2778	-1963	-3436	1.8
ren2	1.52	30.16	30.16	7.60	7.60	-2749	1977	3424	1.7
cal	1.20	30.16	30.16	7.60	7.60	-1066	-961	-1828	1.9
ren	1.52	30.16	30.16	7.60	7.60	-2768	2012	3433	1.7
pie	1.51	30.16	30.16	7.60	7.60	-2798	-2001	-3446	1.7
ar	1.40	30.16	30.16	7.60	7.60	-1698	-1084	-2539	2.3

Tabella 22: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

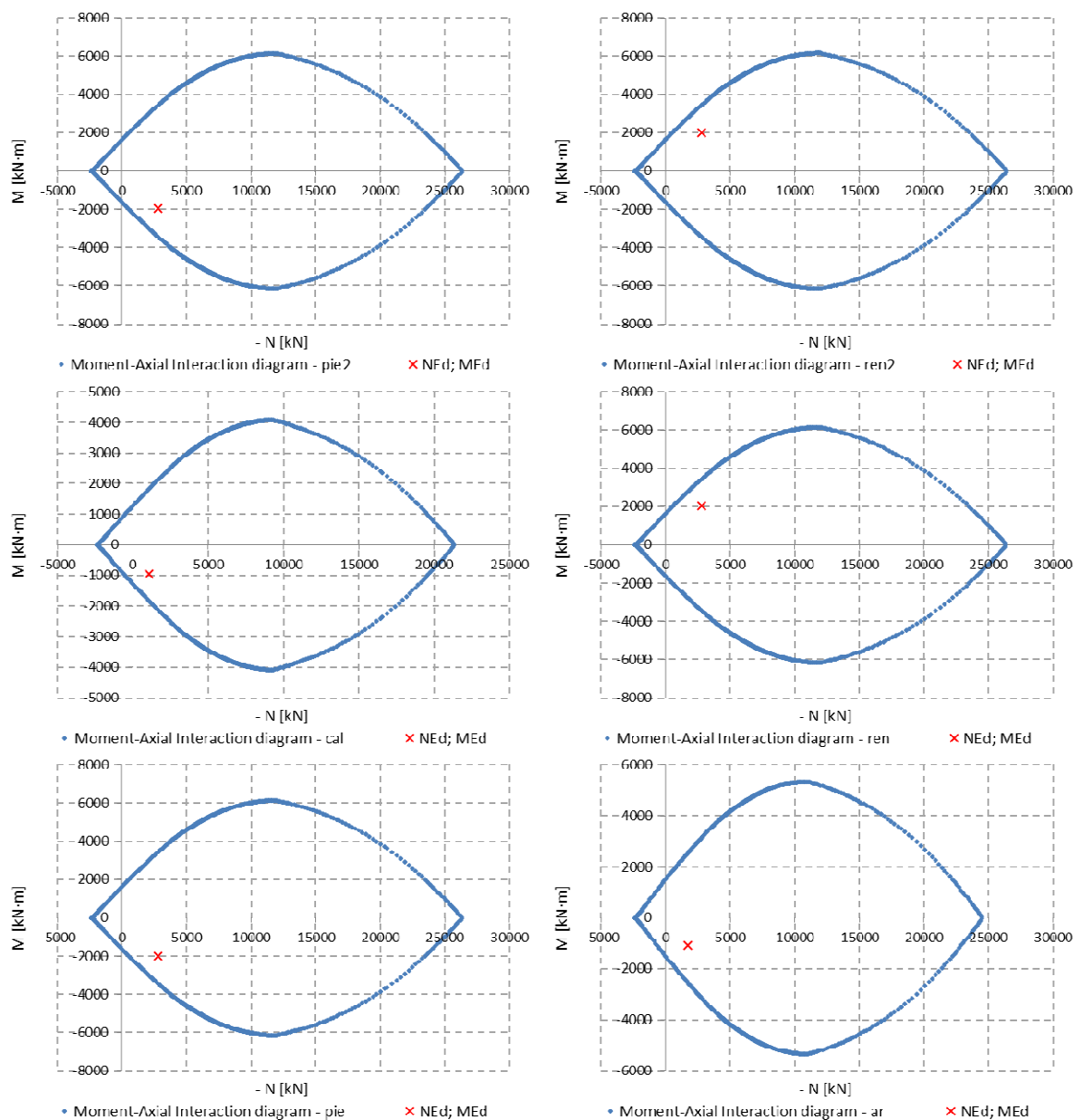


Figura 42 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

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

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	2.41	30.16	30.16	7.60	7.60	-3015	1854	5948	3.2
ren2	1.21	30.16	30.16	7.60	7.60	-1827	-592	-2222	3.8
cal	1.20	30.16	30.16	7.60	7.60	-1832	-531	-2214	4.2
ren	1.95	30.16	30.16	7.60	7.60	-2490	1345	4292	3.2
pie	2.83	30.16	30.16	7.60	7.60	-2390	-1746	-6293	3.6
ar	1.40	30.16	30.16	7.60	7.60	-1328	-1669	-2323	1.4

Tabella 23: Verifica a pressoflessione SLU – Step 5

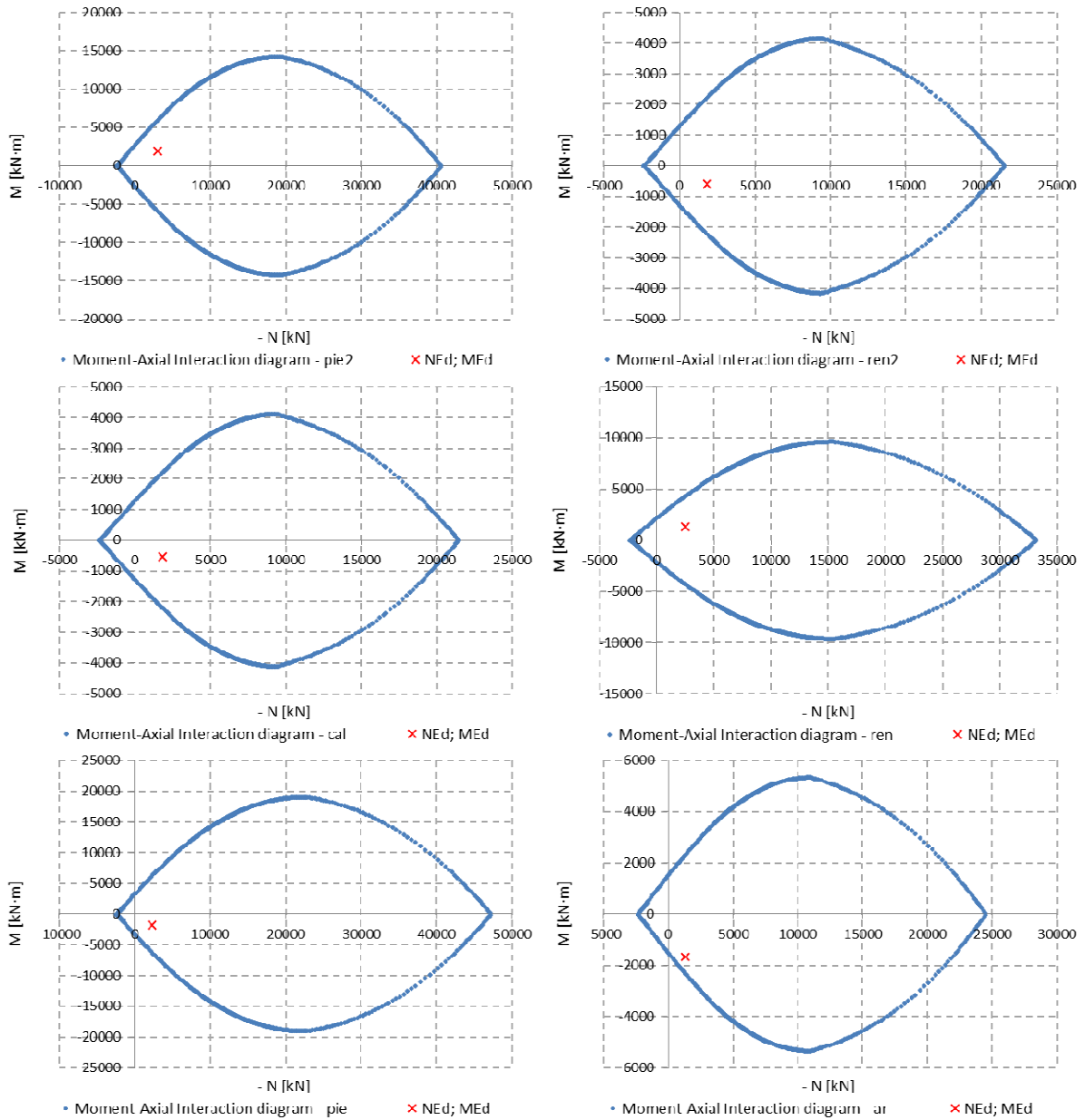


Figura 43 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 5



### 11.2.2 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.

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	1.51	30.16	30.16	7.6	7.6	-1952.5	1329.0	-5.4	79.6	0.12
ren2	1.52	30.16	30.16	7.6	7.6	-1929.2	1329.2	-5.4	81.1	0.12
cal	1.20	30.16	30.16	7.6	7.6	-781.1	-570.1	-3.6	73.8	0.10
ren	1.52	30.16	30.16	7.6	7.6	-1924.1	1328.5	-5.4	81.6	0.12
pie	1.51	30.16	30.16	7.6	7.6	-1947.5	1328.4	-5.4	80.1	0.12
ar	1.40	30.16	30.16	7.6	7.6	-1285.0	-710.1	-3.3	35.8	0.05

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	1.51	30.16	30.16	7.6	7.6	-2136.9	-1509.9	-6.2	97.2	0.15
ren2	1.52	30.16	30.16	7.6	7.6	-2114.4	1520.8	-6.2	100.7	0.16
cal	1.20	30.16	30.16	7.6	7.6	-820.2	-739.0	-4.8	118.6	0.18
ren	1.52	30.16	30.16	7.6	7.6	-2129.2	1547.9	-6.4	104.7	0.16
pie	1.51	30.16	30.16	7.6	7.6	-2152.2	-1538.9	-6.3	101.5	0.16
ar	1.40	30.16	30.16	7.6	7.6	-1306.4	-833.7	-3.9	57.1	0.08

Tabella 25: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4

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

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	1.54	30.16	30.16	7.6	7.6	-2313.0	1227.9	-4.7	38.2
ren2	1.52	30.16	30.16	7.6	7.6	-2240.7	1136.8	-4.5	33.1
cal	1.20	30.16	30.16	7.6	7.6	-1174.4	-563.2	-3.5	36.1
ren	1.61	30.16	30.16	7.6	7.6	-2215.0	1392.2	-5.0	56.9
pie	1.51	30.16	30.16	7.6	7.6	-2240.0	-1208.8	-4.8	42.2
ar	1.40	30.16	30.16	7.6	7.6	-1507.7	-824.1	-3.8	40.6

Tabella 26: Verifica a pressoflessione SLE – Step 5b

### 11.3 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	-544	-2966	2759	1.269	3015.9	28347	-1.046	1043	1164	2.14
ren2	-558	-2395	1871	1.327	3015.9	19466	-1.230	837	875	1.57
cal	-197	-1264	1128	1.421	3015.9	12044	-1.050	554	532	2.81
ren	557	-2390	1871	1.327	3015.9	19466	-1.228	837	874	1.57
pie	544	-2959	2756	1.269	3015.9	28317	-1.045	1042	1162	2.14
ar	357	-2005	1322	1.389	3015.9	13983	-1.434	693	685	1.94

Tabella 27: Verifica a taglio – Step 3

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

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	-527	-3201	2759	1.269	3015.9	28347	-1.129	1077	1198	2.27
ren2	-580	-2635	1871	1.327	3015.9	19466	-1.353	872	909	1.57
cal	291	-1401	1128	1.421	3015.9	12044	-1.164	573	551	1.97
ren	595	-2652	1871	1.327	3015.9	19466	-1.362	875	912	1.53
pie	533	-3224	2756	1.269	3015.9	28317	-1.138	1080	1201	2.25
ar	-419	-2084	1323	1.389	3015.9	13990	-1.489	705	697	1.68

Tabella 28: Verifica a taglio – Step 4

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	-1347	-2864	2759	1.269	3015.9	28347	-1.010	1028	1149	0.85
ren2	-428	-2352	1441	1.373	3015.9	15168	-1.551	763	764	1.79
cal	204	-1832	1128	1.421	3015.9	12044	-1.521	634	611	3.10
ren	-293	-2367	1440	1.373	3015.9	15158	-1.562	765	766	2.62
pie	-649	-2276	1845	1.329	3015.9	19212	-1.185	817	852	1.31
ar	594	-2032	1323	1.389	3015.9	13990	-1.452	697	689	1.17

Tabella 29: 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	-1347	2759	2483	14	8.3	1282.8	35	1780	9844	1.32

Tabella 30: Verifica a taglio – Step 5 – con spilli

## 12 VERIFICA AL FUOCO

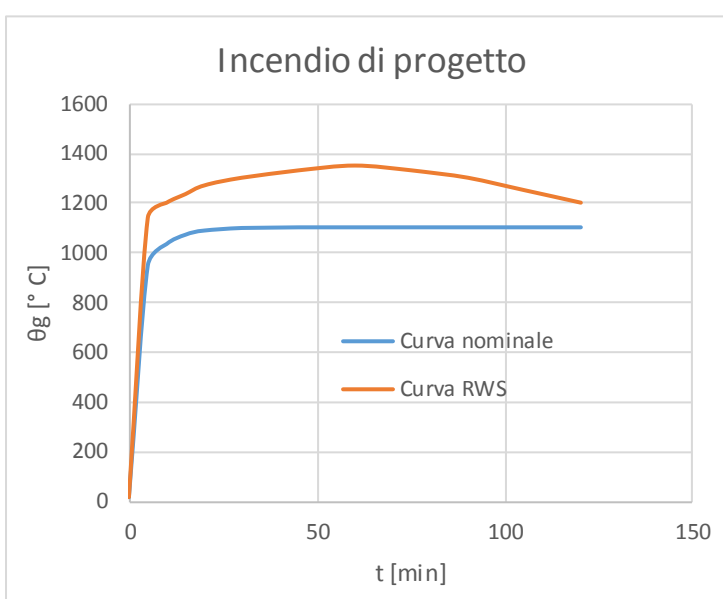
Il rivestimenti definitivi della galleria, ad esclusione dell’arco rovescio, può essere esposto ad un incendio durante la sua vita d’esercizio. Nel seguito si verifica che le strutture previste assicurino il necessario livello di sicurezza in questa combinazione di carico eccezionale.

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

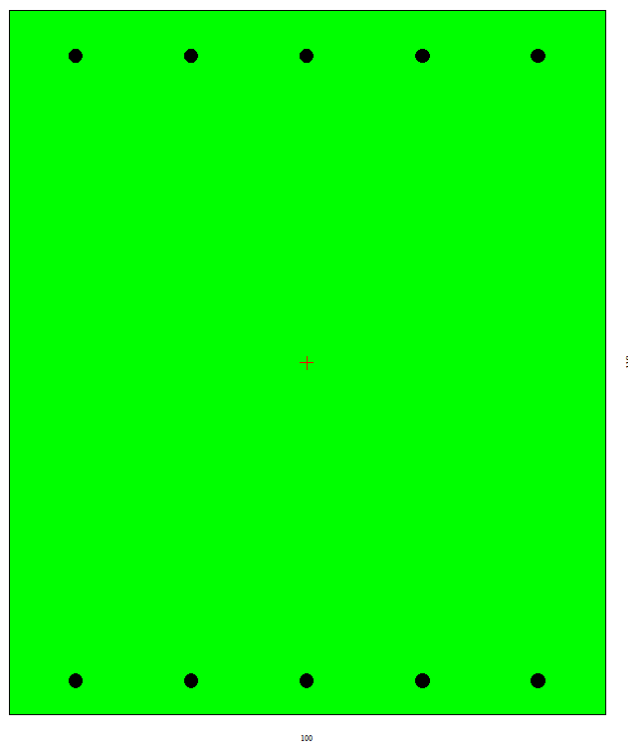
Per lo studio della resistenza al fuoco, come fatto per le analisi a freddo, si considera una sezione resistente larga 1 metro e la relativa armatura.

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).

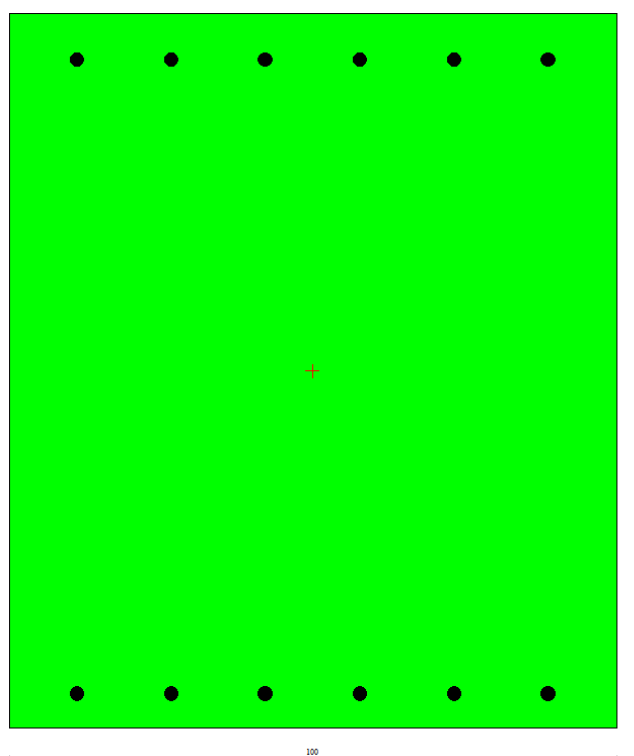
Si analizzano le sezioni maggiormente sollecitate, in accordo a quanto risulta dalle verifiche pressoflessionali allo SLE con riferimento allo step di calcolo 4 del lungo termine.

SEZIONE DI CALCOLO	H [cm]	N <sub>ek</sub> [kNm/m]	M <sub>ek</sub> [kN/m]
MODELLO 1 – GA con sella	1.18	-956.7	-541.5
MODELLO 2 - GA	1.18	-820.2	-739

Tabella 31: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria

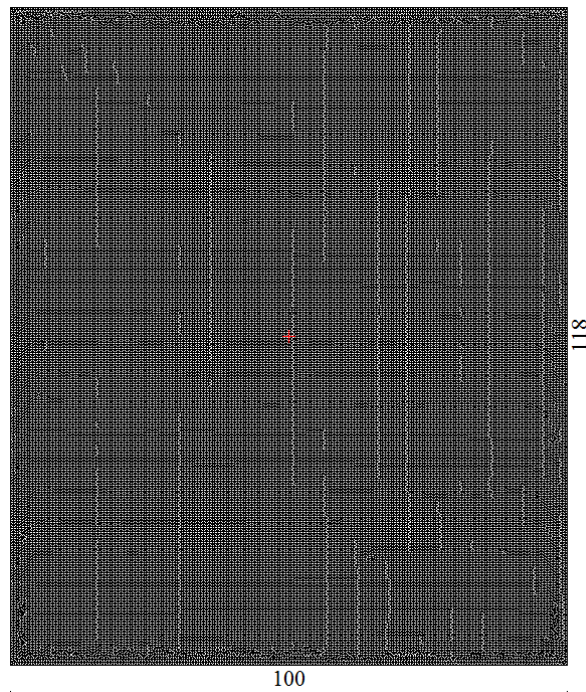


**Figura 44 – Sezione di calcolo – Modello 1**



**Figura 45 – Sezione di calcolo – Modello 2**

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



**Figura 46 – Mesh di calcolo – Modello 1 e 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.

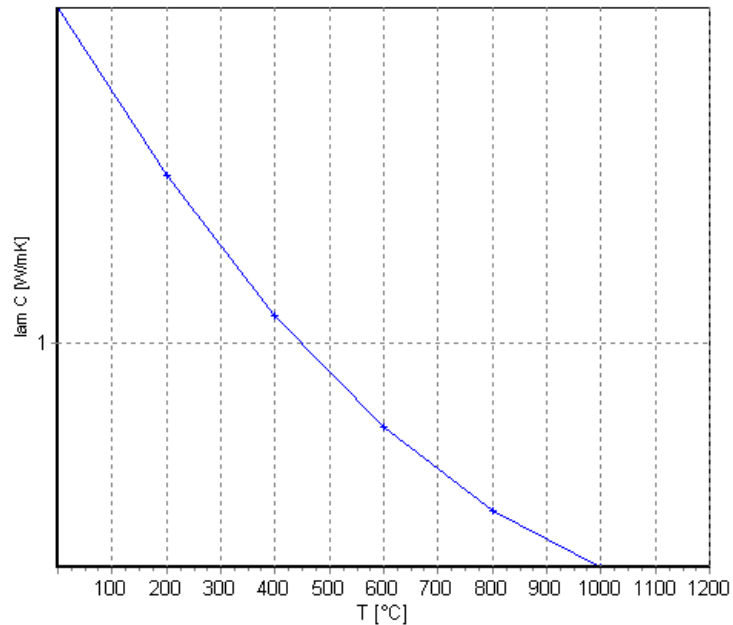


Figura 47 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

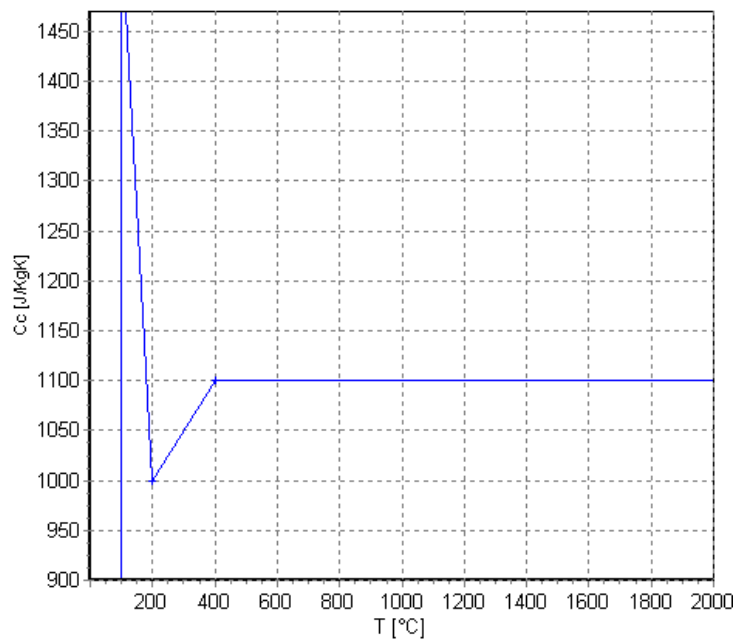


Figura 48 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

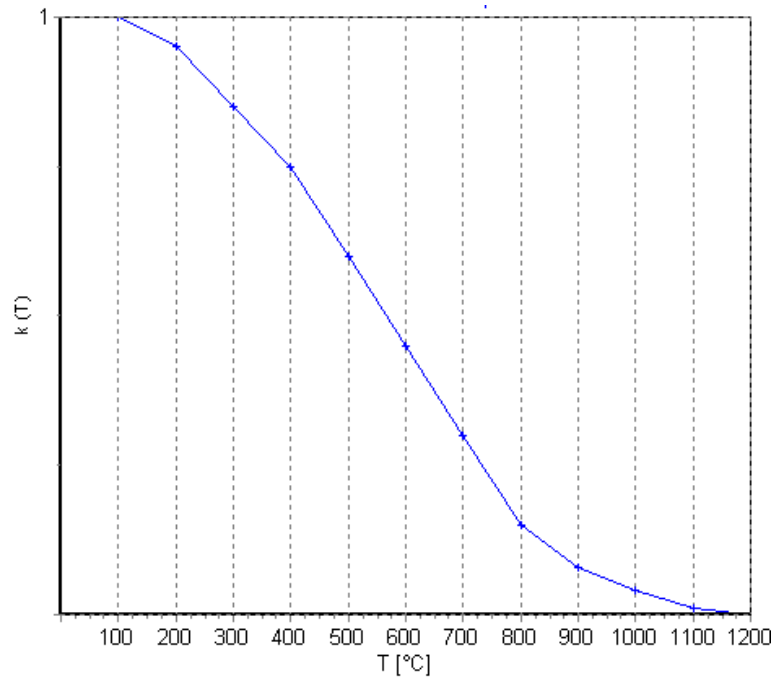


Figura 49 –Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{ck}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

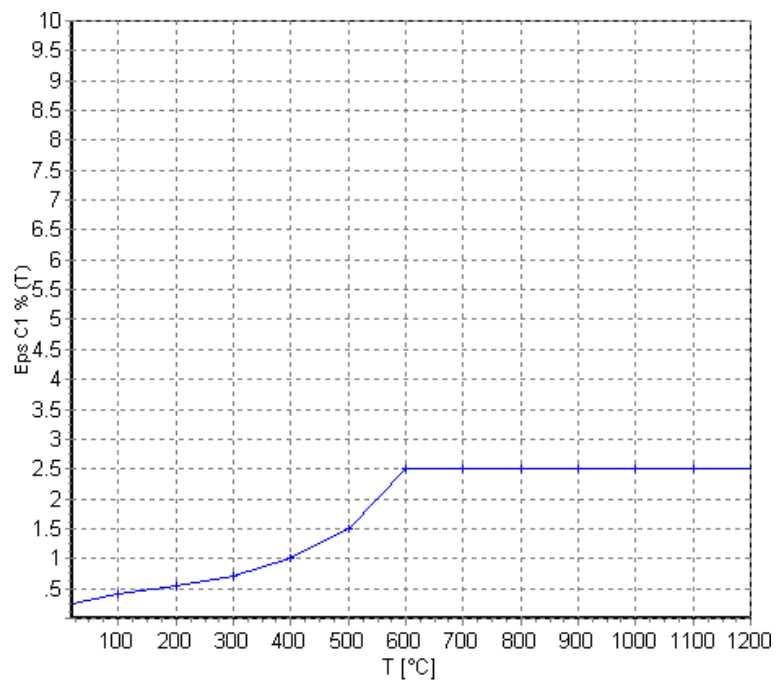


Figura 50 –Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{c1}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

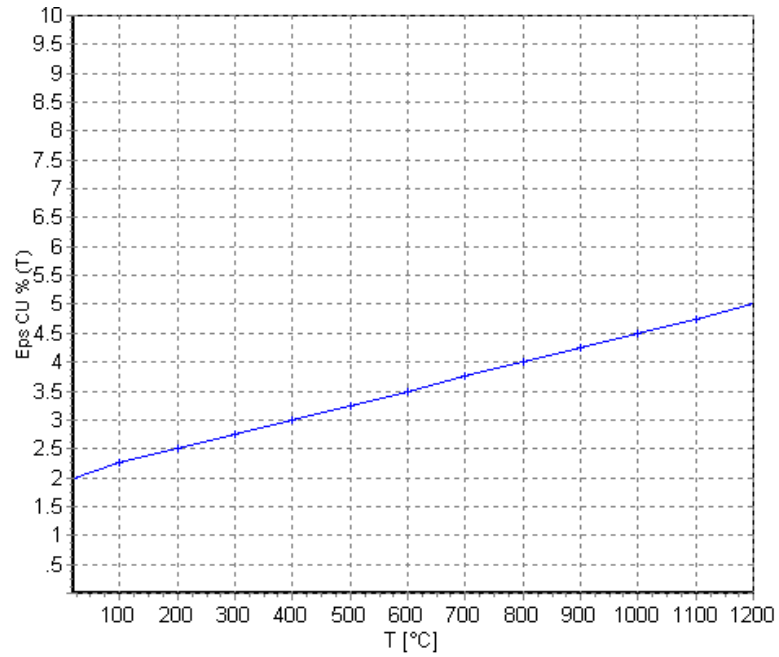


Figura 51 – Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{cu}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

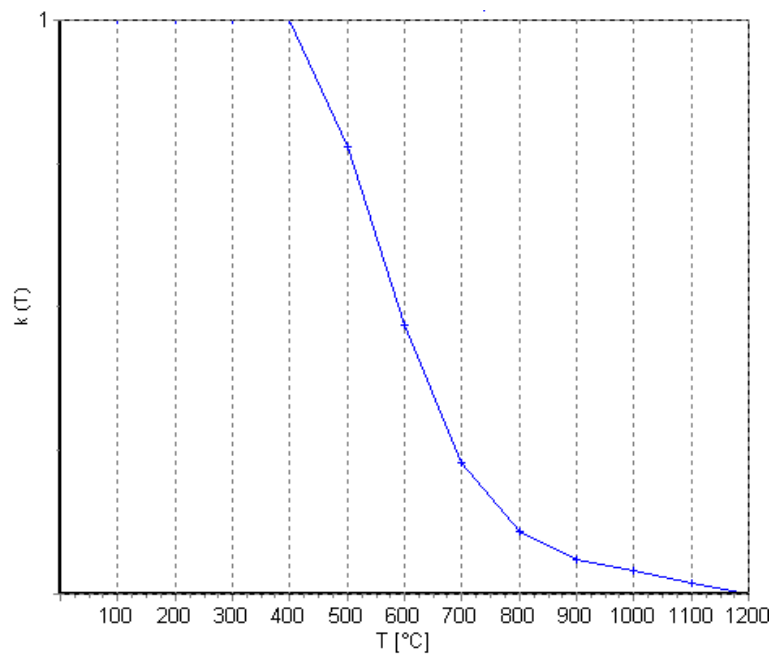


Figura 52 – Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{yk}$  per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)

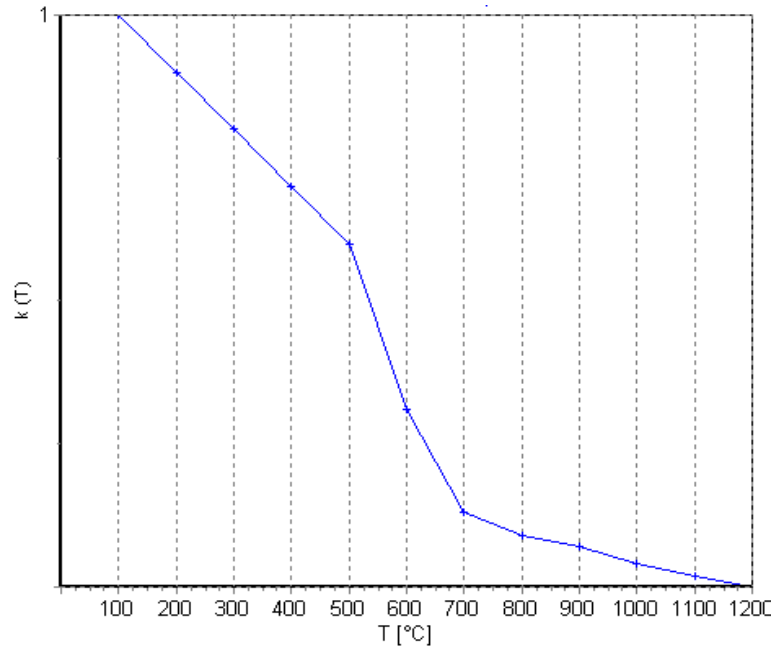
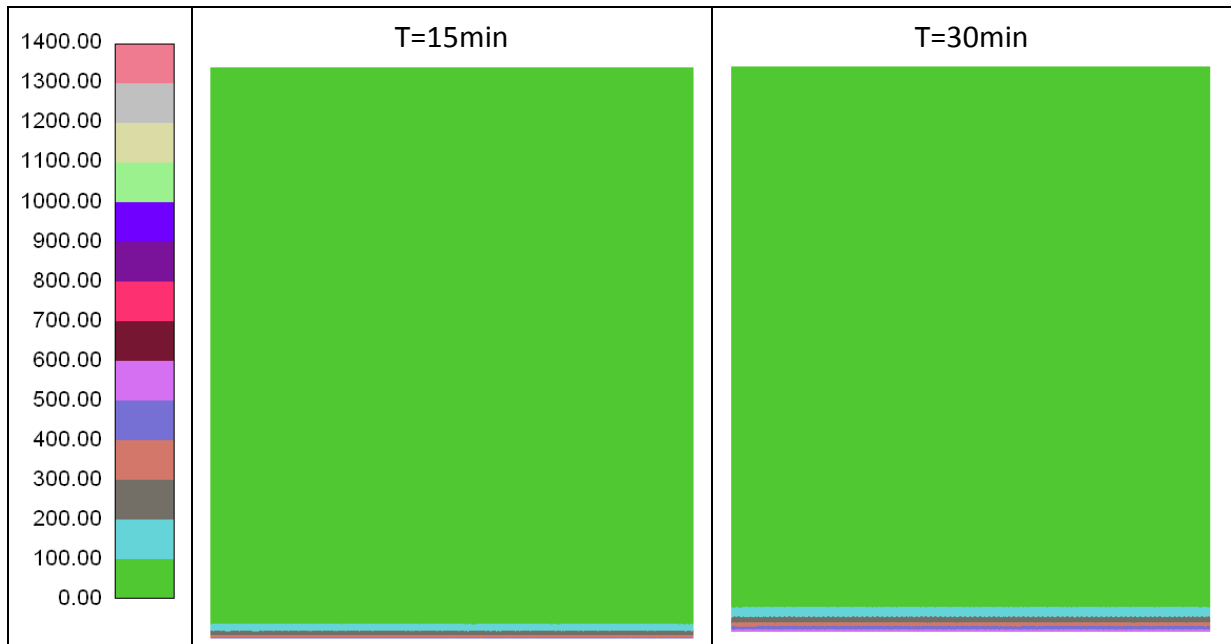


Figura 53 – Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d’armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)

#### 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.



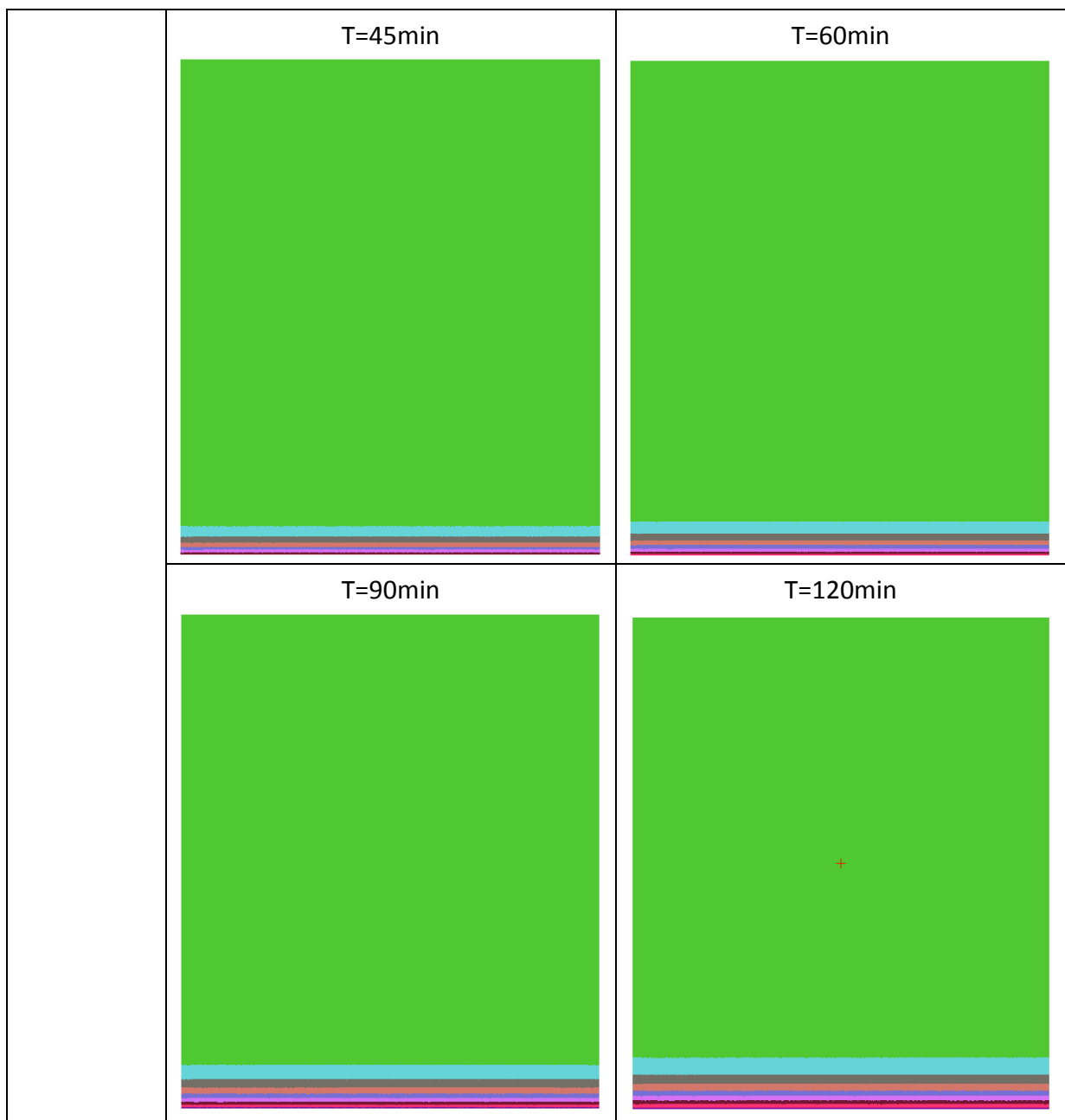


Figura 54 – Analisi termica – Modello 1 e Modello 2

### 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:

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

---

T	tempo trascorso [minuti]
N	azione assiale [kN]
M <sub>x</sub>	momento in direzione X [kNm]
M <sub>y</sub>	momento in direzione Y [kNm]
ε <sub>cls</sub>	deformazione del CLS
ε <sub>acc</sub>	deformazione dell'acciaio
FS	fattore di sicurezza nel dominio MN

T	N	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	ε <sub>cls</sub>	ε <sub>acc</sub>	FS
15	956.70	0.00	1754.59	0.003711	-0.044337	3.24
20	956.70	0.00	1754.59	0.003711	-0.044337	3.24
30	956.70	0.00	1754.59	0.003711	-0.044337	3.24
45	956.70	0.00	1754.59	0.003711	-0.044337	3.24
60	956.70	0.00	1754.59	0.003709	-0.044310	3.24
90	956.70	0.00	1754.59	0.003708	-0.044292	3.24
120	956.70	0.00	1754.59	0.003698	-0.044152	3.24

Tabella 32 – Analisi al fuoco – Modello 1

T	N	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	ε <sub>cls</sub>	ε <sub>acc</sub>	FS
15	820.20	0.00	1921.63	0.003698	-0.043554	2.60
20	820.20	0.00	1921.63	0.003698	-0.043554	2.60
30	820.20	0.00	1921.63	0.003698	-0.043554	2.60
45	820.20	0.00	1921.63	0.003698	-0.043554	2.60
60	820.20	0.00	1921.63	0.003694	-0.043497	2.60
90	820.20	0.00	1921.63	0.003702	-0.043613	2.60
120	820.20	0.00	1921.63	0.003702	-0.043613	2.60

Tabella 33 – Analisi al fuoco – Modello 2

### 13 CONCLUSIONI

Nella presente Relazione di Calcolo si sono analizzate le gallerie artificiali agli imbocchi della galleria “Cogollo”, 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 28 e Figura 37 e controllando poi i valori ottenuti per alcune sezioni rappresentative e presenti in Tabella 11 e Tabella 24. In particolare:

- per quanto riguarda l’azione assiale, la struttura è caricata mediamente da 8m di ritombamento ( $22\text{kN/m}^3$ ), a cui si somma il peso proprio del rivestimento (spessore minimo 1.2m); il carico distribuito risulta pari a 206kPa. Considerando la luce del portale pari a circa 14m, su entrambe le pareti si scaricano circa 1450kN, comparabili con 1900kN circa ottenuti nel primo modello e 1300kN 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)	1.2	[m]
$F_c$ (area della sezione)	1.2	[m <sup>2</sup> ]
$J_c$ (momento d'inerzia della sezione)	0.144	[m <sup>4</sup> ]
f (freccia)	4.5	[m]
l (luce dell'arco)	14	[m]
$v$ ( $45/4 * J_c / (F_c * f^2)$ )	0.067	[-]
$M_c$ calotta ( $p * l^2 / 24 * v / (1+v)$ )	-105	[kNm/m]
$M_A$ rene ( $-p * l^2 / 12 * v / (1+v)$ )	210	[kNm/m]

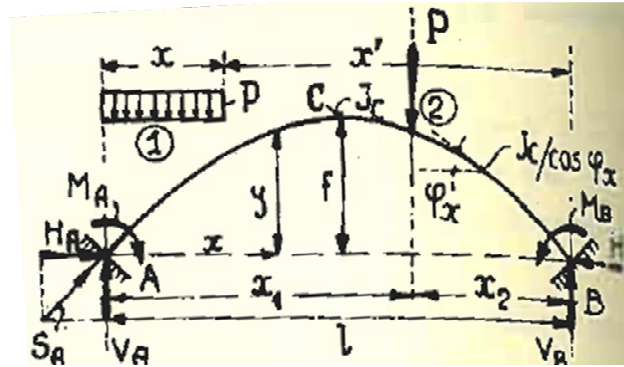


Figura 55 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato”

I valori ottenuti risultano correttamente inferiori di quanto trovato nella simulazione Flac, in quanto nel primo modello  $M_C = -384 \text{ kNm/m}$  e  $M_A = 911 \text{ kNm/m}$  e nel secondo modello  $M_C = -570 \text{ kNm/m}$  e  $M_A = 1329 \text{ kNm/m}$ .

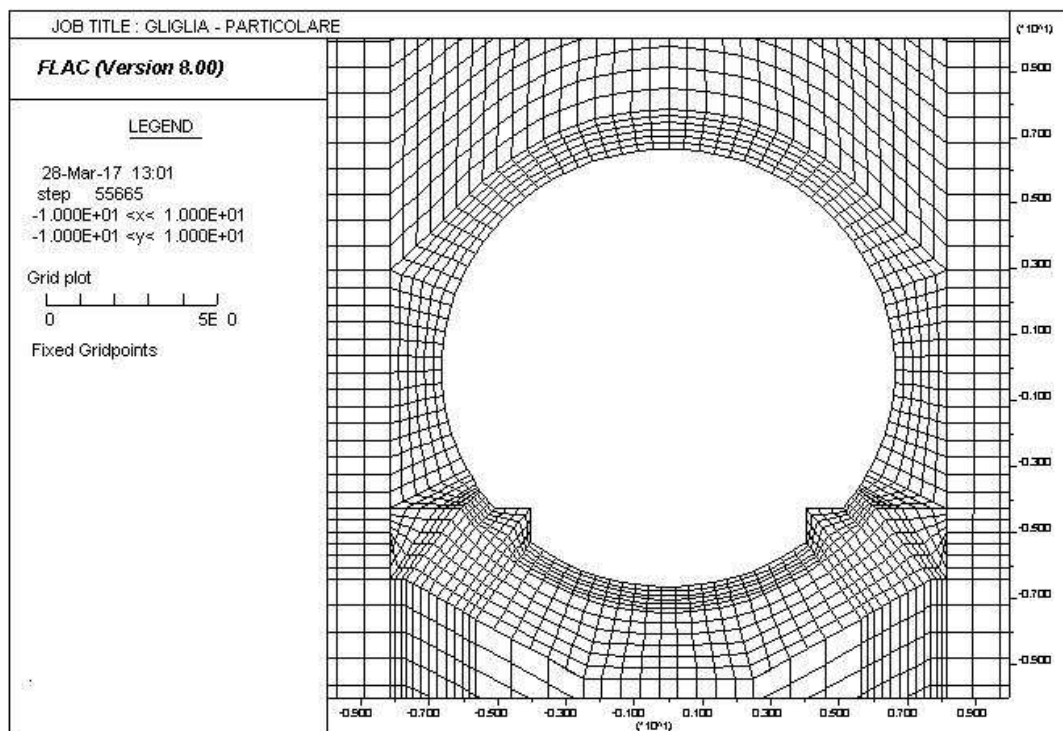
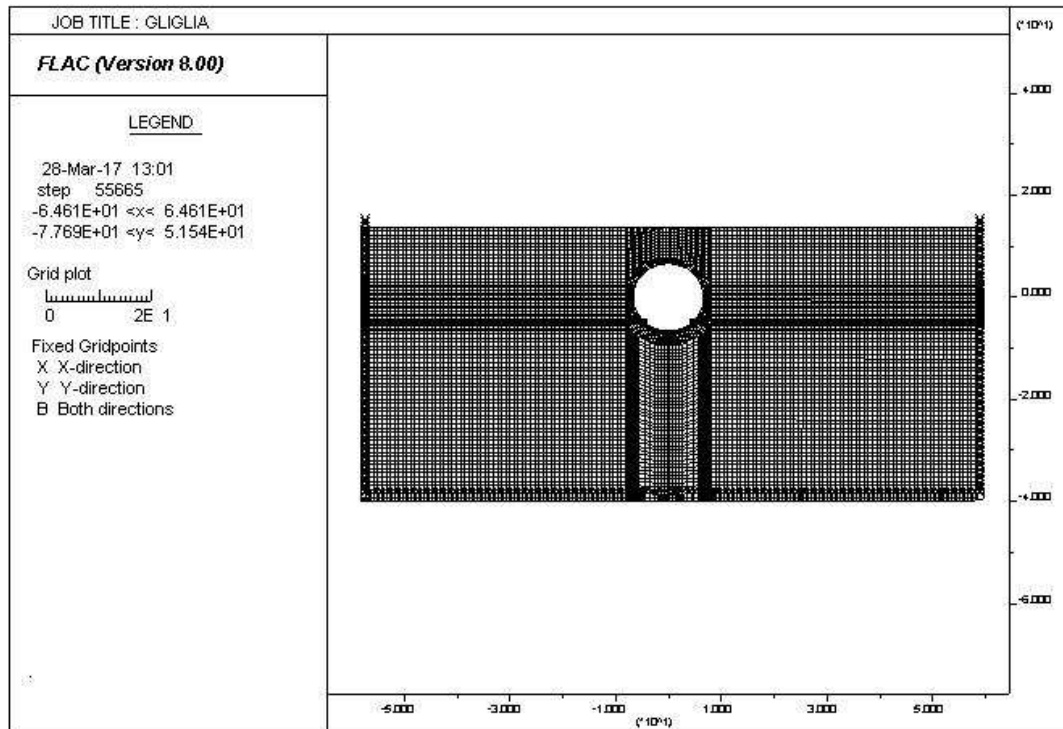
Come limite superiore, si considera il caso di trave doppiamente incastrata che prevede momento in mezzeria  $M_C$  pari a  $p \cdot l^2 / 24 = 1682 \text{ kNm/m}$  e momento all’incastro  $M_A$  pari a  $p \cdot l^2 / 12 = 3365 \text{ kNm/m}$ . I valori ottenuti dall’analisi bidimensionale sono significativamente 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.

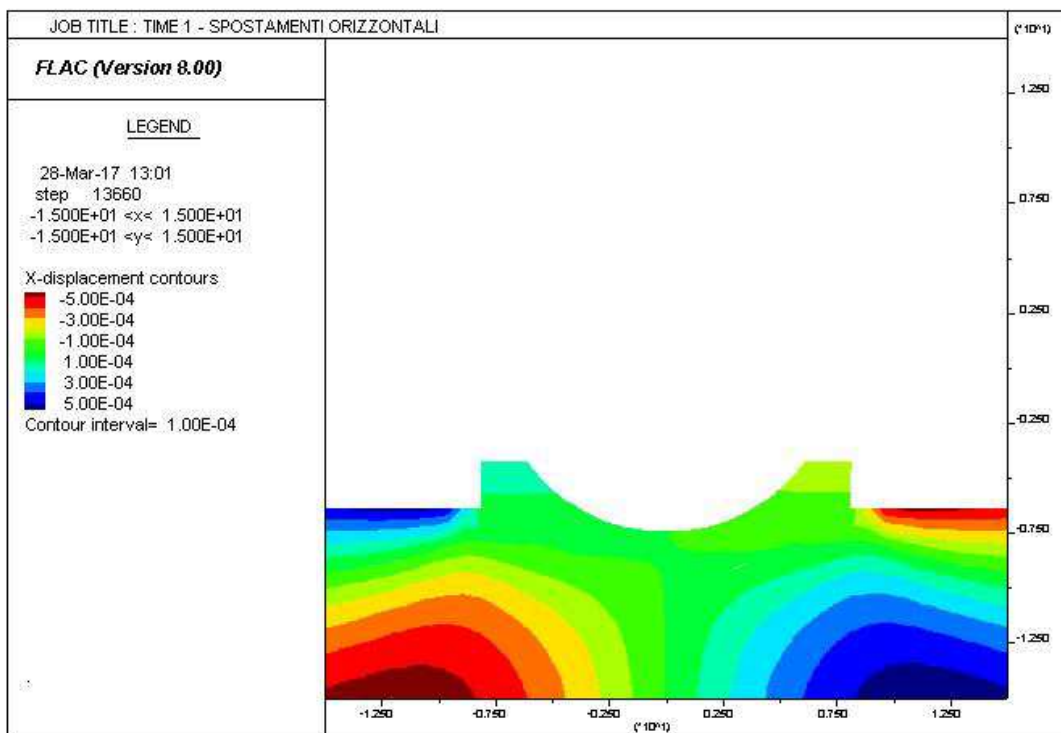
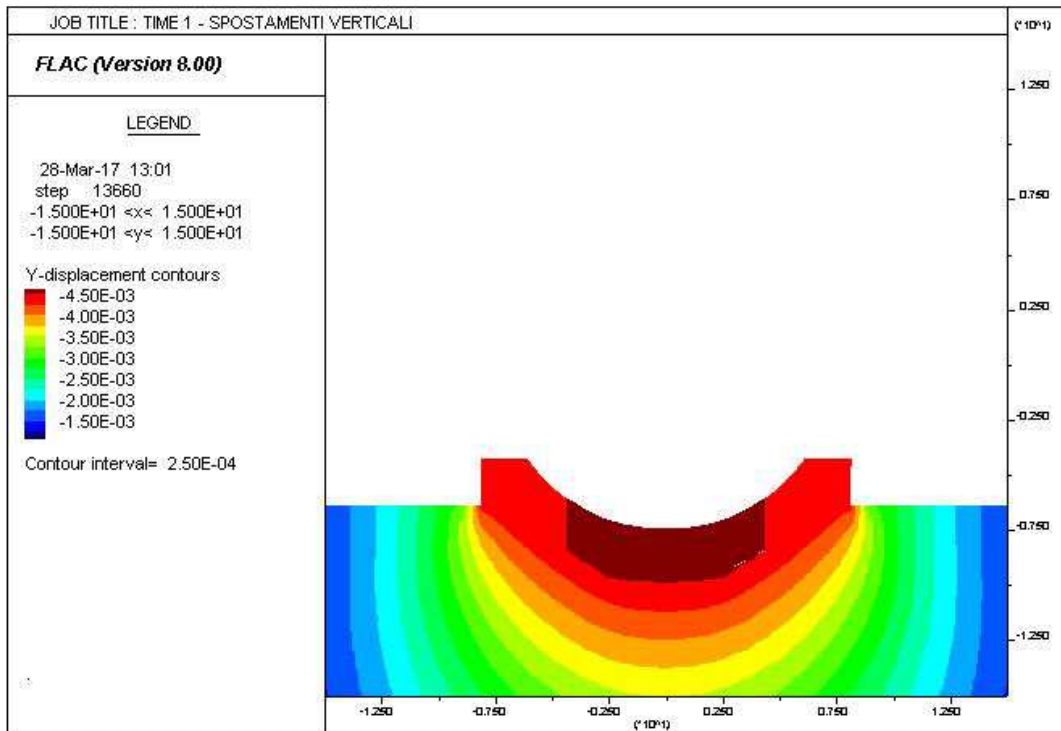


## 14 ALLEGATI

### 14.1 MODELLO 1 – GA con sella

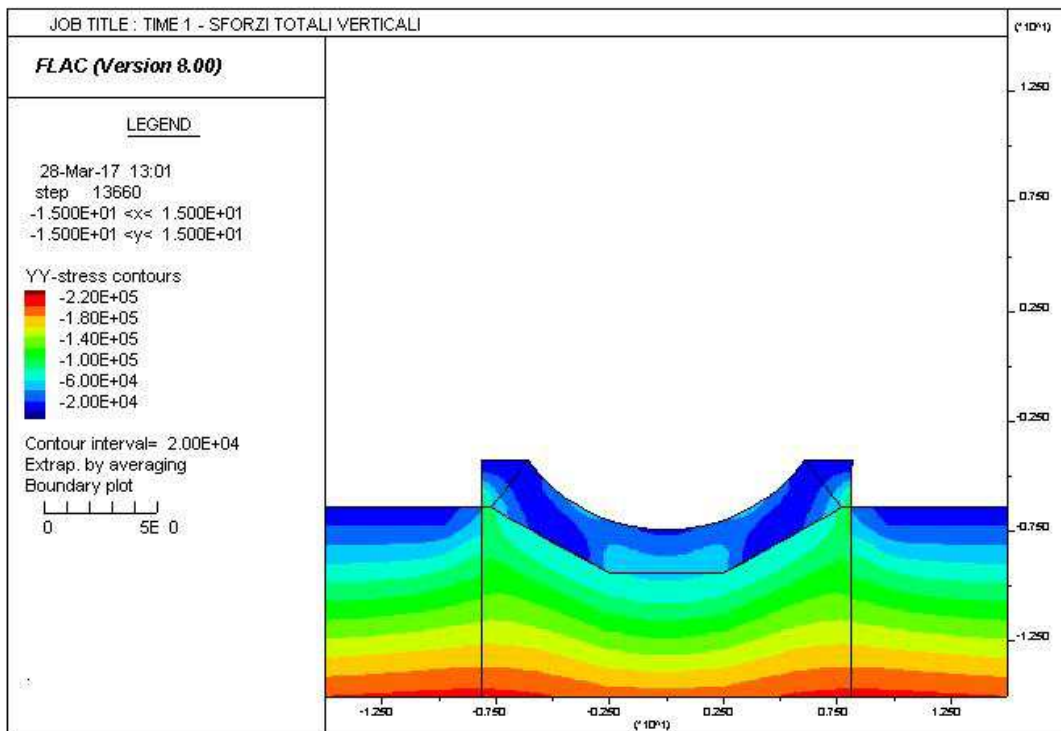
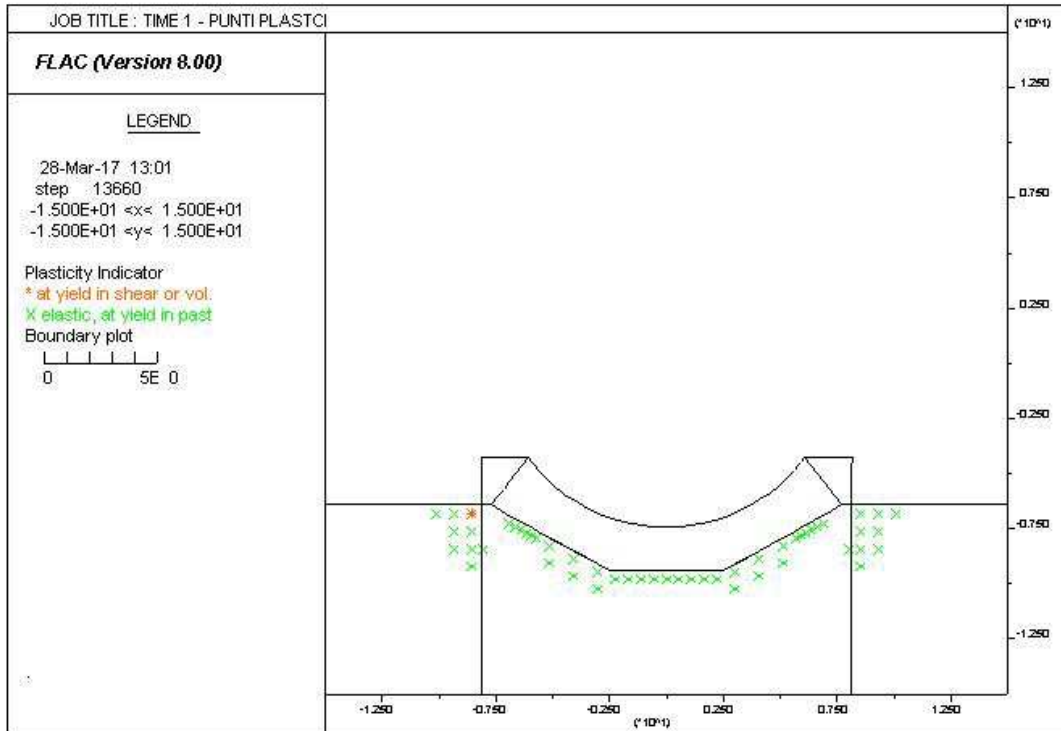


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



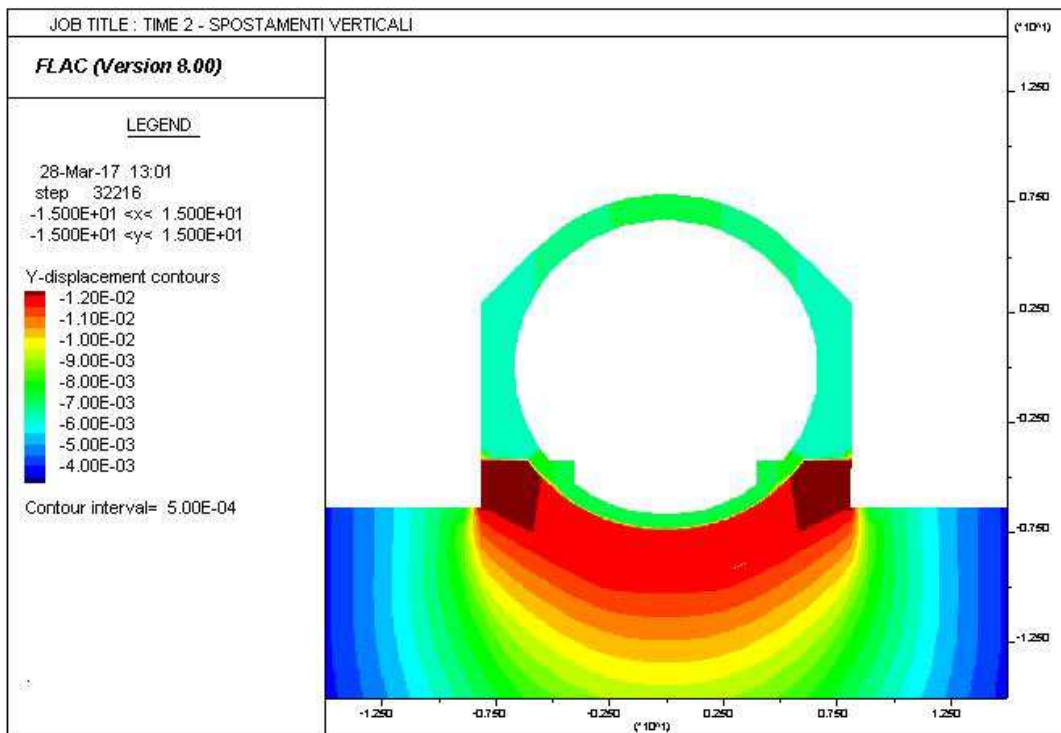
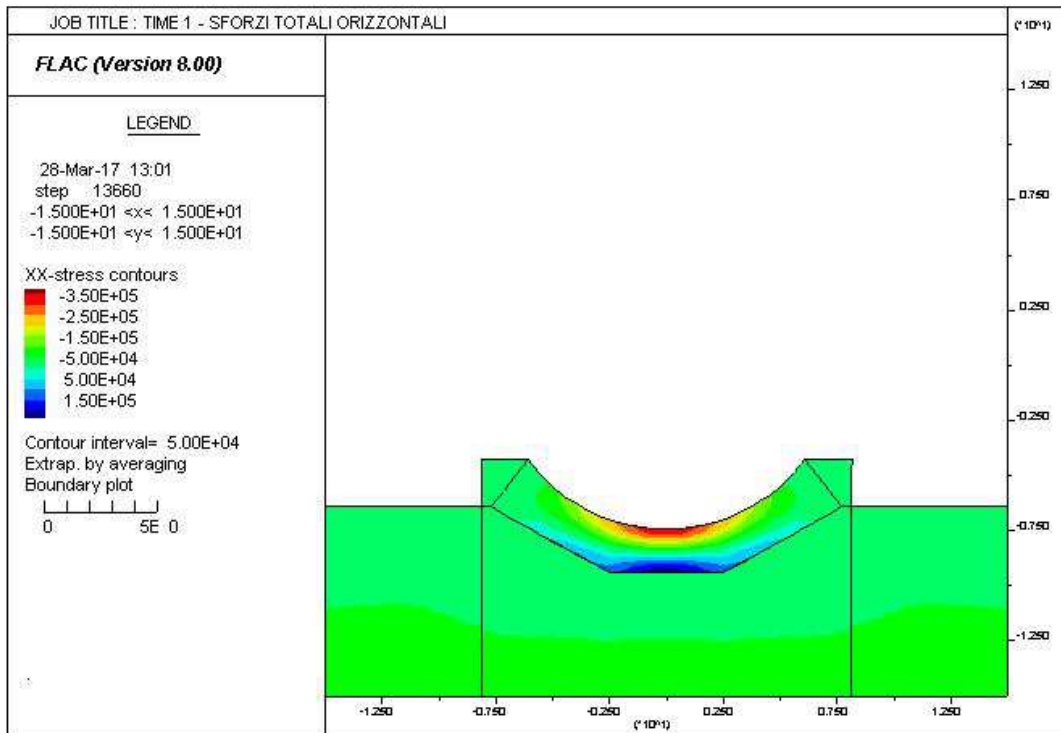
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---



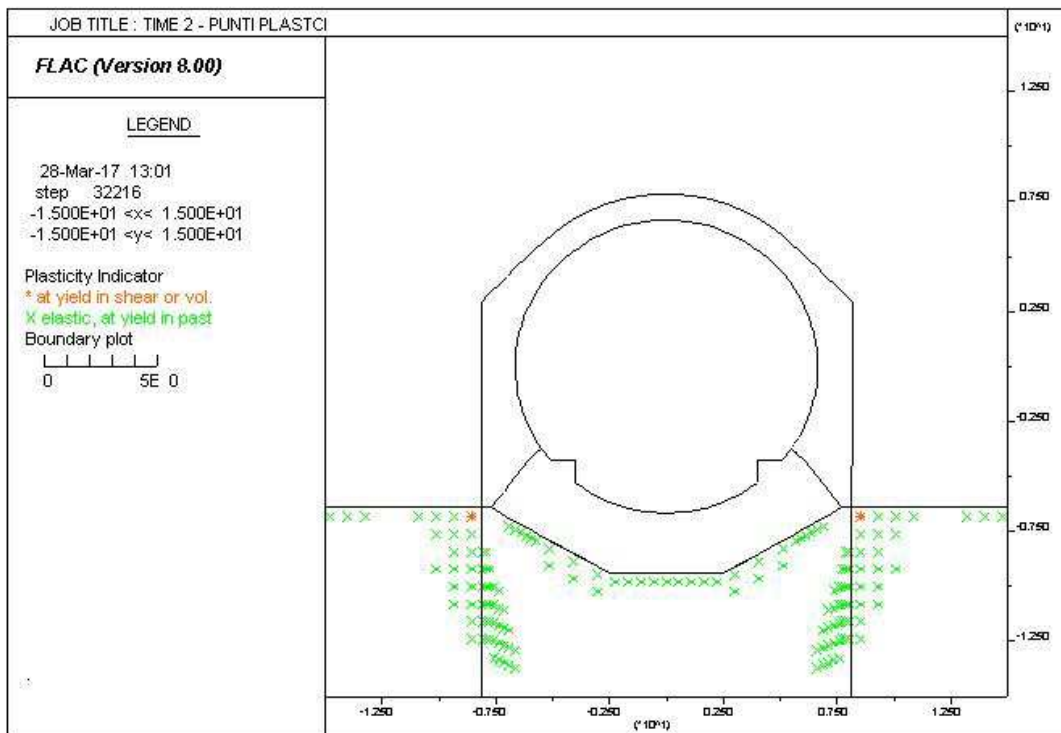
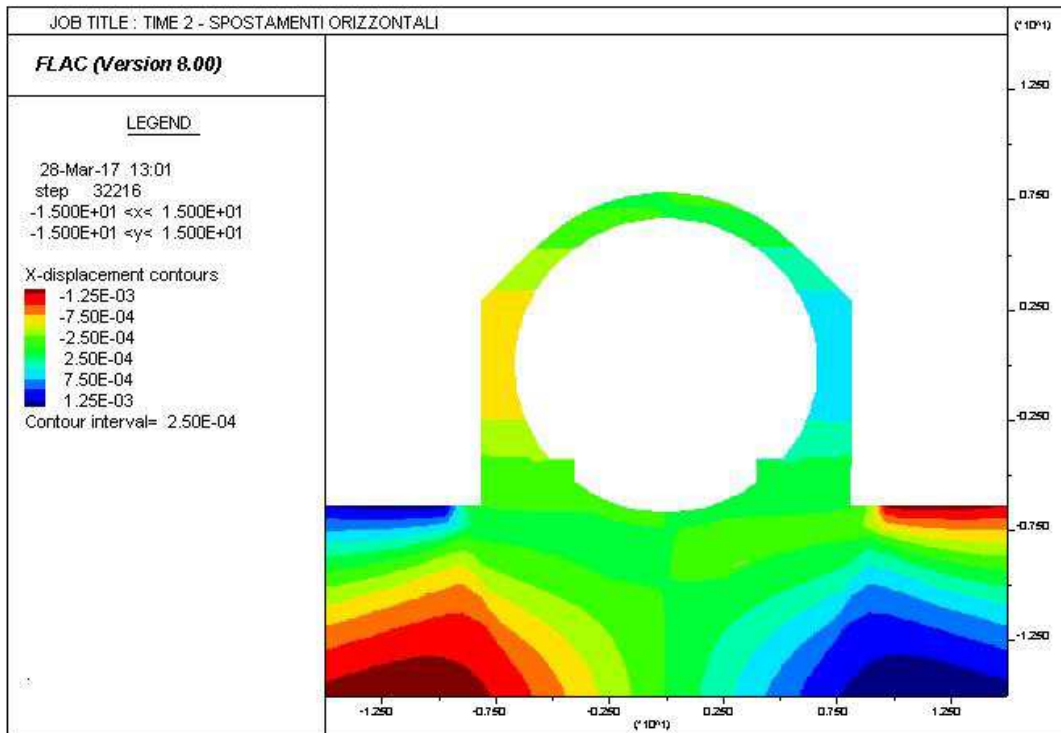
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

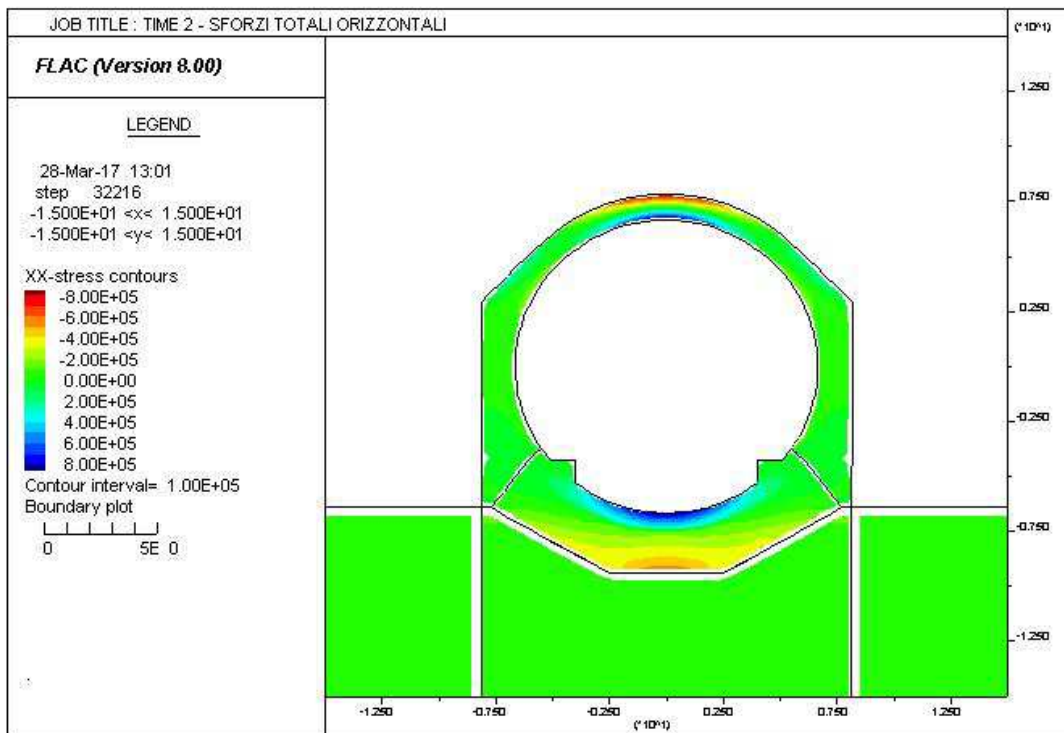
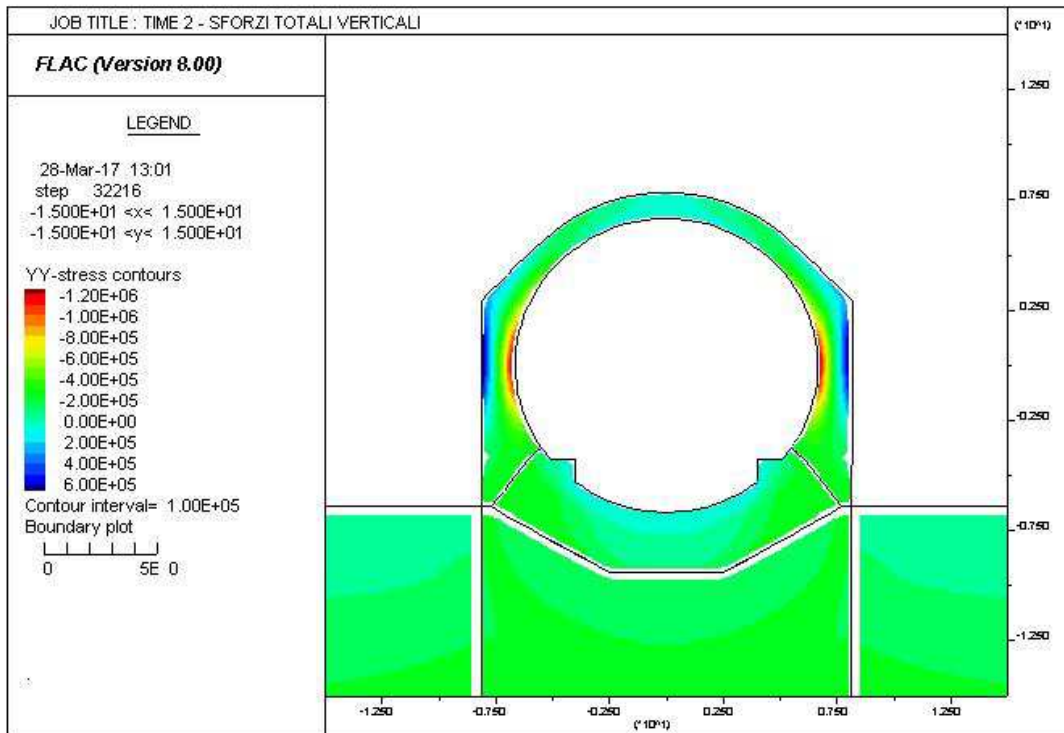


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

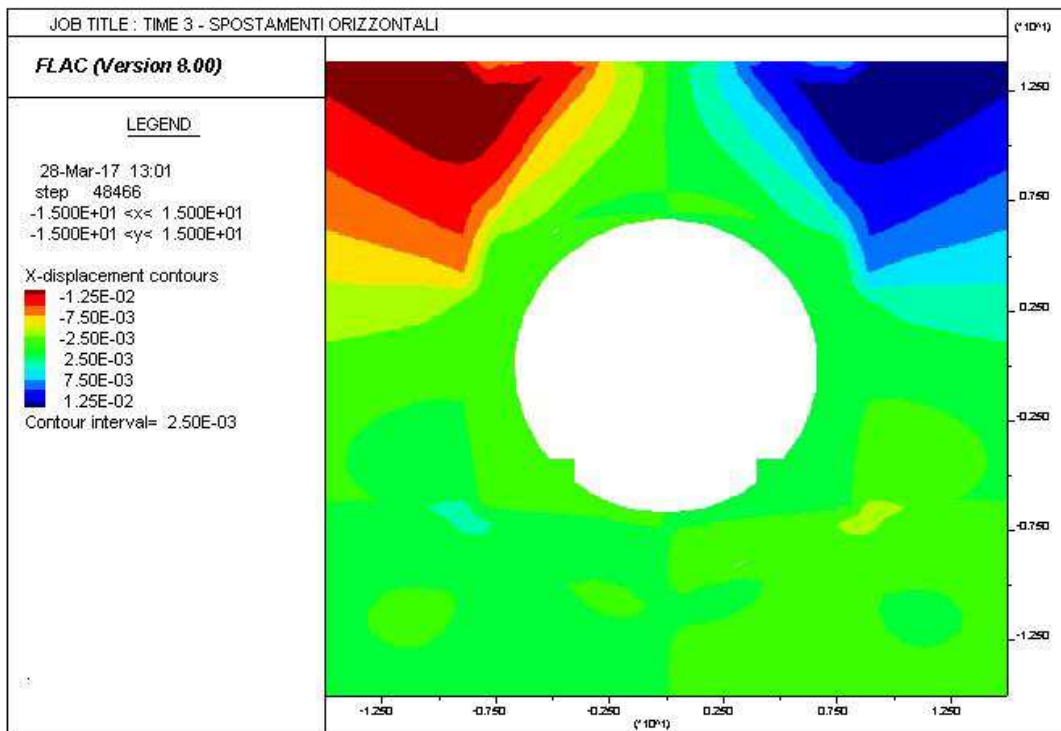
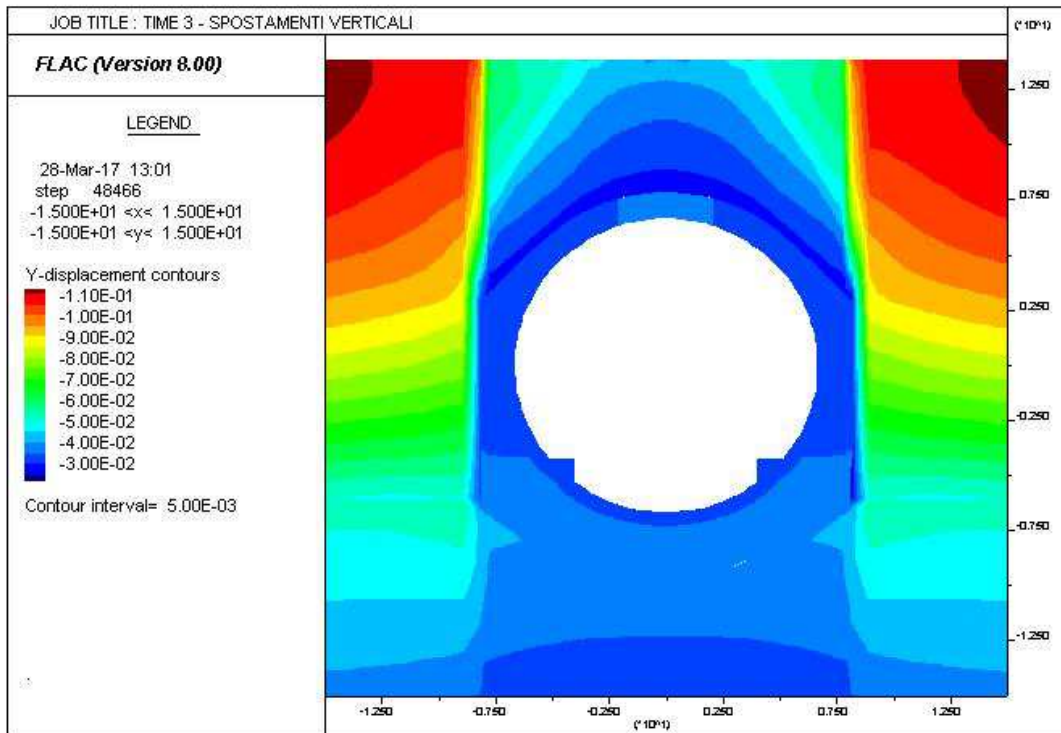
---



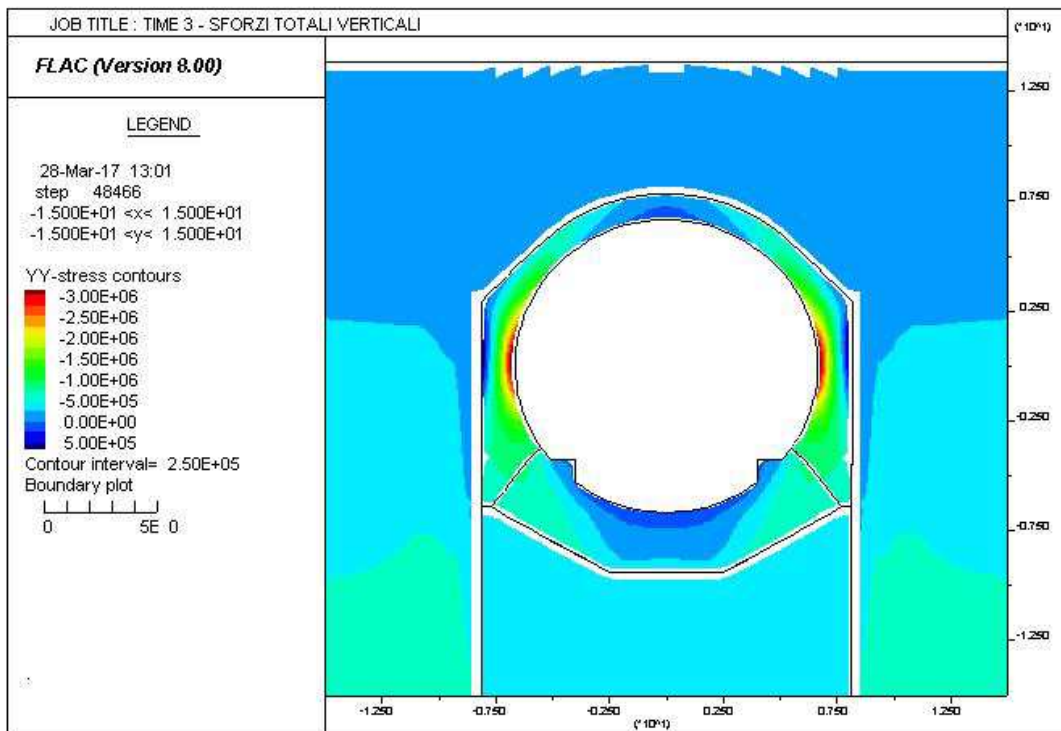
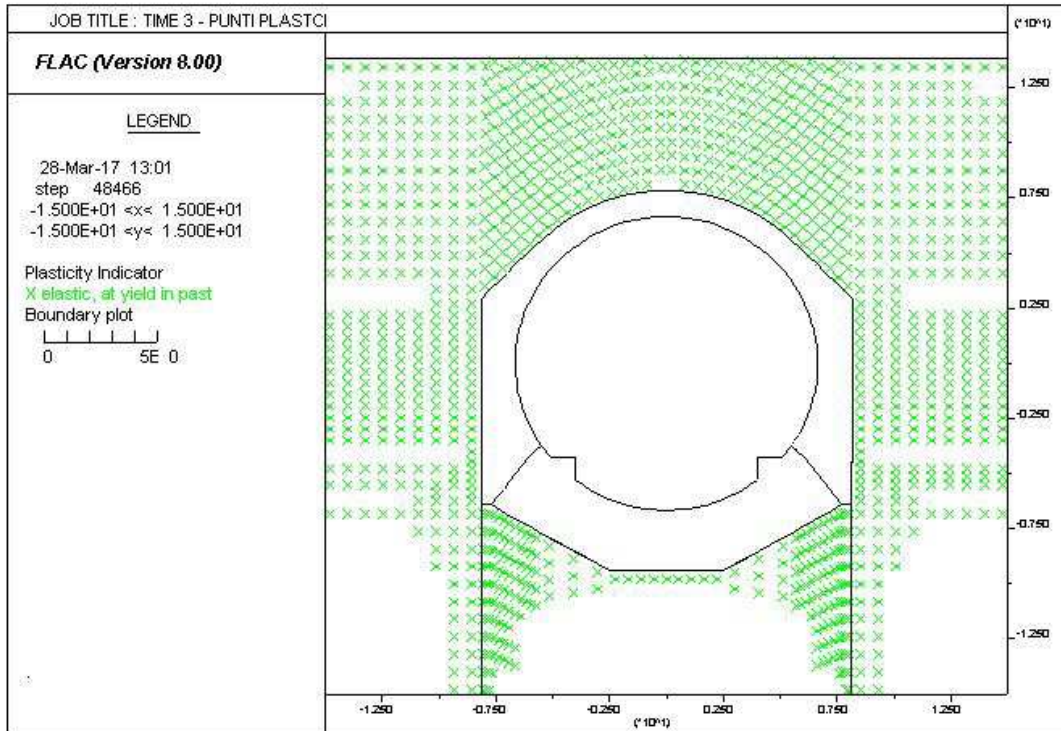
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



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

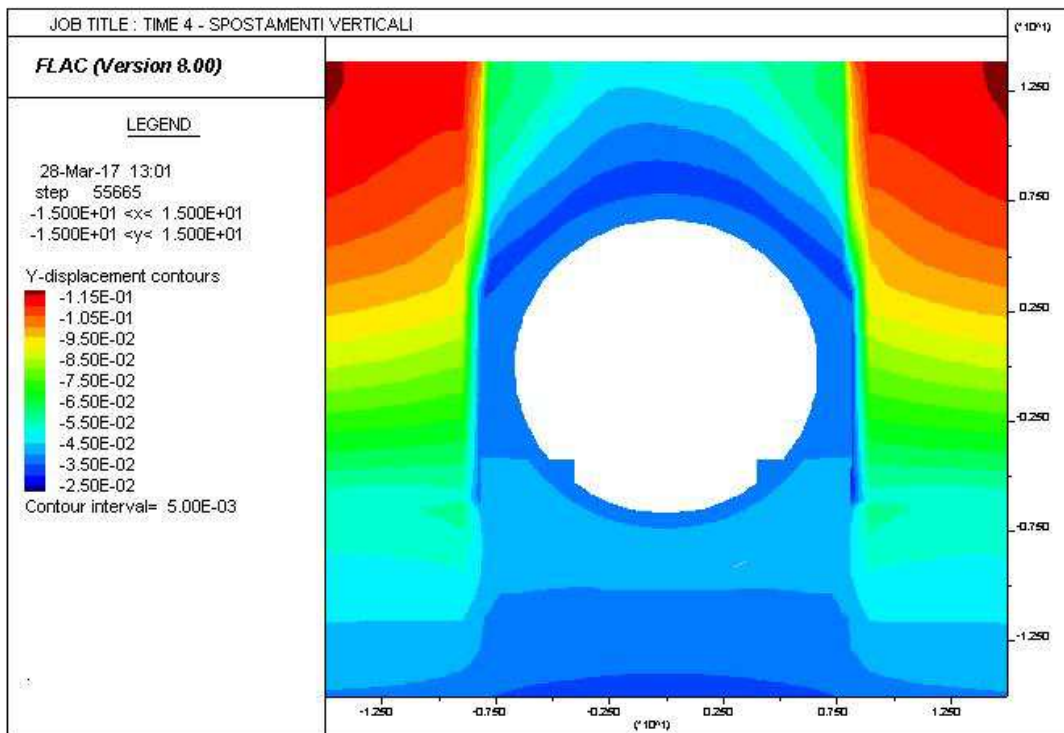
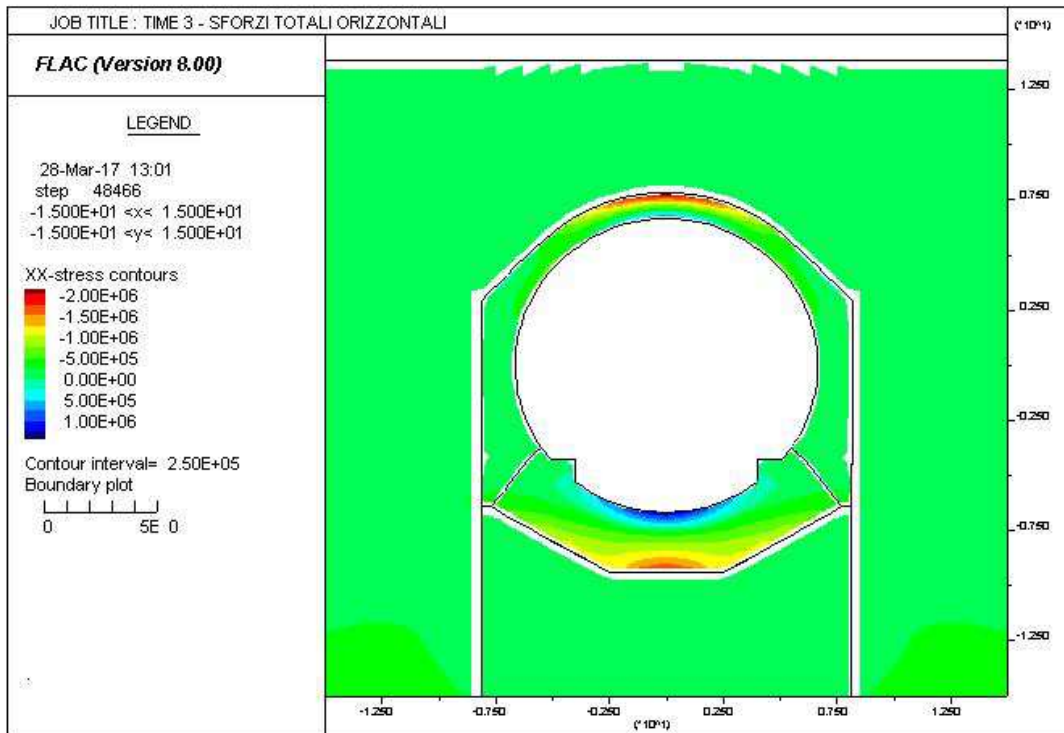


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

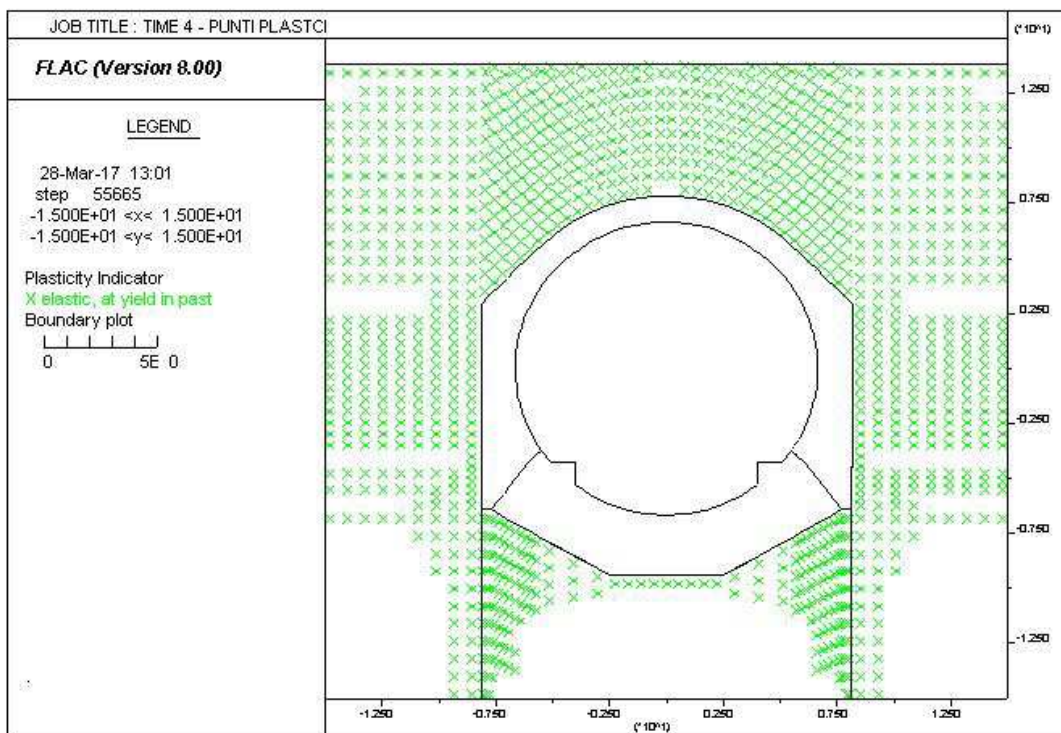
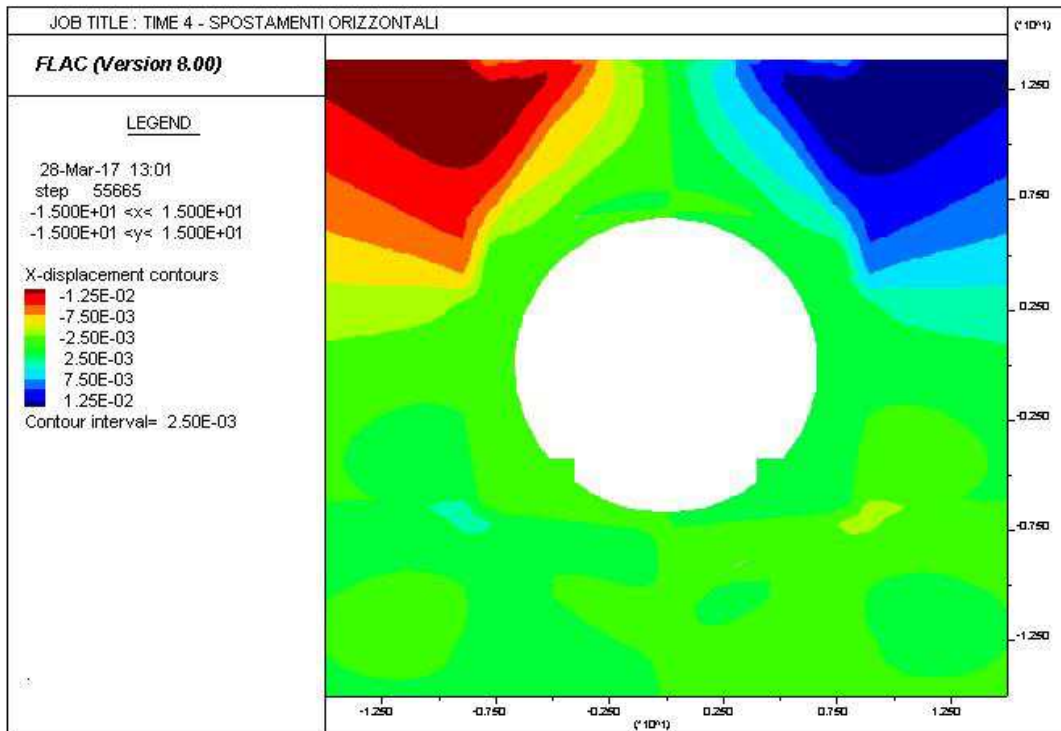




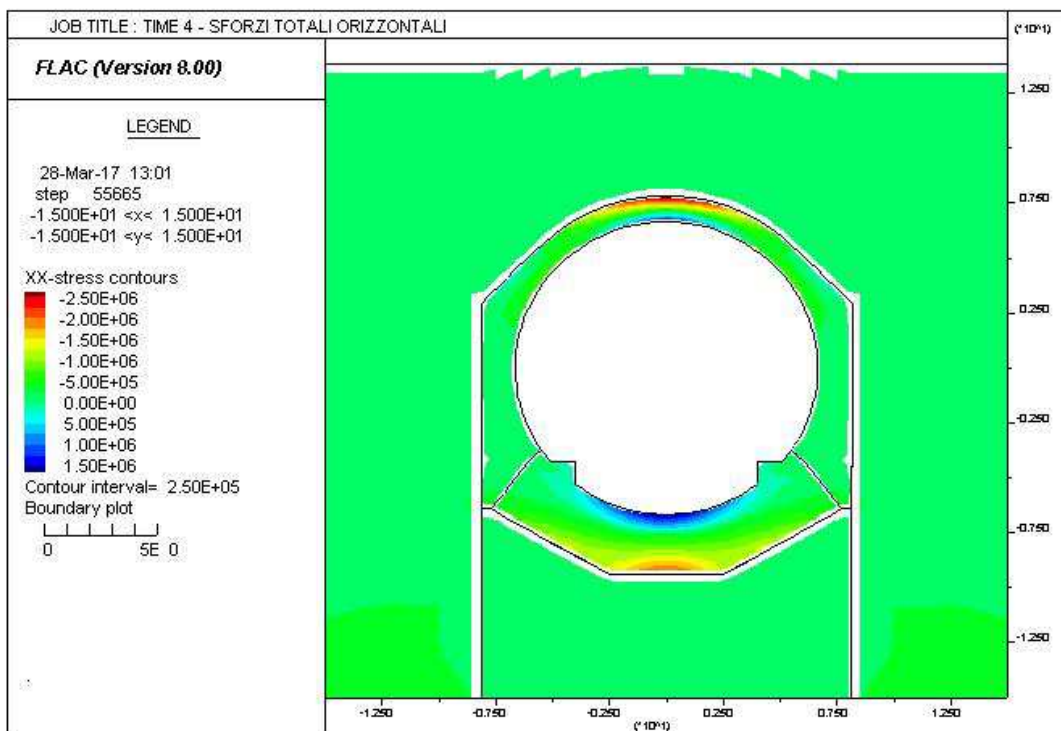
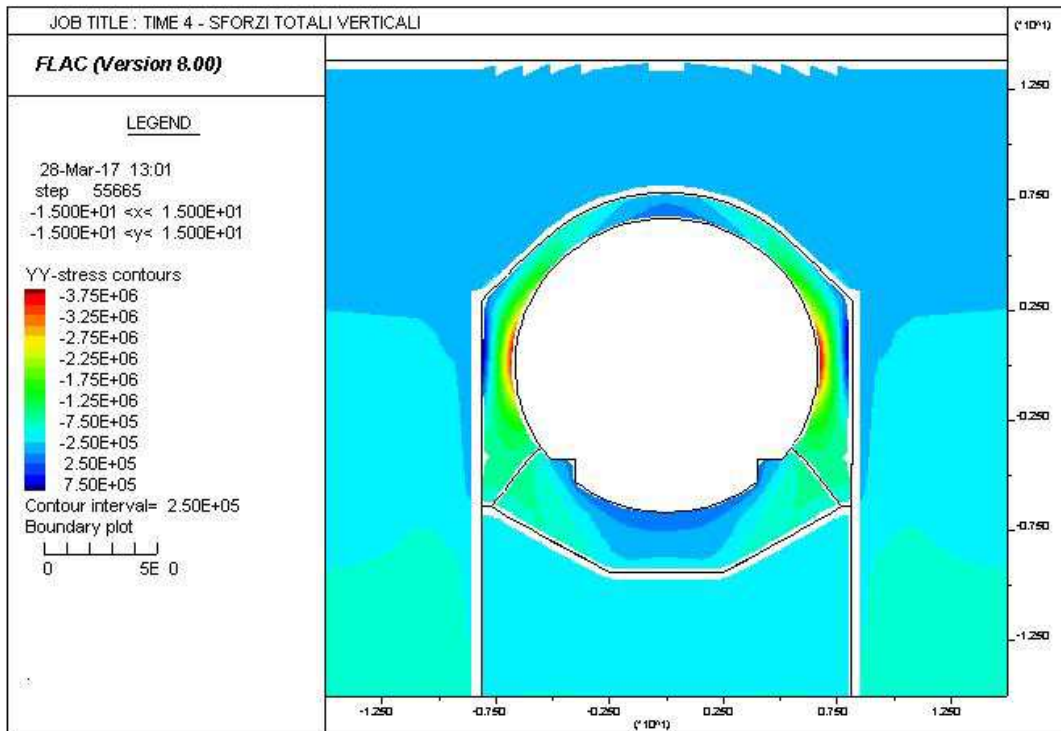
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



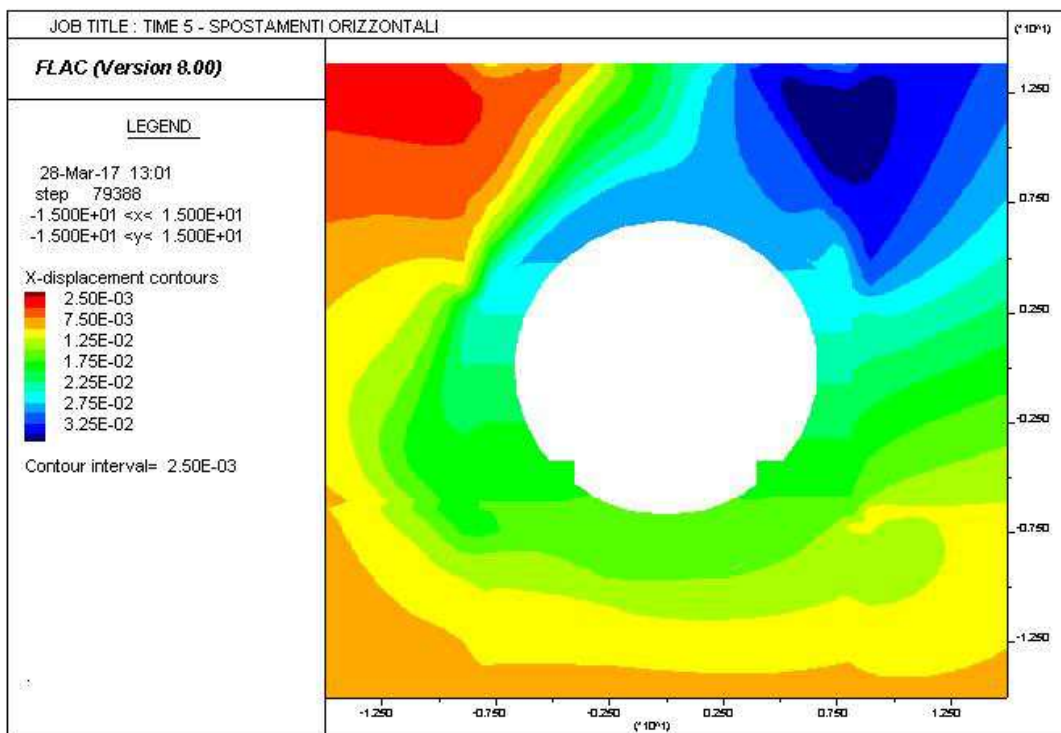
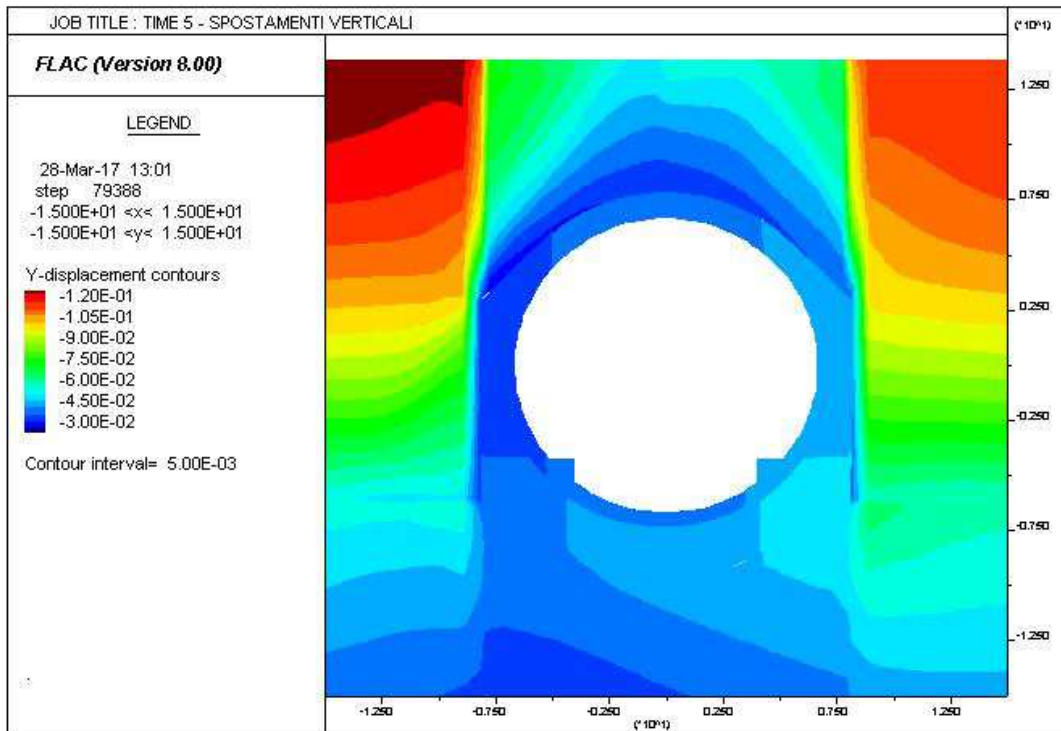
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



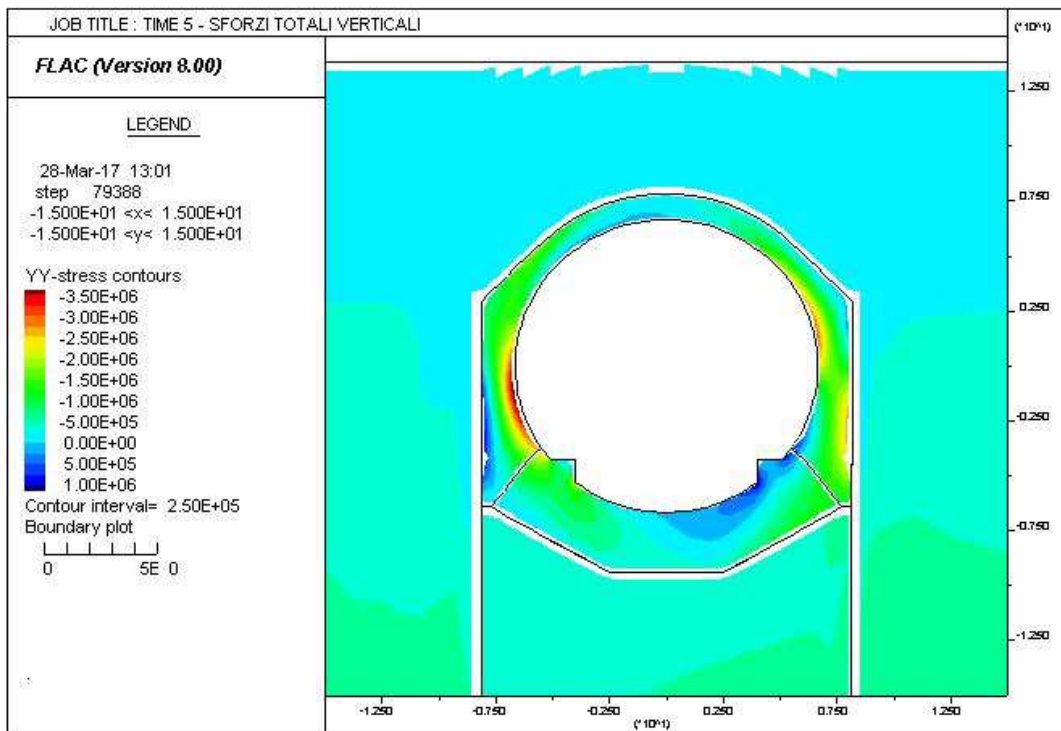
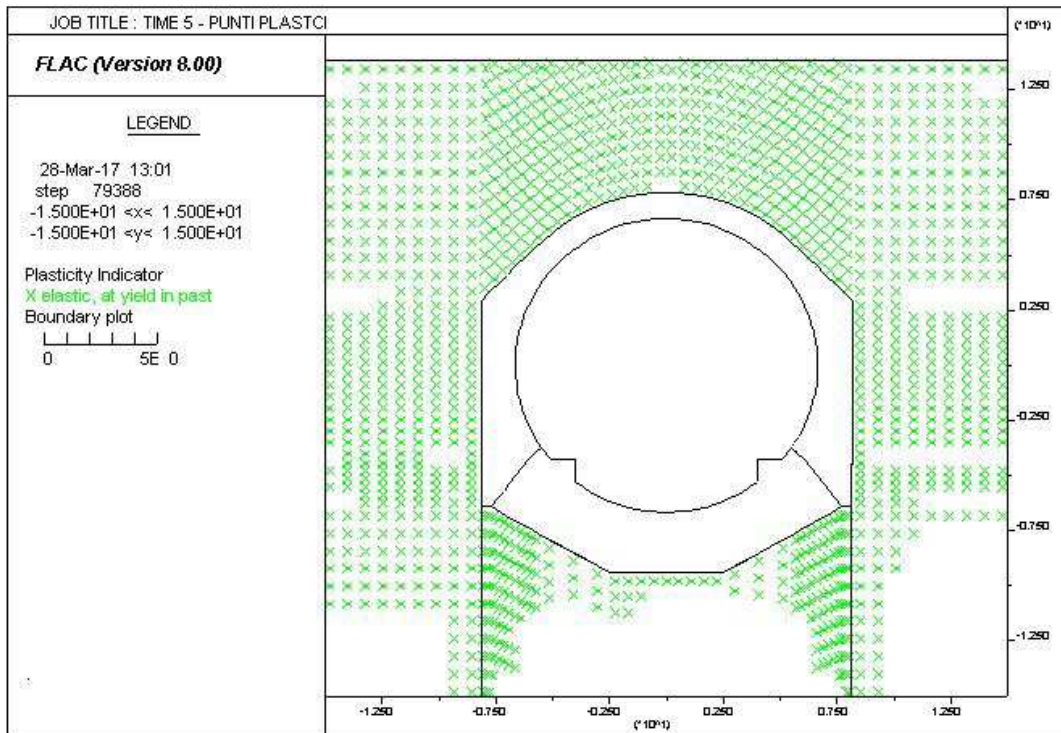
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



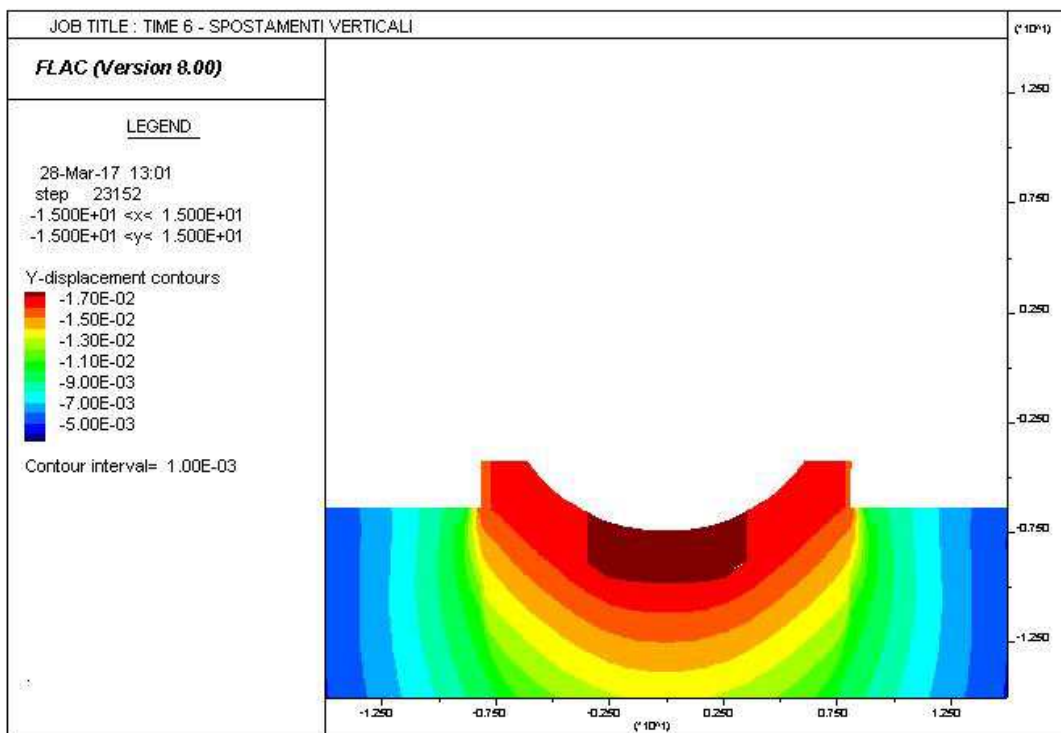
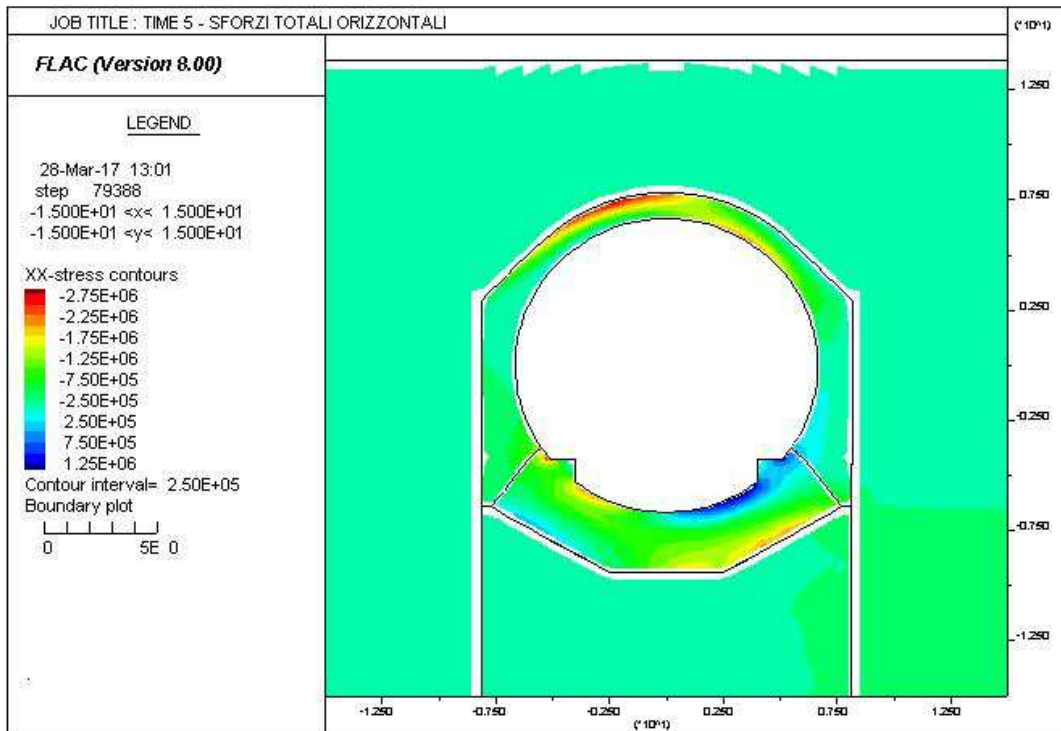
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



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

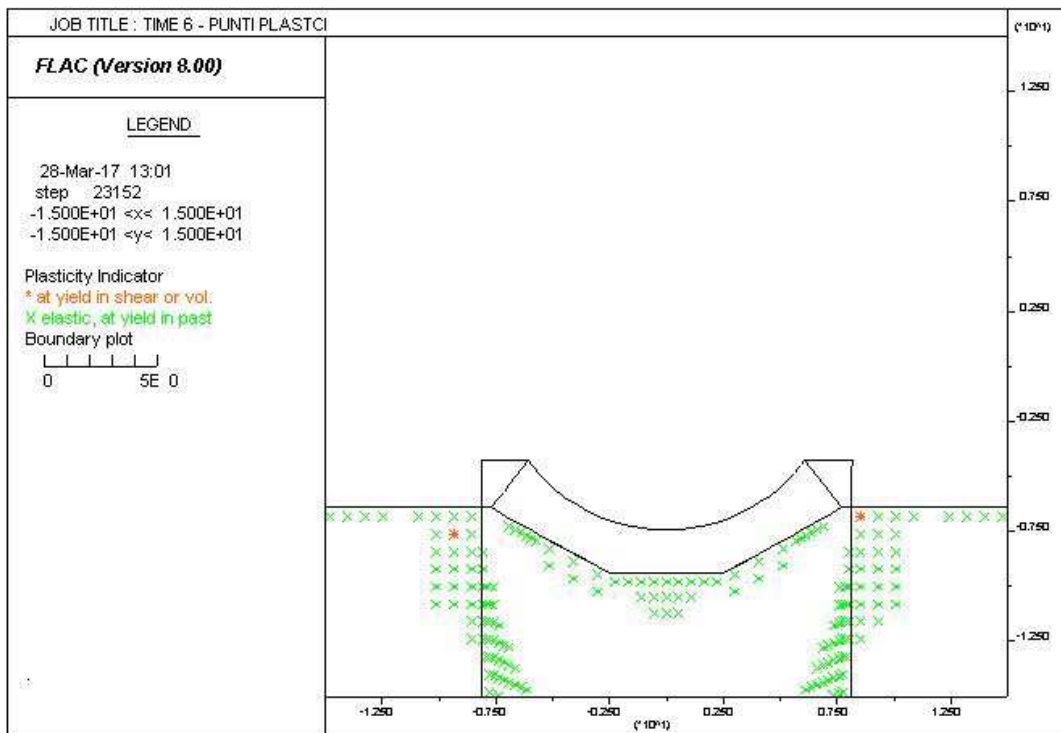
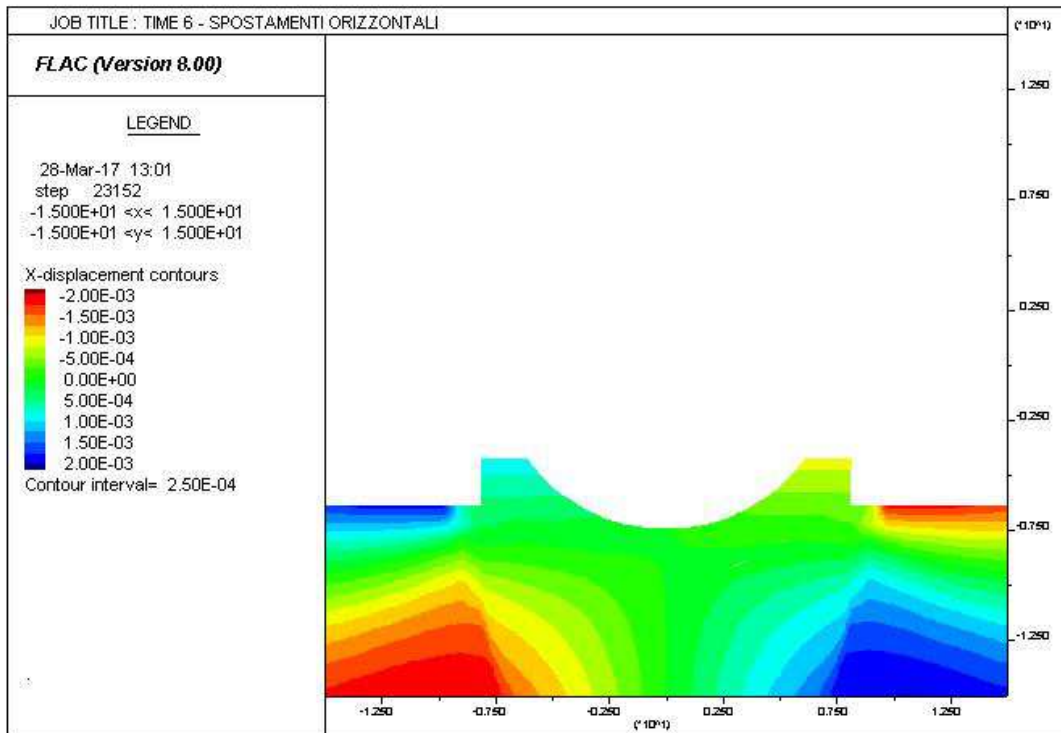


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



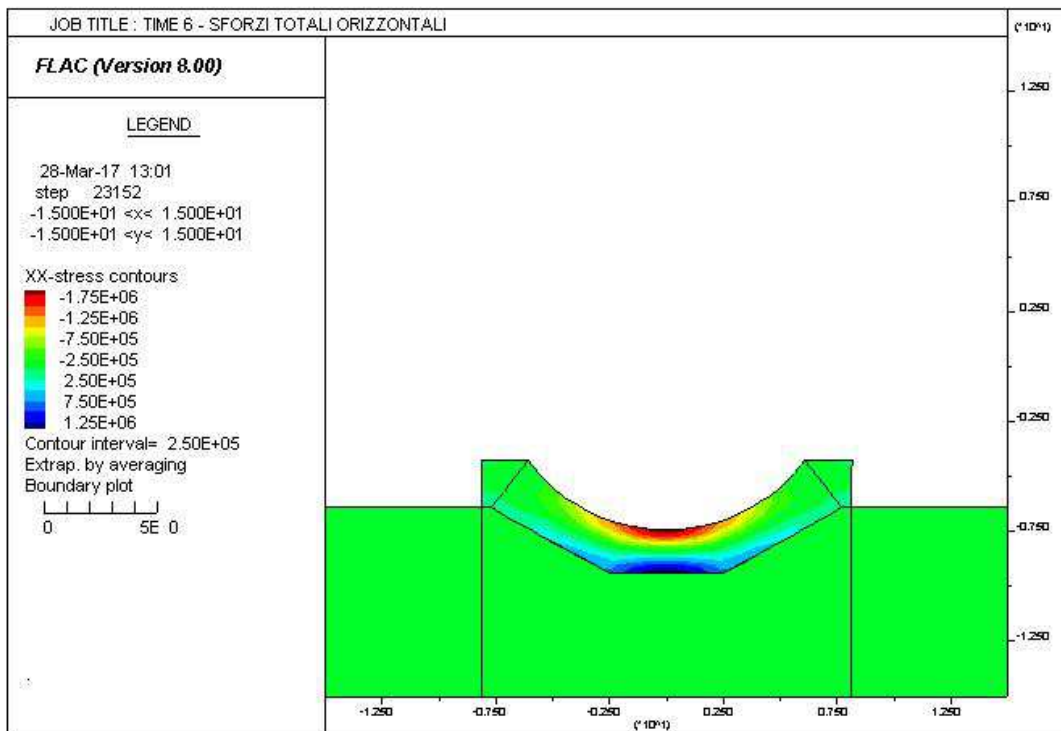
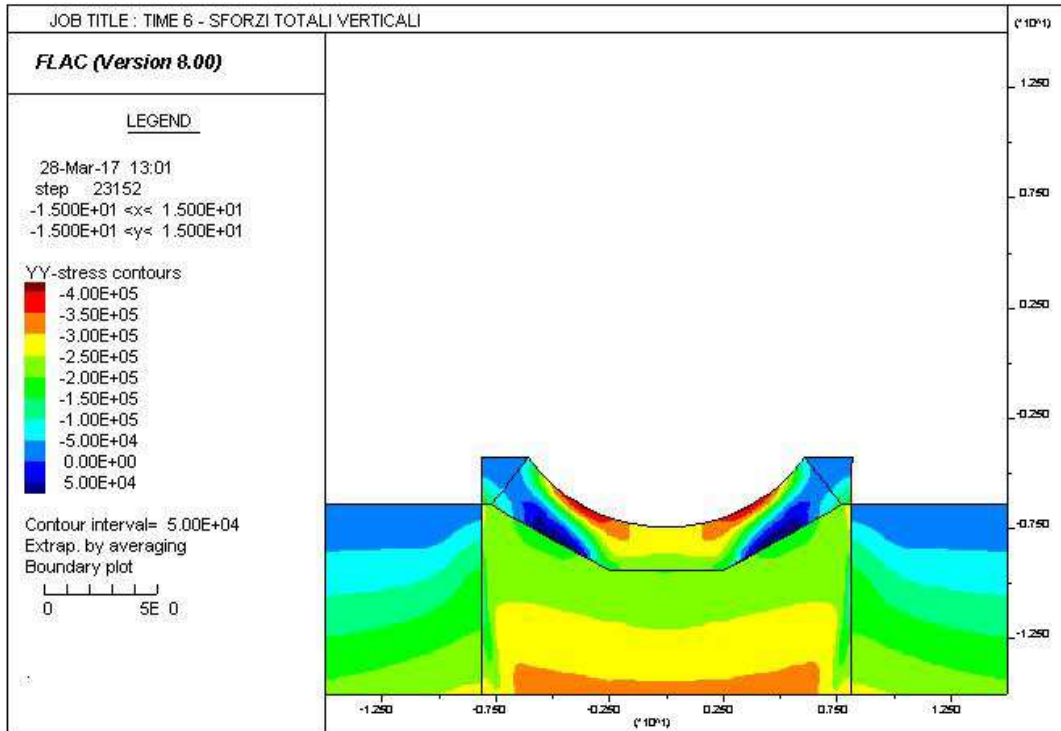
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---



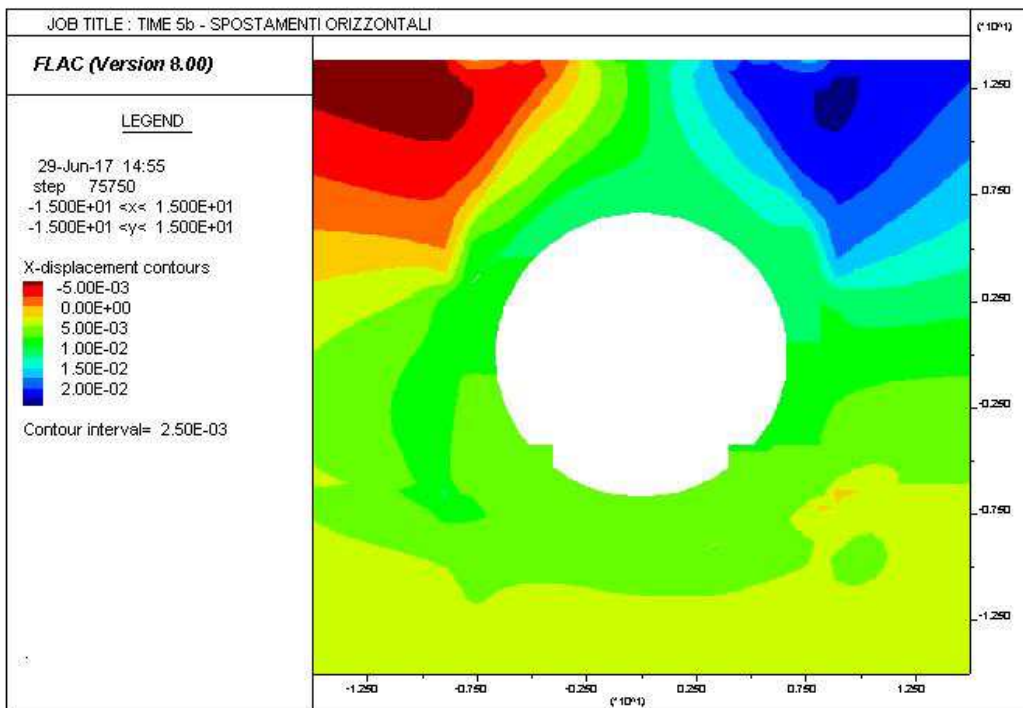
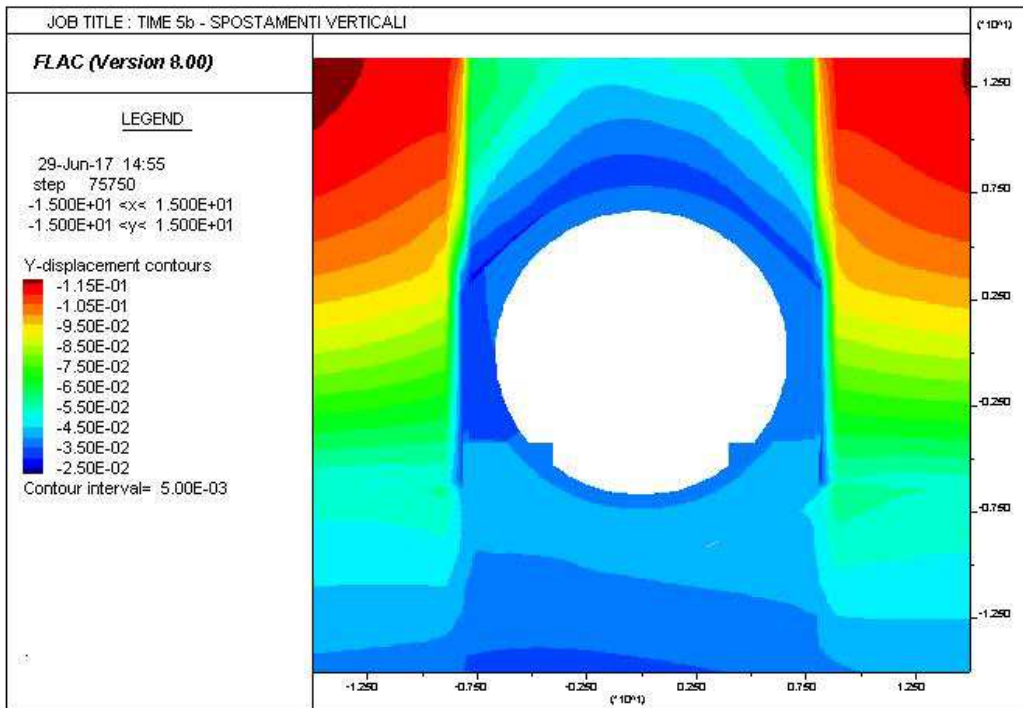
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

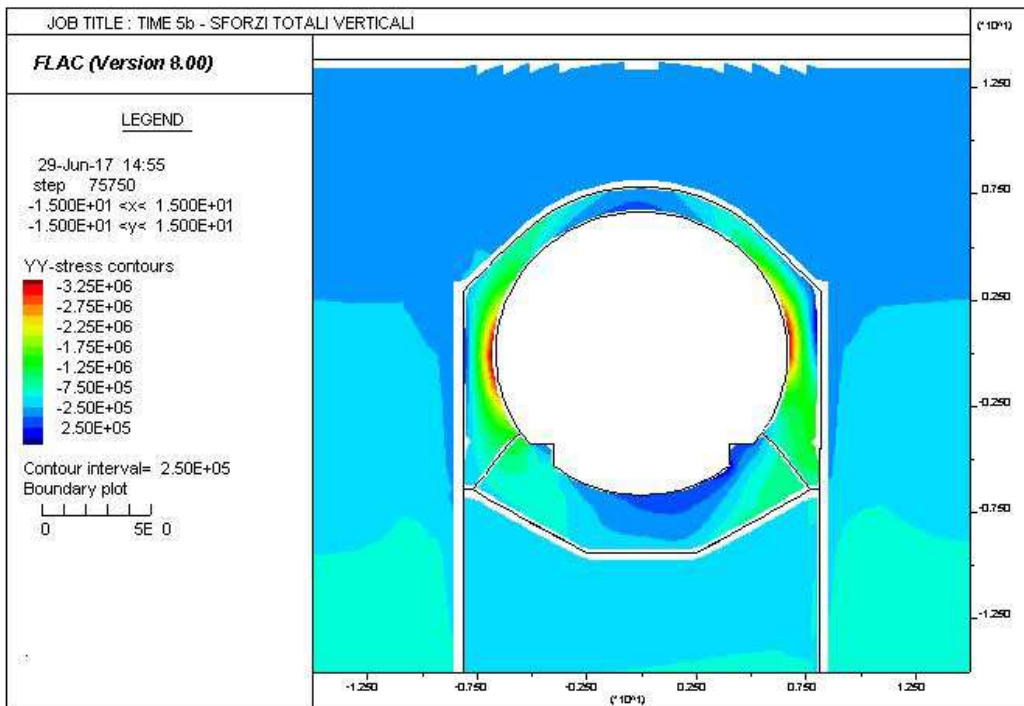
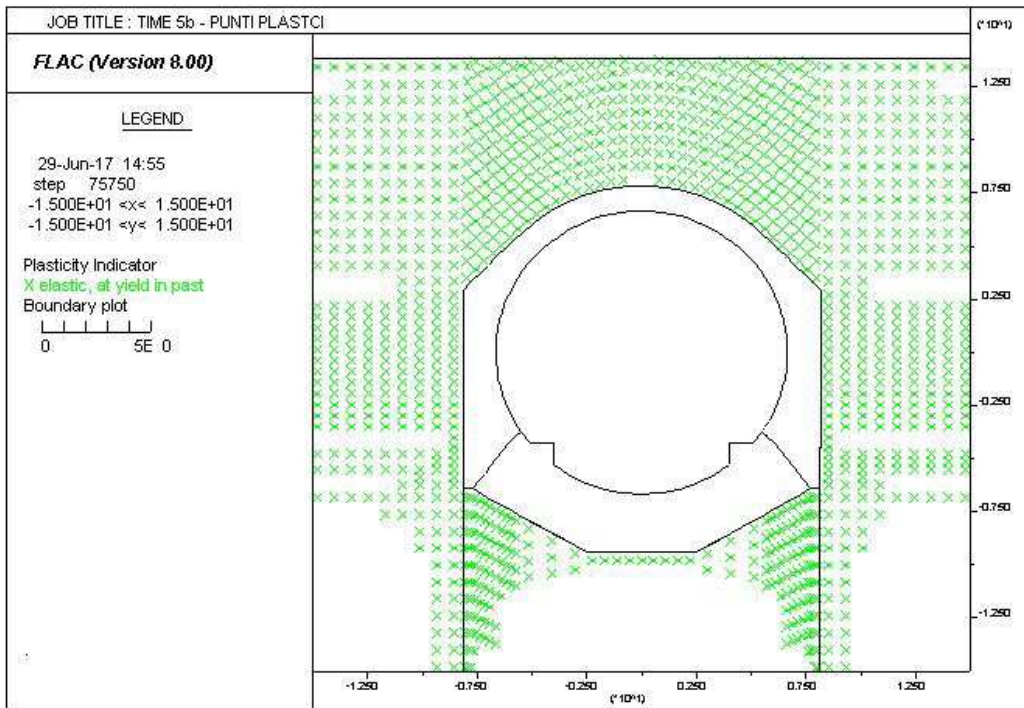




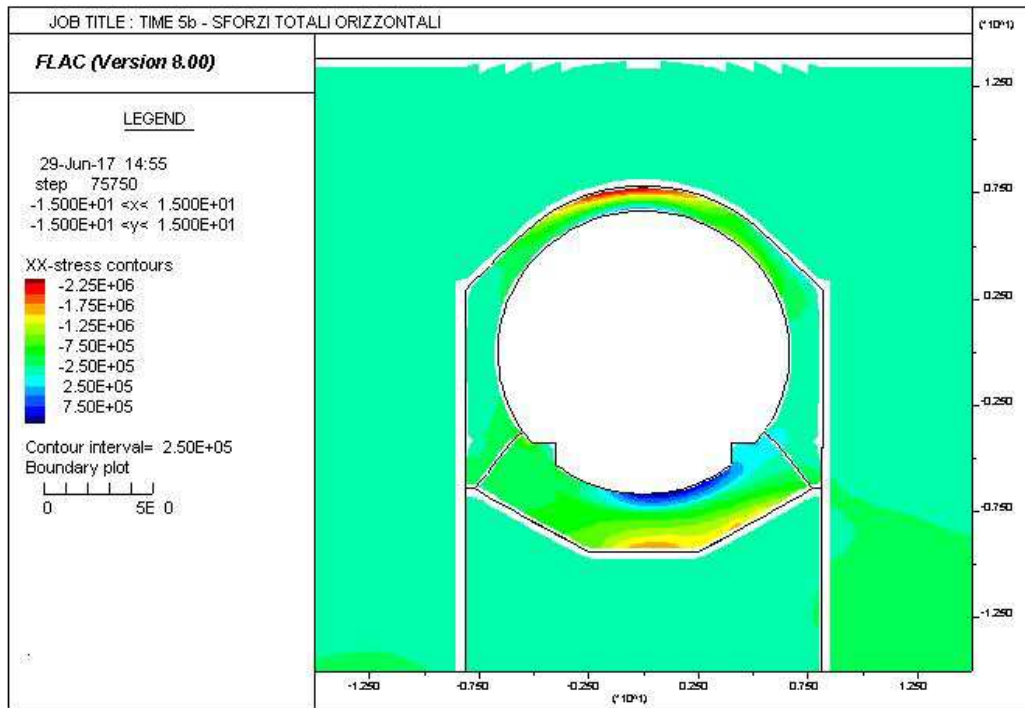
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



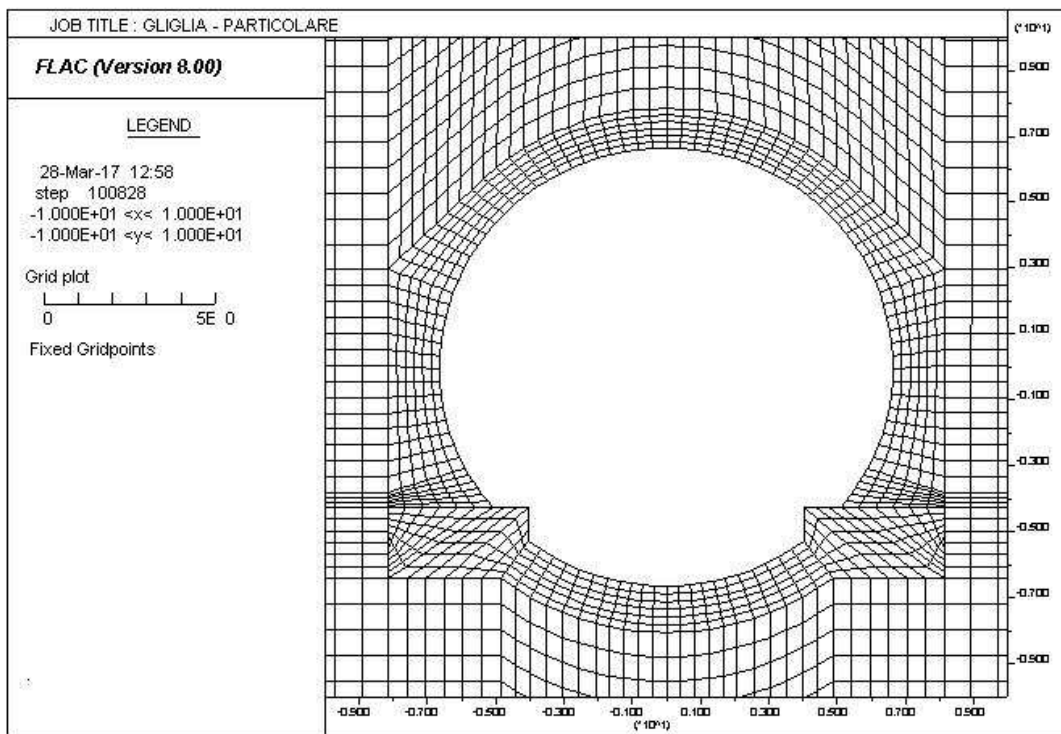
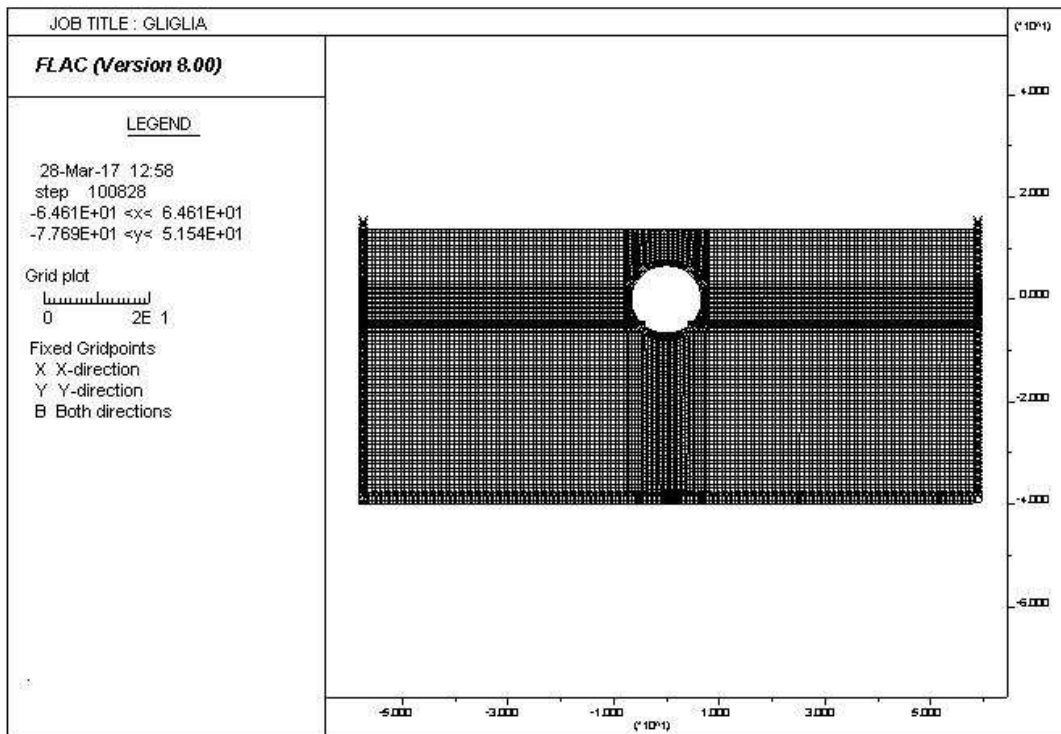
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



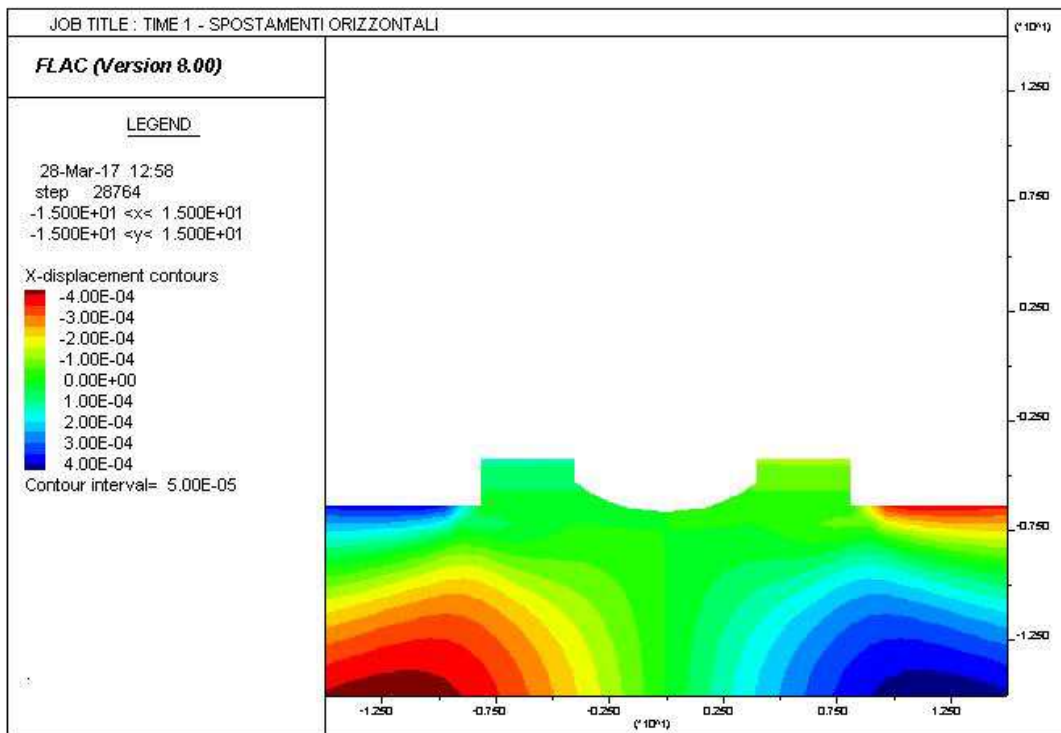
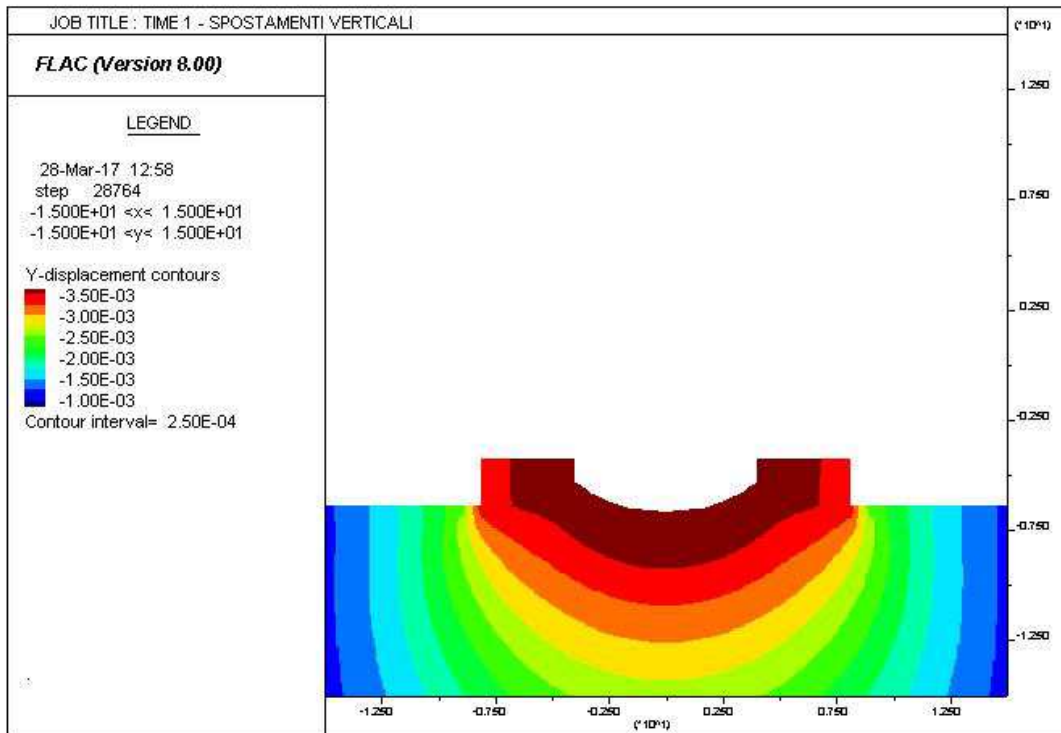
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



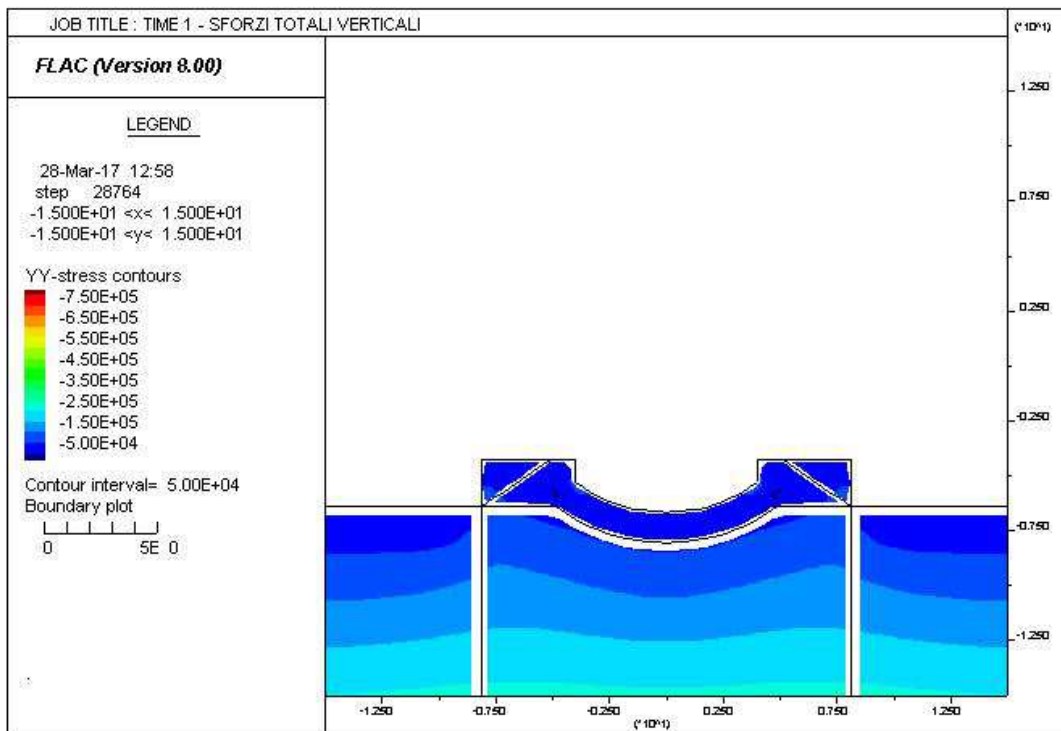
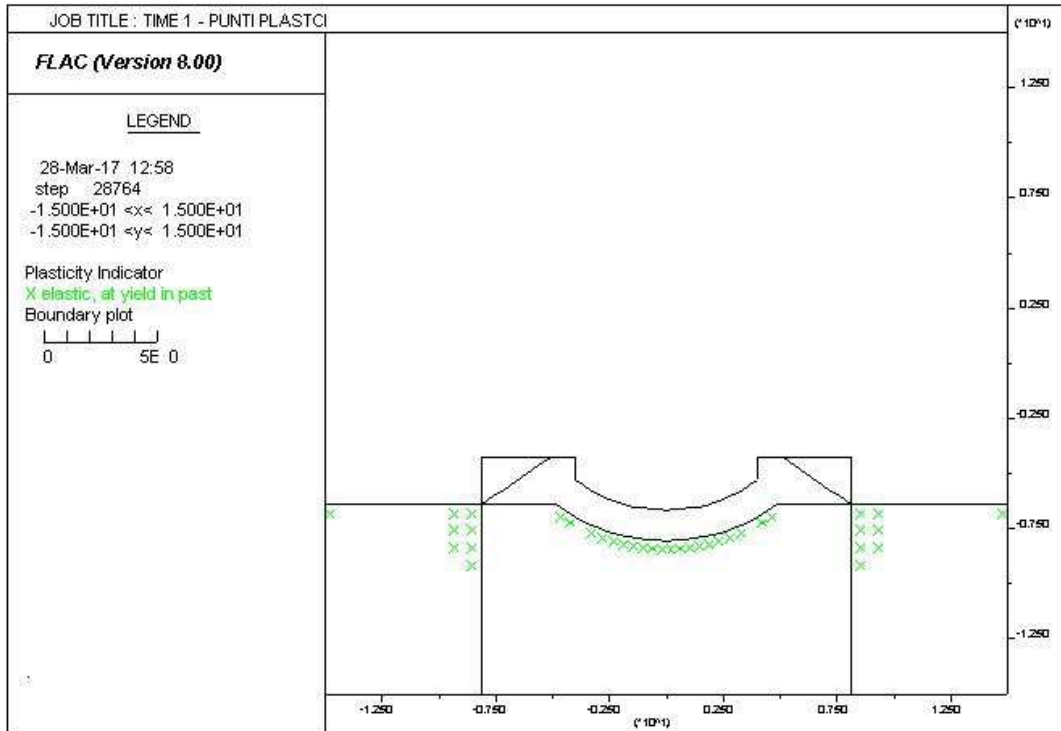
14.2 MODELLO 2 – GA



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

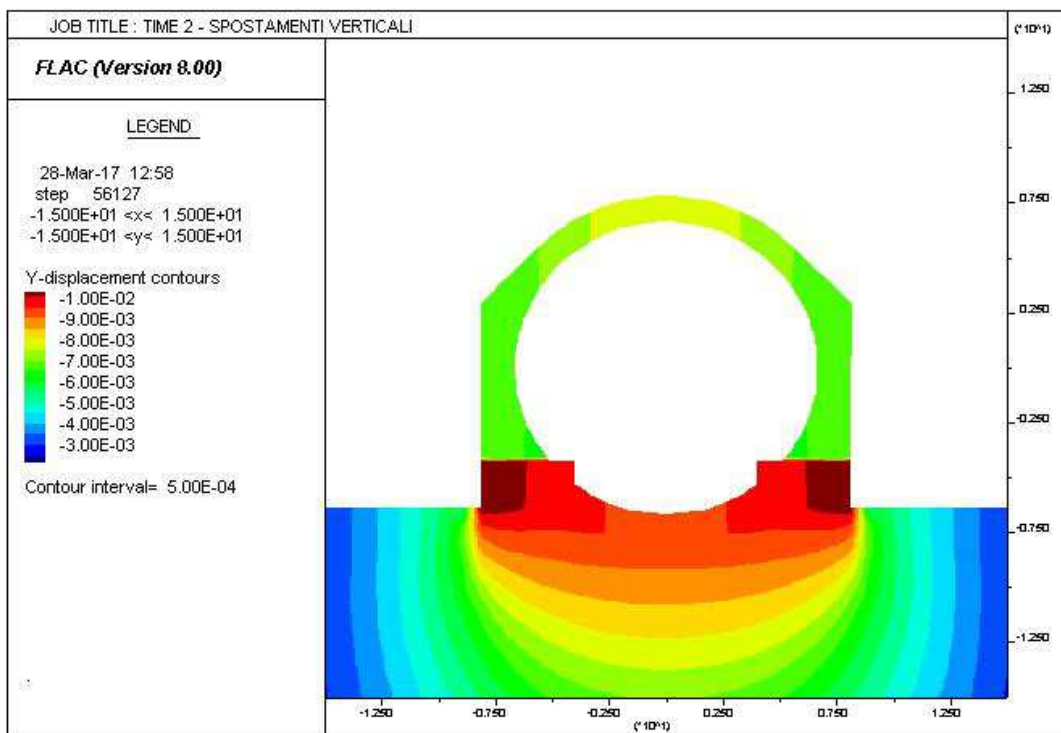
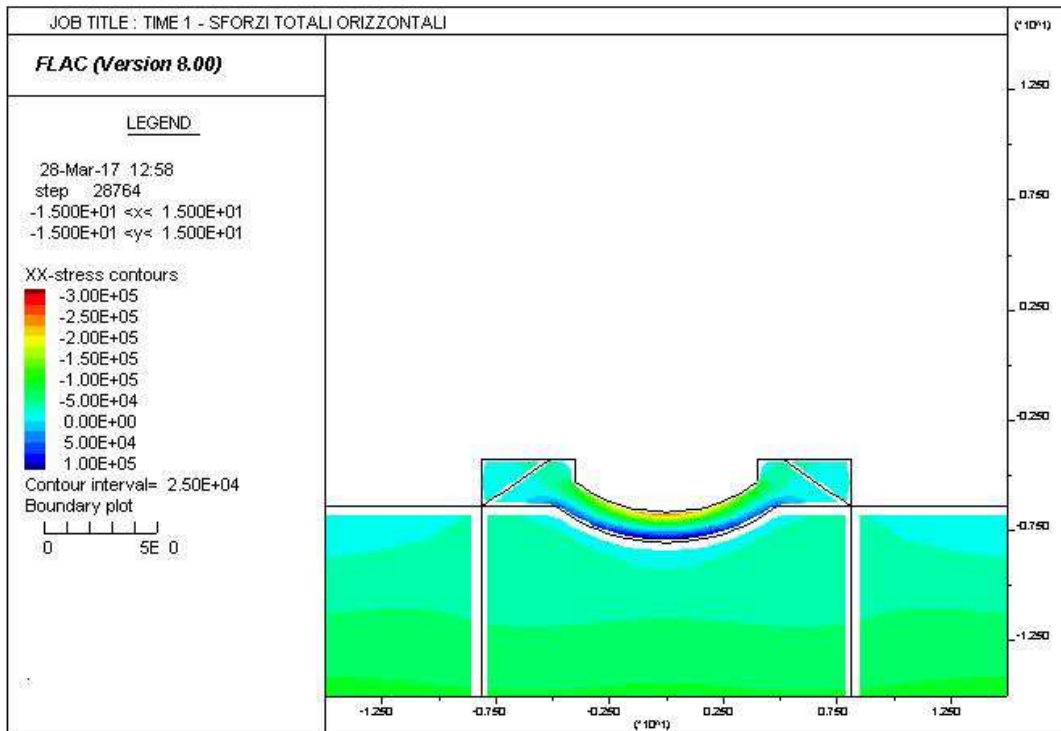


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

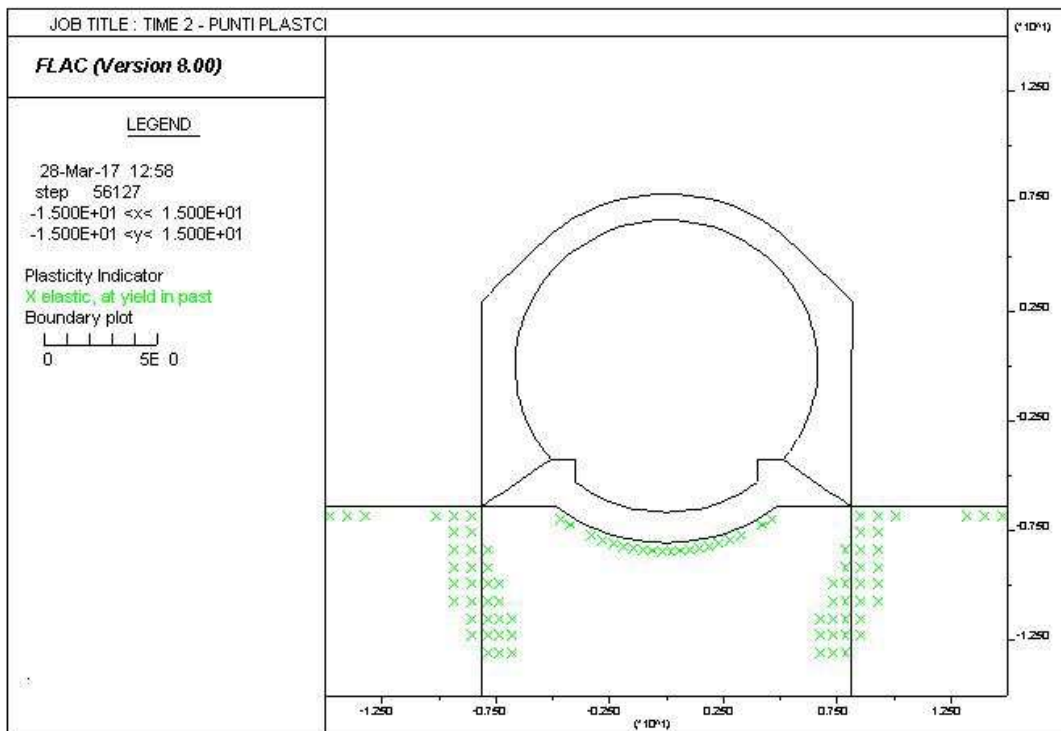
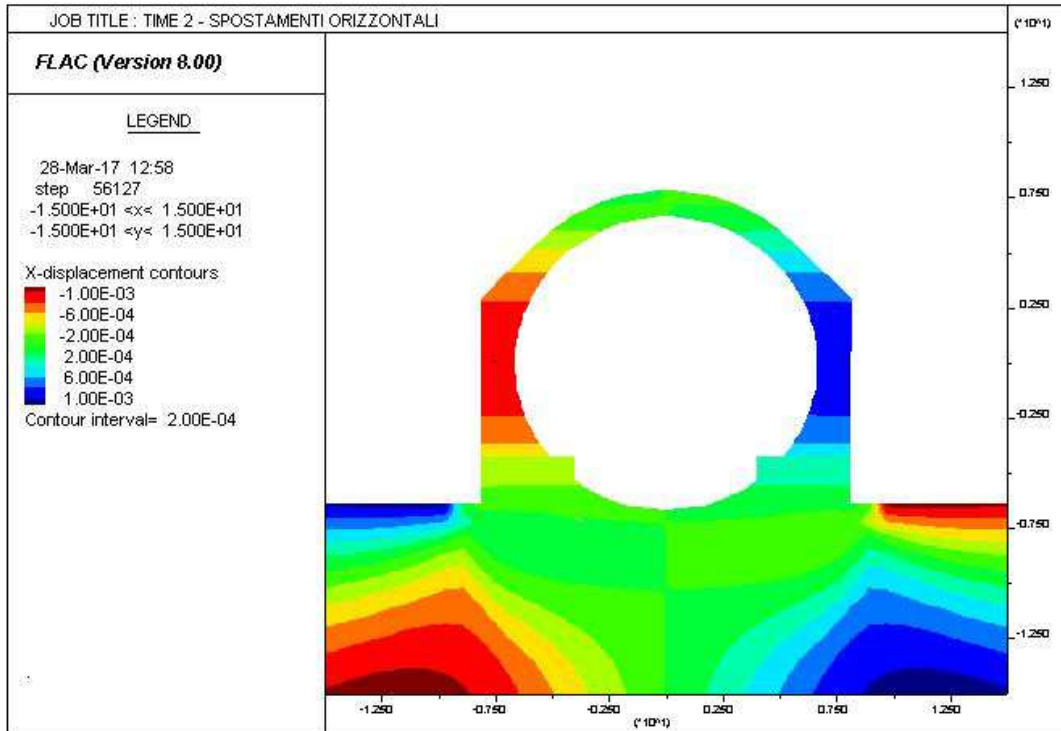


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

---

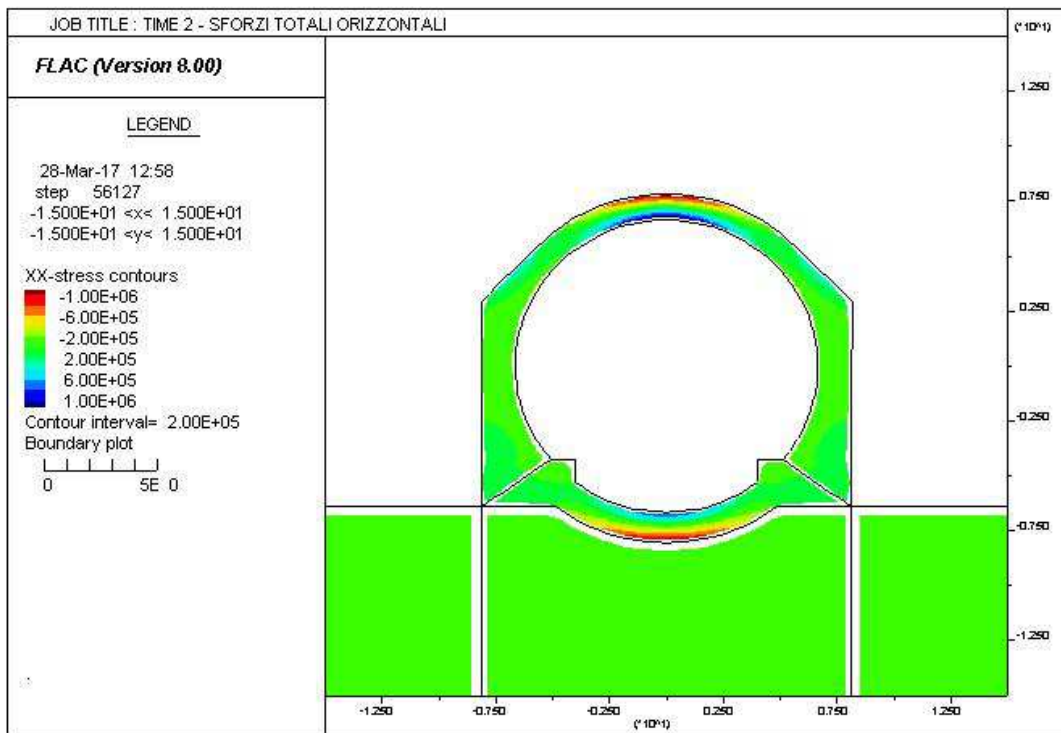
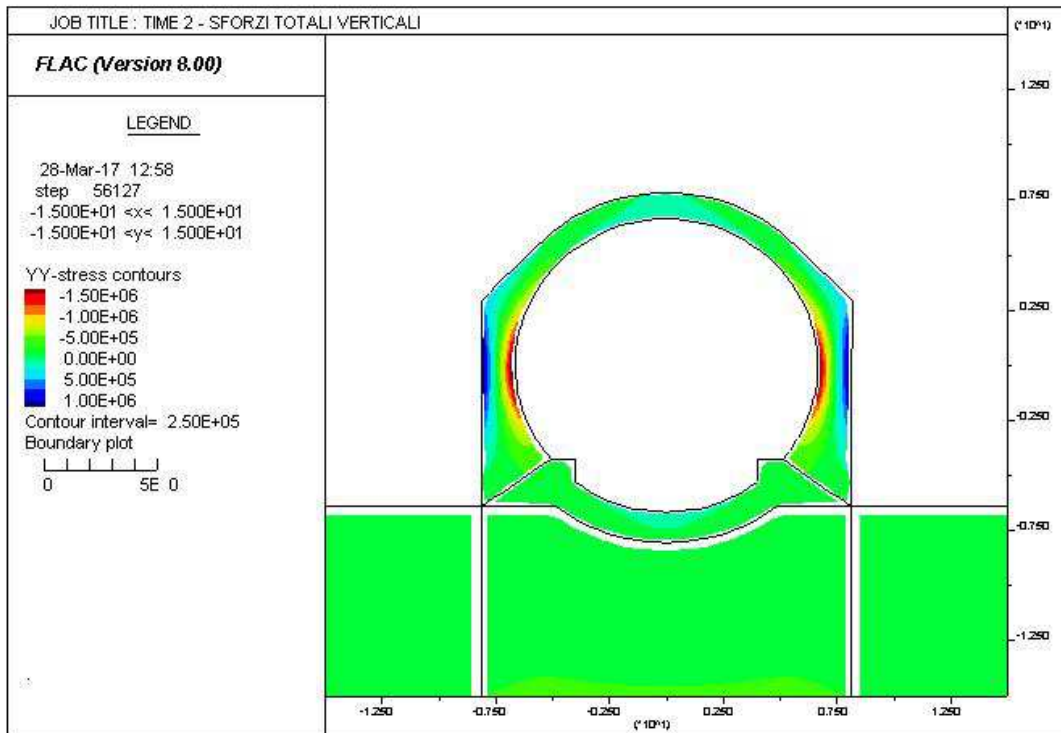


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

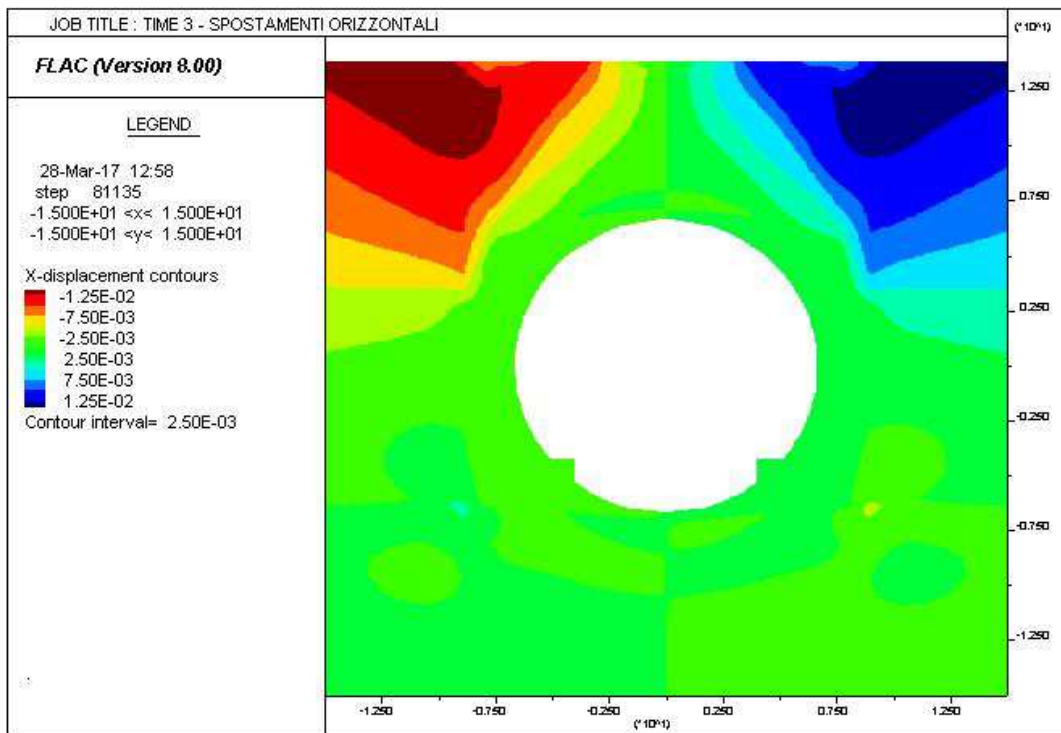
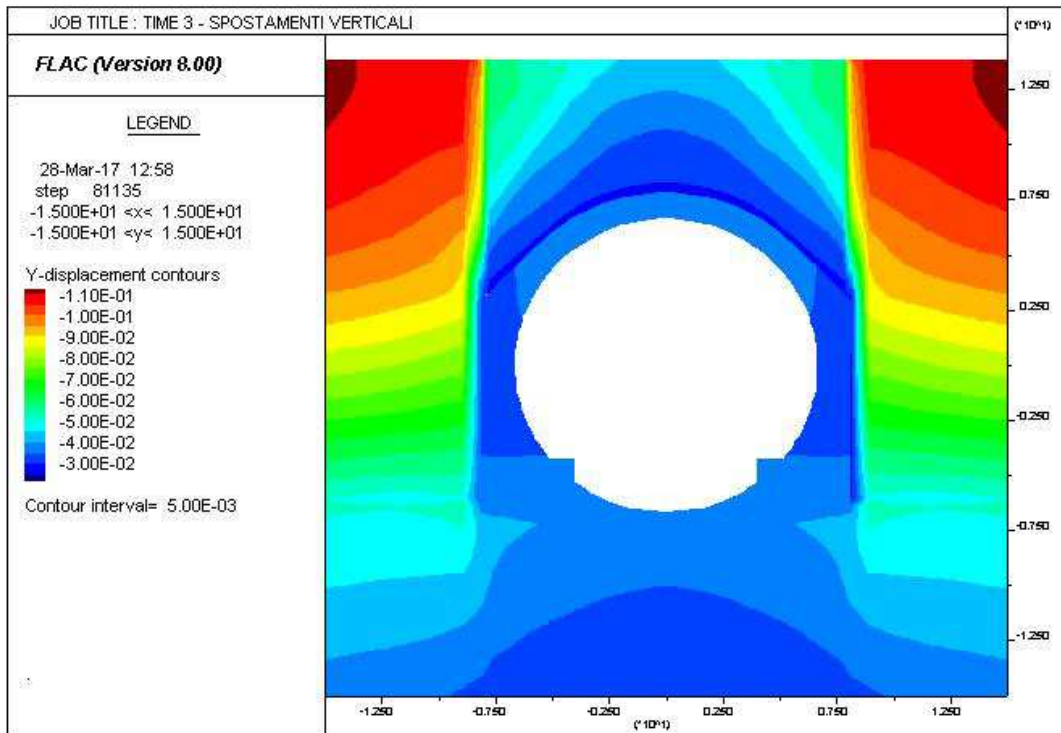




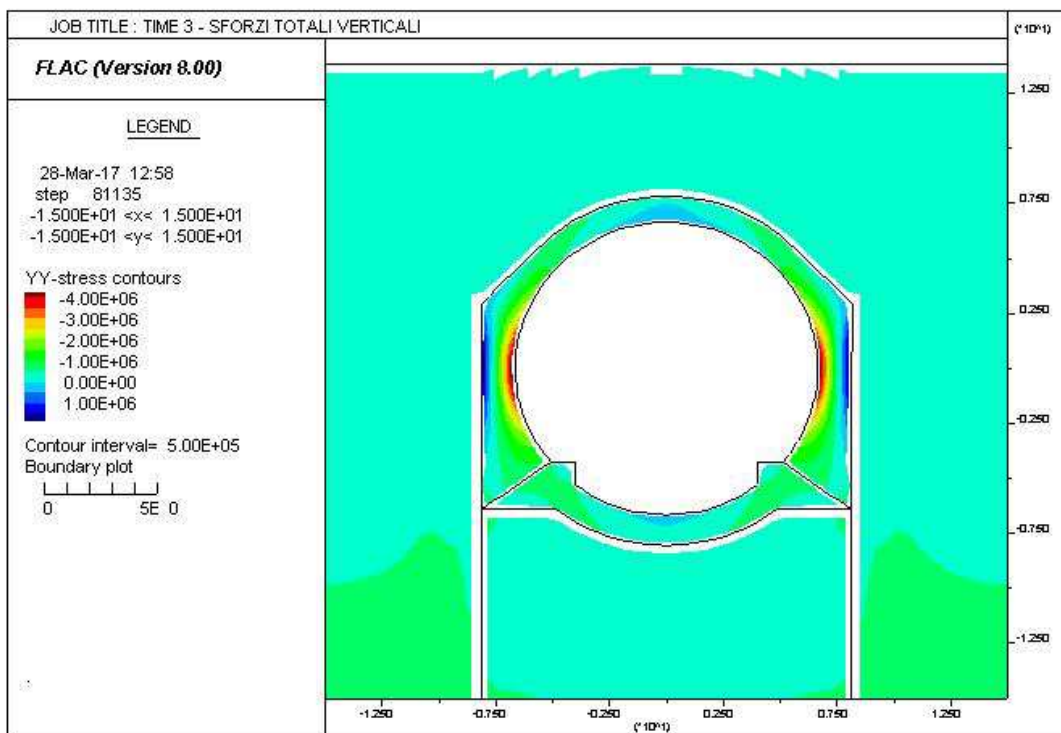
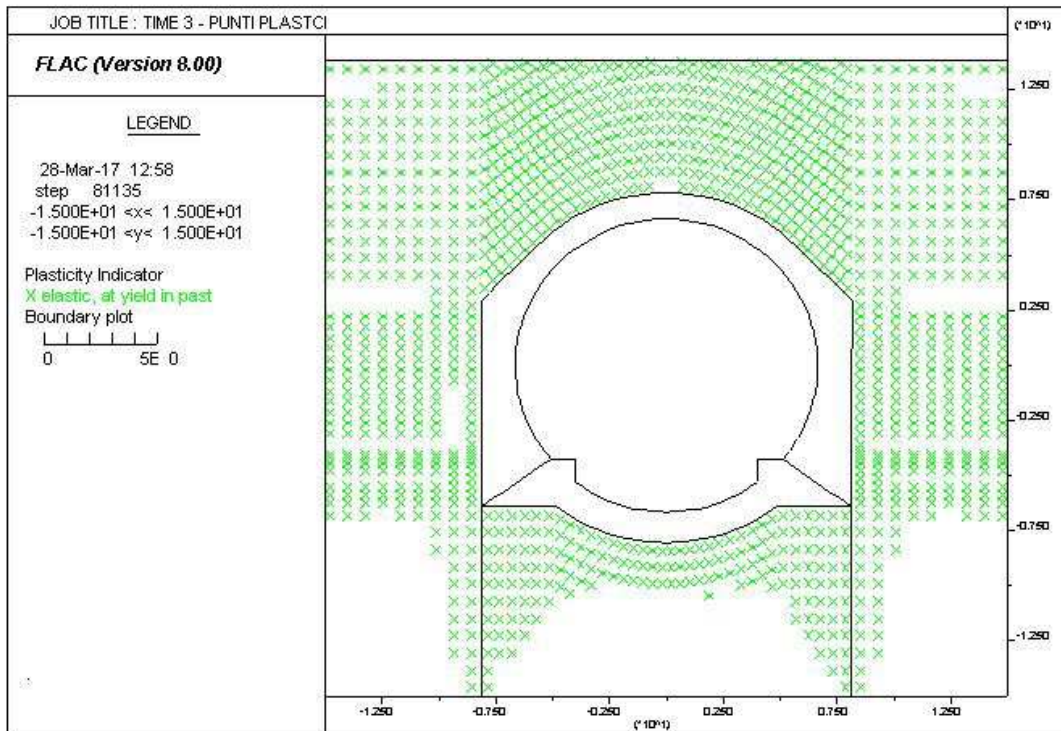
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



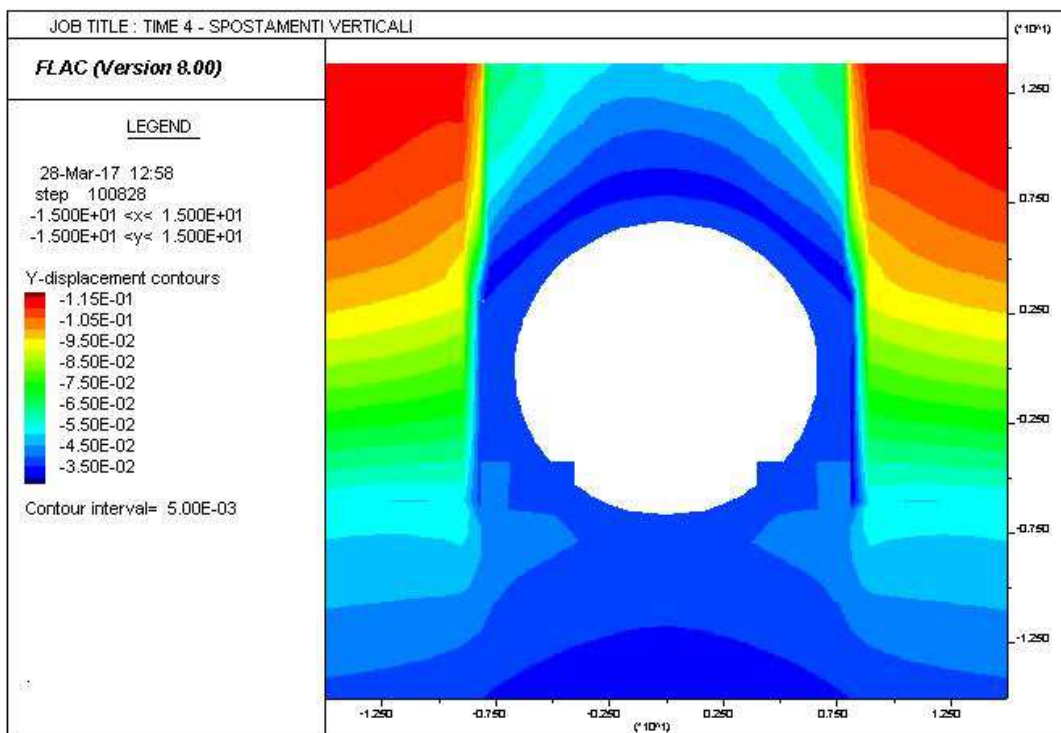
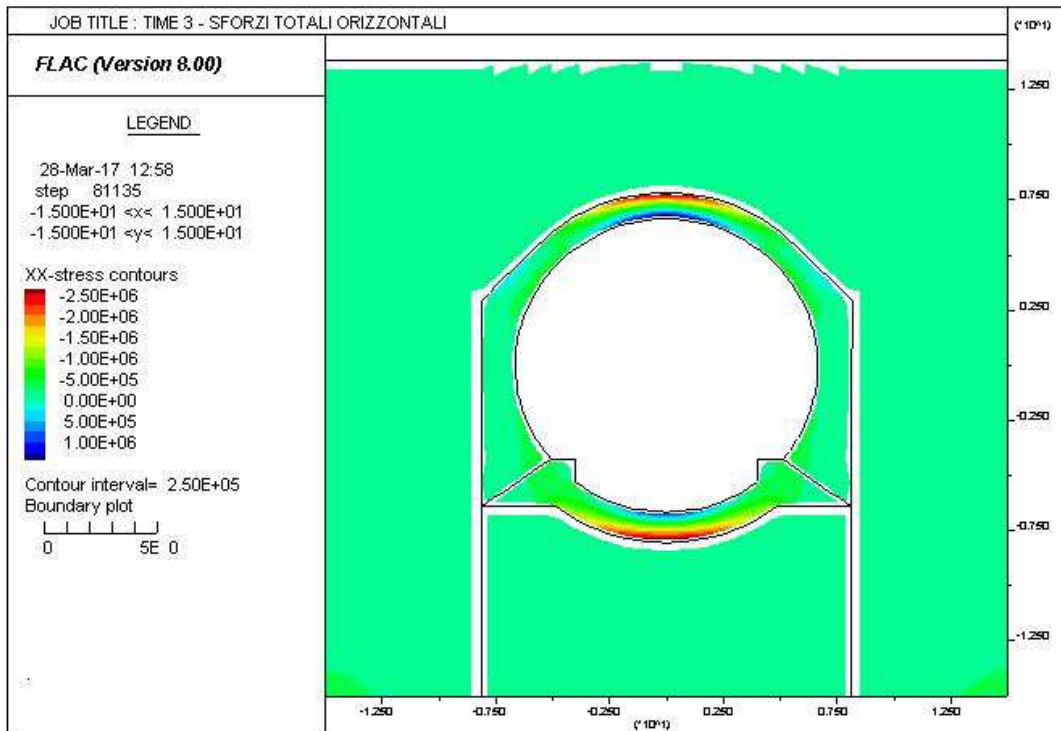
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



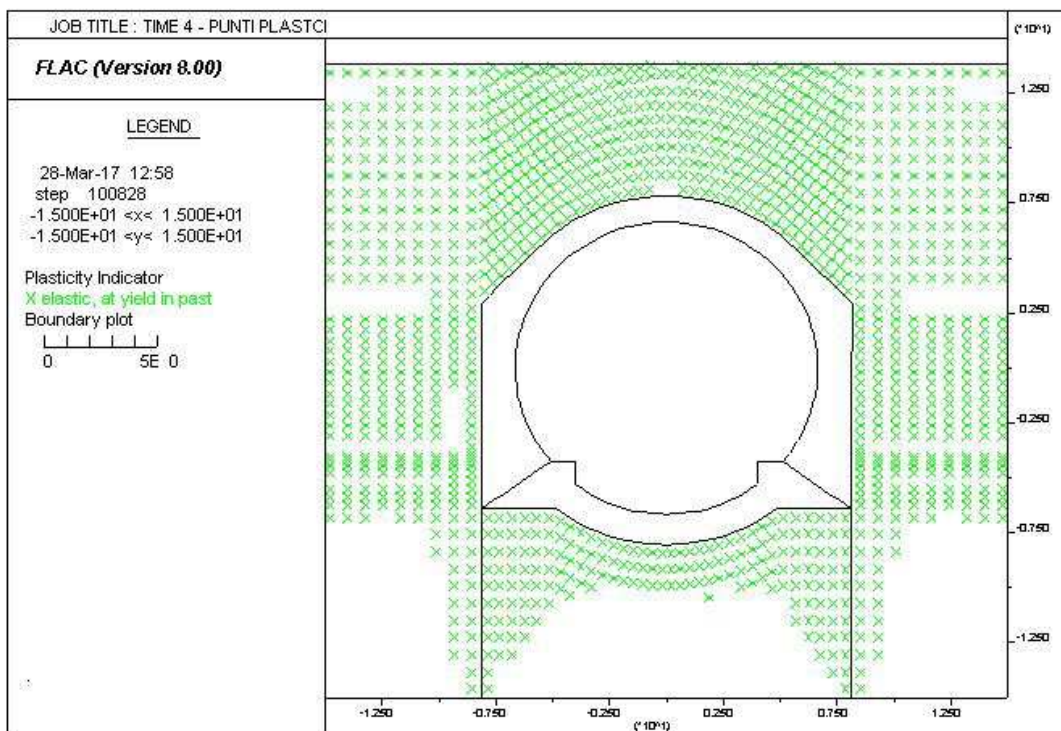
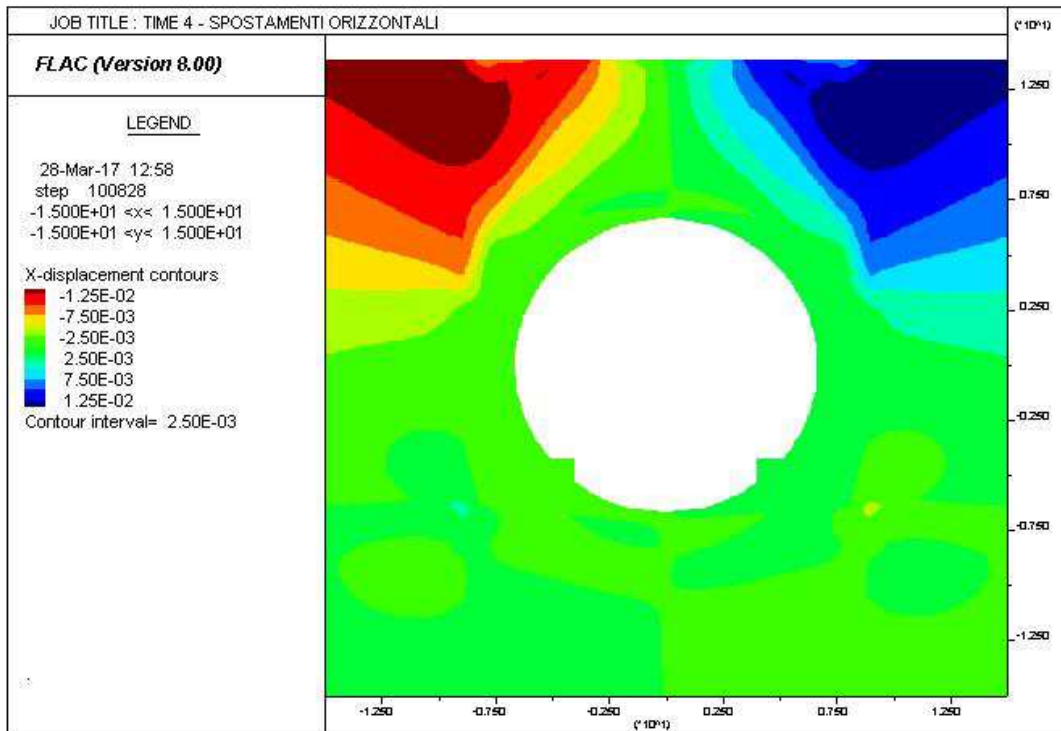
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



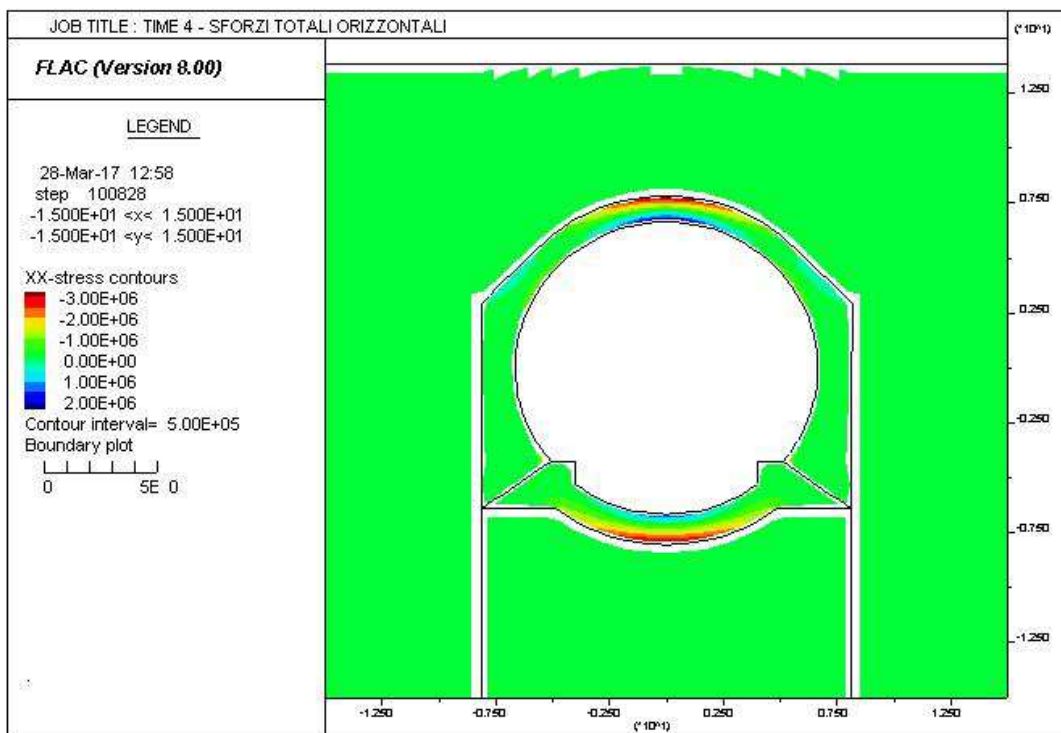
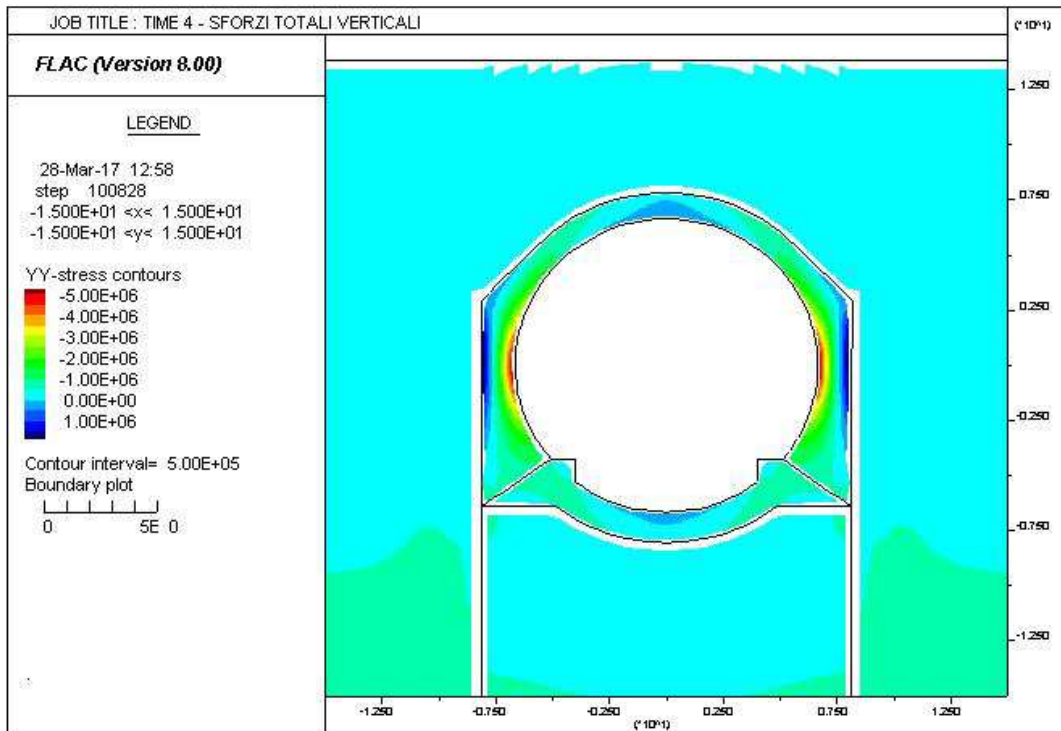
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



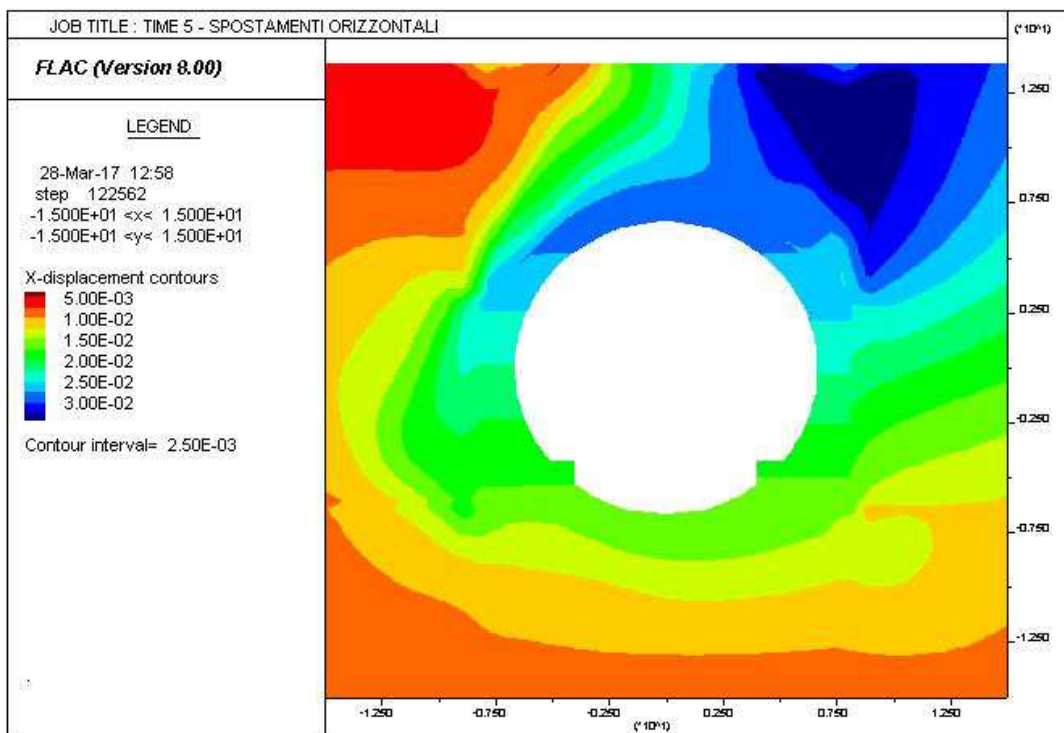
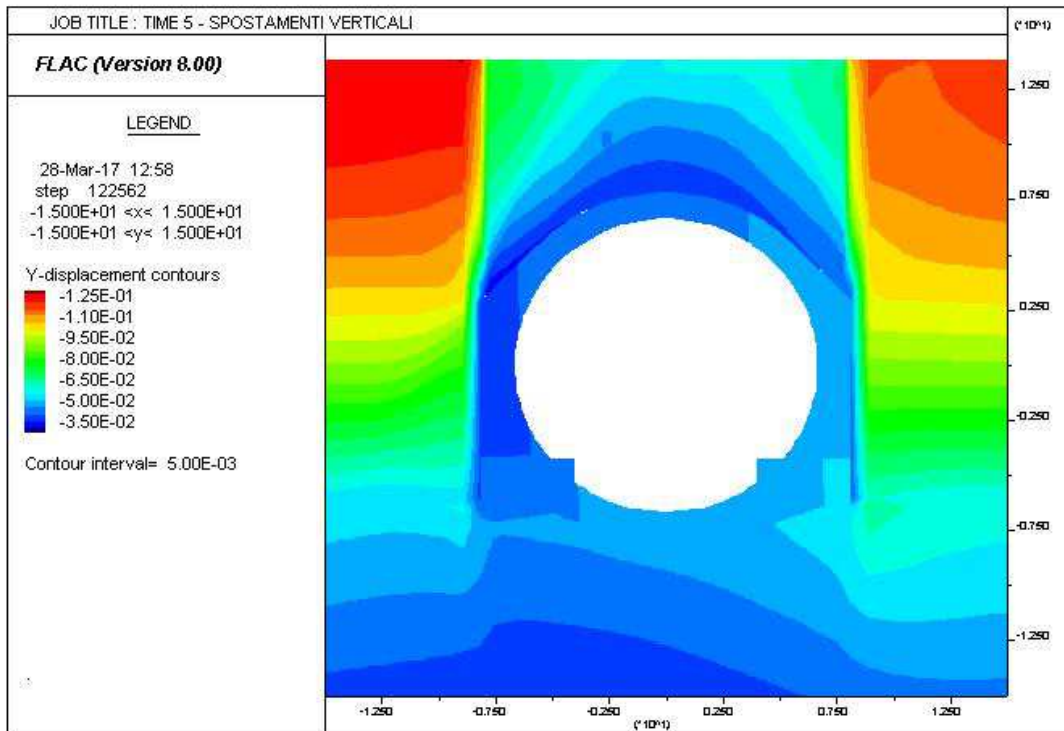
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



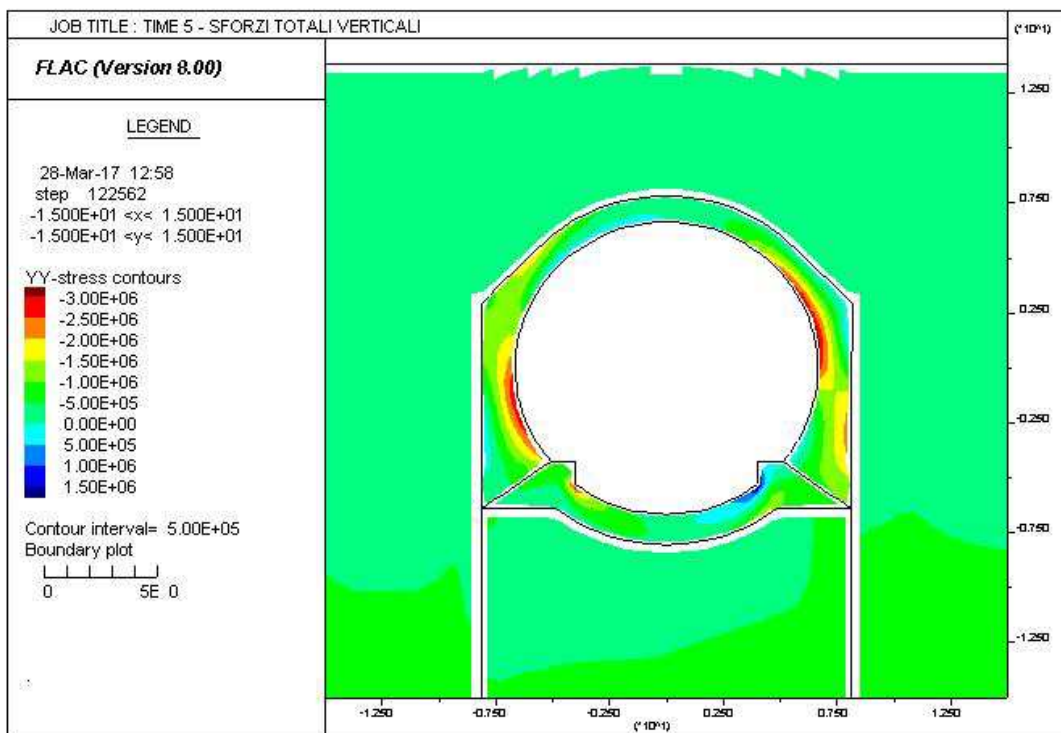
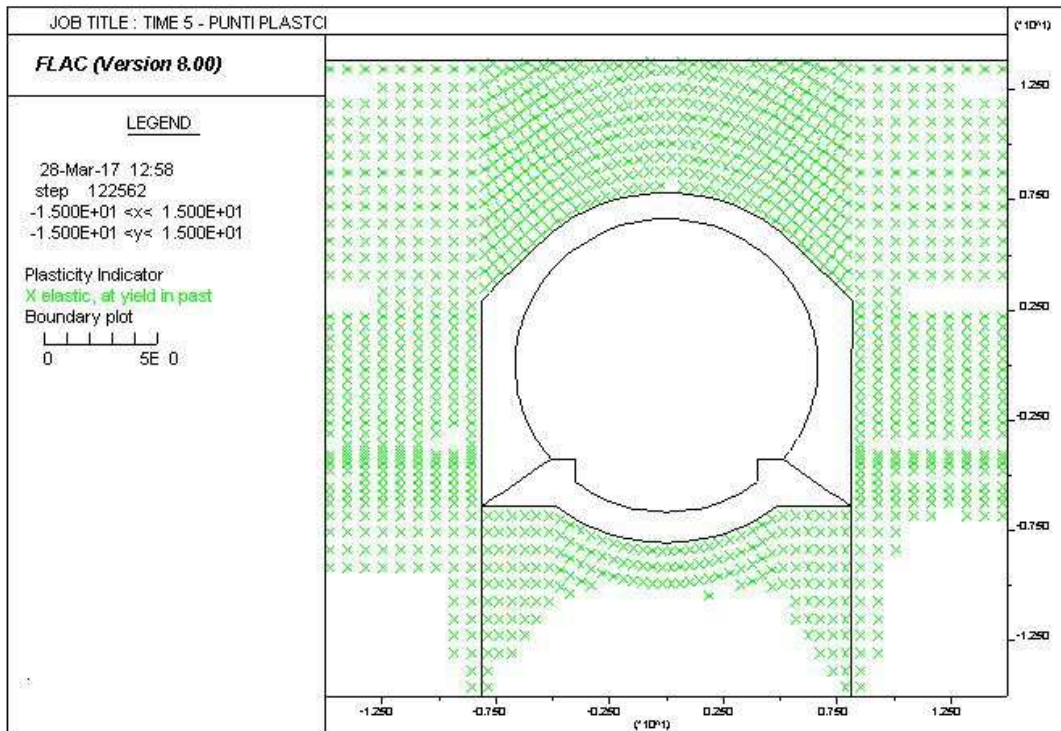
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



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

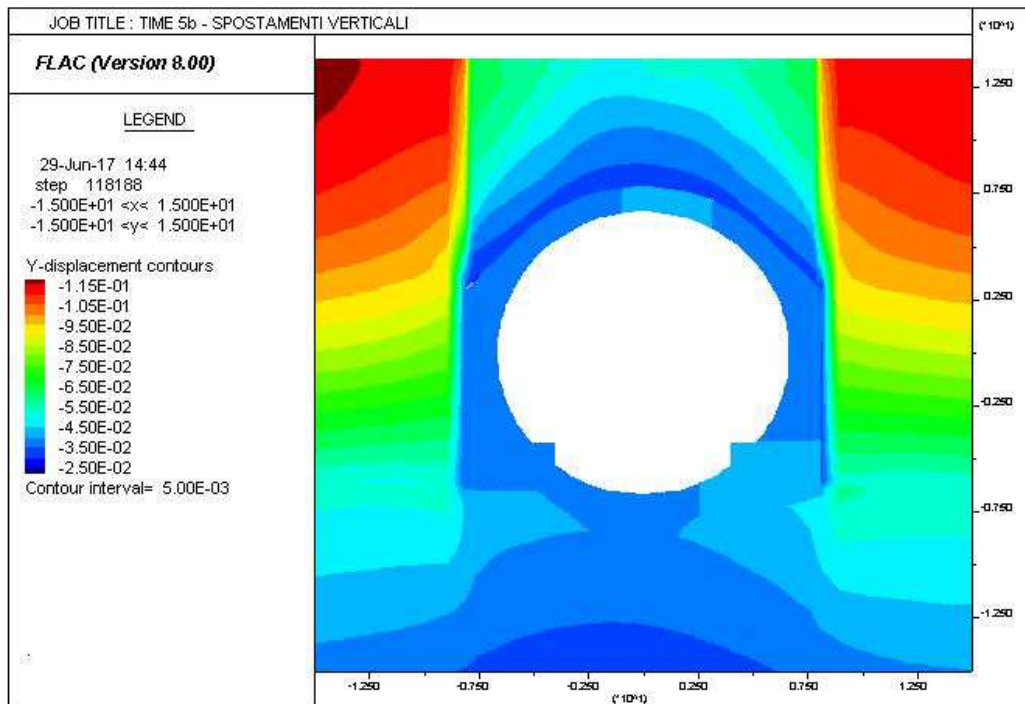
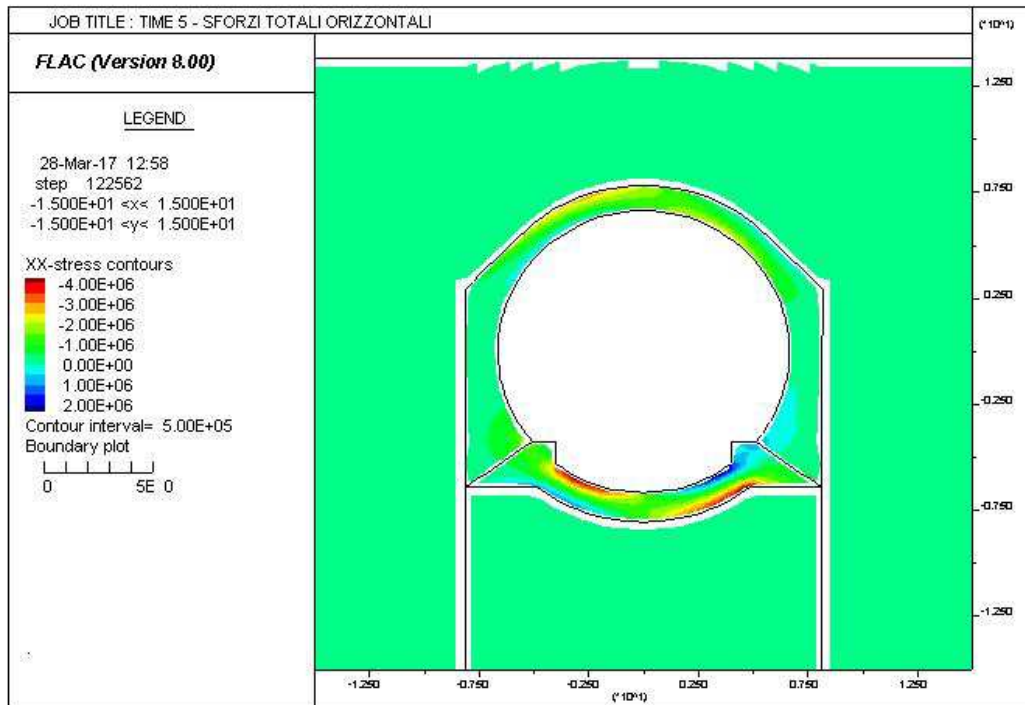


AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

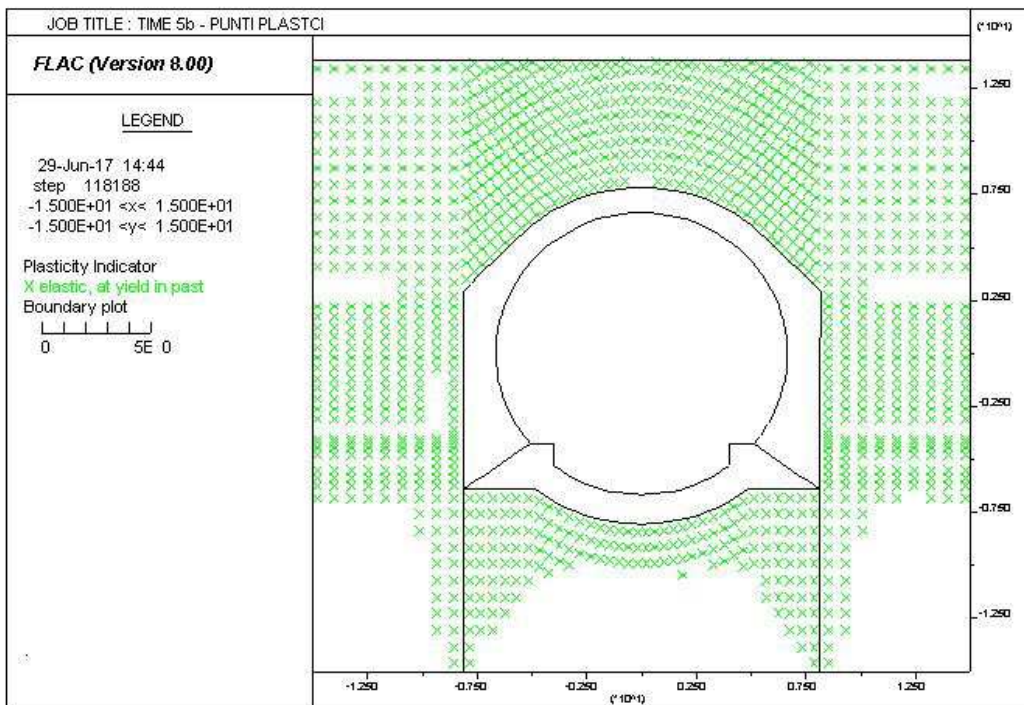
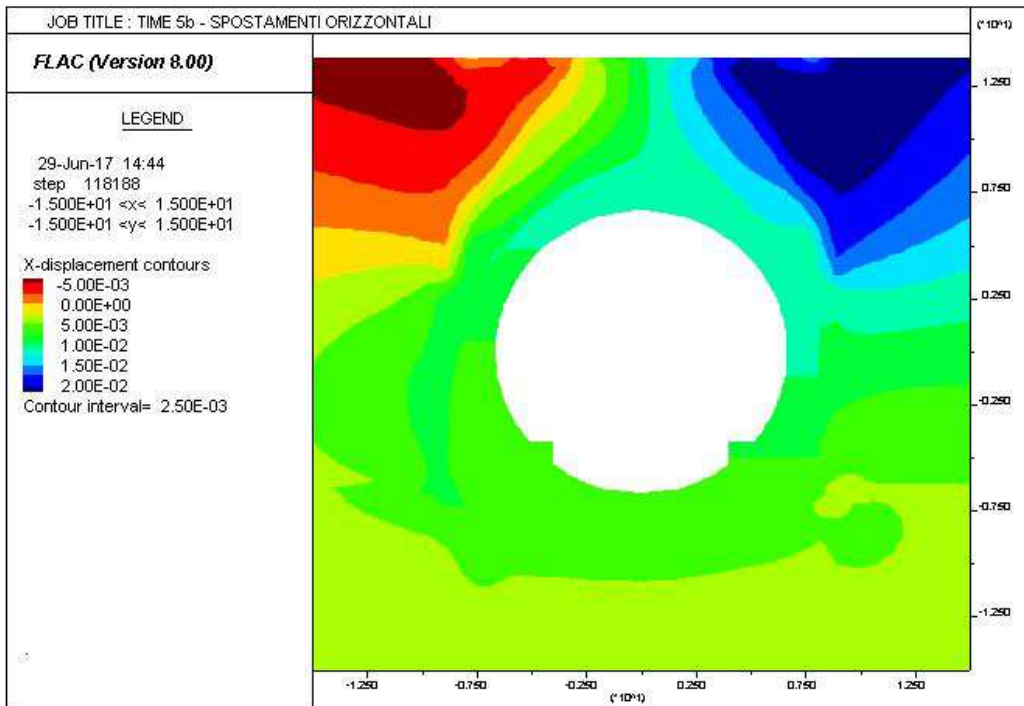




AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD  
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



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



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

