

AUTOSTRADA VALDASTICO

A31 NORD

1° LOTTO

Piovene Rocchette - Valle dell'Astico

PROGETTO DEFINITIVO

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

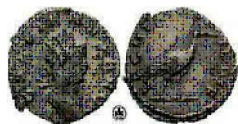
COMMITTENTE



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 PEDESCALA
GALLERIE ARTIFICIALI E PORTALI - RELAZIONE DI CALCOLO

Progressivo Rev.
07 02 05 002 02

Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Controllo	Approvazione	SCALA: --
00	MARZO 2017	PRIMA EMISSIONE	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	NOME FILE: J16L1_07_02_05_002_0101_OPD_02.doc
01	GIUGNO 2017	REVISIONE PER VERIFICA	ROCKSOIL - ZIMBALDI	AMADI	GATTI	CM. PROGR. FG. LIV. REV. J16L1_07_02_05_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 Pedescala

Gallerie artificiali e portali - Relazione di calcolo

INDICE

1	INTRODUZIONE	6
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	9
3	SOFTWARE UTILIZZATI	10
3.1	FLAC 8.0	10
3.1.1	<i>Analisi alle differenze finite</i>	10
3.1.2	<i>Leggi di comportamento e parametri del materiale</i>	11
3.1.3	<i>Rivestimento</i>	12
4	DESCRIZIONE DELL’INTERVENTO	13
4.1	Imbocco sud	13
4.1.1	<i>Fasi esecutive</i>	13
4.2	Imbocco nord	13
4.2.1	<i>Fasi esecutive</i>	14
5	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	15
6	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	17
6.1	RESISTENZA DEI MATERIALI	17
7	DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI	18
7.1	SPINTA DEL TERRENO	18
7.2	CARICO IDRAULICO	18
7.3	CARICO SISMICO	18
8	CRITERI DI VERIFICA	20
8.1	Stati limite ultimi (S.L.U.)	20
8.1.1	<i>Verifica a Pressoflessione</i>	21
8.1.2	<i>Verifica al Taglio</i>	22
8.2	Stati limite di esercizio (S.L.E.)	23
8.2.1	<i>Verifica a Fessurazione</i>	24
	Stato limite di apertura delle fessure	24
9	ANALISI NUMERICHE	26
9.1	FASI DI CALCOLO	26
9.2	PARAMETRI GEOTECNICI	29
10	MODELLO 1 – Concio d’attacco	32
10.1	Spostamenti	32
10.2	Verifiche a pressoflessione	32

10.2.1	Stato Limite Ultimo	34
10.2.2	Stato Limite di Esercizio	37
10.3	Verifiche a taglio	38
11	MODELLO 2 – GA	39
11.1	Spostamenti	39
11.2	Verifiche a pressoflessione	39
11.2.1	Stato Limite Ultimo	41
11.2.2	Stato Limite di Esercizio	43
11.3	Verifiche a taglio	44
12	VERIFICA AL FUOCO	46
12.1	Software di calcolo	47
12.2	Schematizzazione del problema	48
12.3	Proprietà termiche dei materiali	51
12.4	Output del programma	55
12.5	Verifica strutturale	57
13	CONCLUSIONI	59
14	ALLEGATI	61
14.1	MODELLO 1 – Concio d’attacco	61
14.2	MODELLO 2 – GA	75

Indice delle tabelle

Tabella 1:	Carico sismico SLV – Modello 1 – Concio d’attacco	27
Tabella 2:	Carico sismico SLD – Modello 1 – Concio d’attacco	27
Tabella 3:	Carico sismico SLV – Modello 2 – GA	28
Tabella 4:	Carico sismico SLD – Modello 2 – GA	28
Tabella 5:	Stratigrafia per Pedescala Sud	29
Tabella 6:	Spostamento verticale [mm]	32
Tabella 7:	Verifica a pressoflessione SLU – Step 3	34
Tabella 8:	Verifica a pressoflessione SLU – Step 4	36
Tabella 9:	Verifica a pressoflessione SLE – Step 3	37
Tabella 10:	Verifica a pressoflessione SLE – Step 4b	37
Tabella 11:	Verifica a taglio – Step 3	38
Tabella 12:	Verifica a taglio – Step 4	38
Tabella 13:	Verifica a taglio – Step 4 – con spilli	38

Tabella 14: Spostamento verticale [mm]	39
Tabella 15: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3.....	41
Tabella 16: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4.....	43
Tabella 17: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3	44
Tabella 18: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4b	44
Tabella 19: Verifica a taglio – Step 3	45
Tabella 20: Verifica a taglio – Step 4	45
Tabella 21: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria	48
Tabella 22 – Analisi al fuoco – Modello 1	57
Tabella 23 – Analisi al fuoco – Modello 2	58

Indice delle figure

Figura 1 - Planimetria imbocco sud	6
Figura 2 - Profili imbocco sud	6
Figura 3 - Planimetria imbocco nord	7
Figura 4 - Profili imbocco nord.....	8
Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC	11
Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni	12
Figura 7 - Galleria artificiale.....	13
Figura 8 - Dima + Galleria artificiale	14
Figura 9 - Galleria artificiale.....	14
Figura 10 - Stratigrafia imbocco sud.....	15
Figura 11 - Stratigrafia imbocco nord.....	16
Figura 12 - Definizione del carico sismico	26
Figura 13 - Modello “Concio d’attacco”	29
Figura 14 - Modello “Concio d’attacco” - particolare	30
Figura 15 - Modello “GA”	30
Figura 16 - Modello “GA” - particolare.....	31
Figura 17 - Diagrammi N e M – Step 3	33
Figura 18 - Diagrammi N e M – Step 4.....	33
Figura 19 - Diagrammi N e M – Step 4b.....	34
Figura 20 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3	35
Figura 21 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4	36
Figura 22 - Diagrammi N e M – Step 3	40
Figura 23 - Diagrammi N e M – Step 4.....	40

Figura 24 - Diagrammi N e M – Step 4b.....	41
Figura 25 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3.....	42
Figura 26 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4.....	43
Figura 27 – Sezione di calcolo – Modello 1.....	49
Figura 28 – Sezione di calcolo – Modello 2.....	49
Figura 29 – Mesh di calcolo – Modello 1.....	50
Figura 30 – Mesh di calcolo –Modello 2.....	50
Figura 31 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7).....	51
Figura 32 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a).....	52
Figura 33 –Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{ck} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1).....	52
Figura 34 –Fattore di riduzione del valore di ϵ_{c1} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1).....	53
Figura 35 – Fattore di riduzione del valore di ϵ_{cu} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1).....	53
Figura 36 – 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).....	54
Figura 37 – 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).....	54
Figura 38 – Analisi termica – Modello 1.....	55
Figura 39 – Analisi termica – Modello 2.....	56
Figura 40 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato”.....	60

1 INTRODUZIONE

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

La galleria è scavata in naturale e all’imbocco sud è prevista la realizzazione di una dima d’attacco di 5 m per canna, di una galleria artificiale di 5 m in canna nord e di 6.5 m in canna sud e di un portale d’imbocco di 15 m per ambo le gallerie.

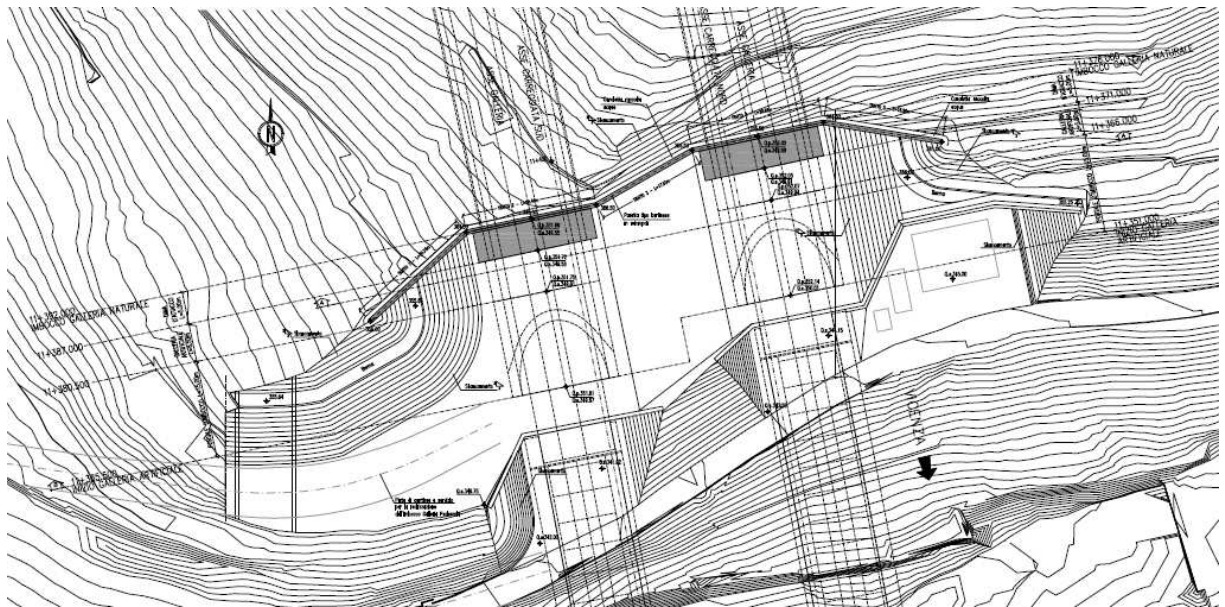


Figura 1 - Planimetria imbocco sud

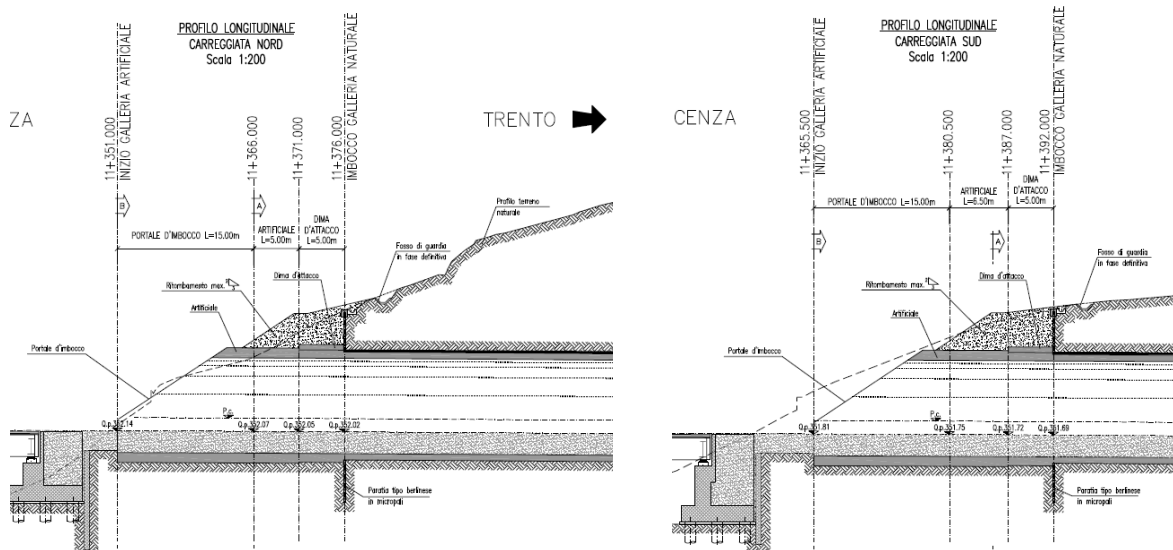


Figura 2 - Profili imbocco sud

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

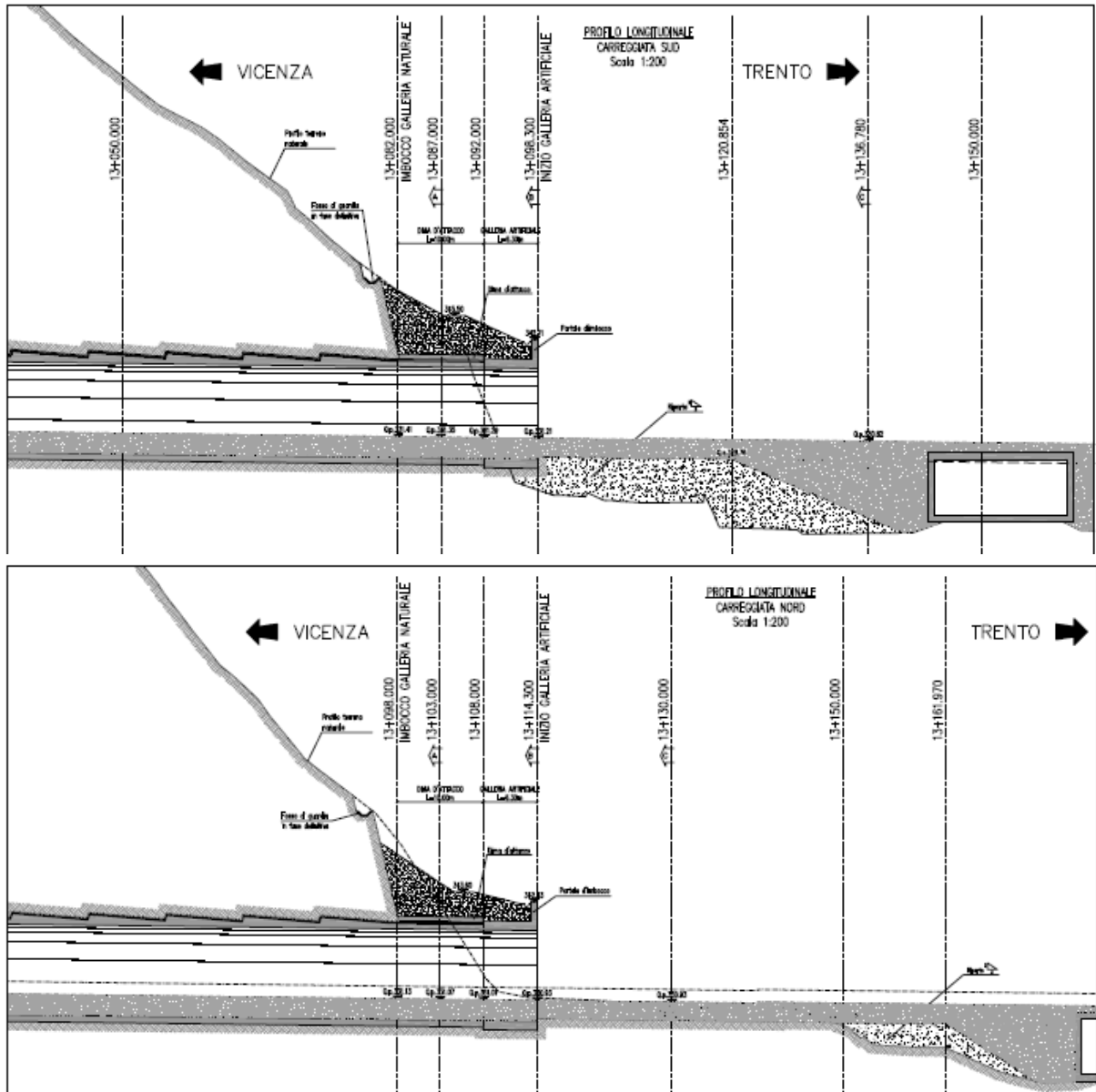


Figura 4 - Profili imbocco nord

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

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- D.M. 14/01/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” (pubblicato sulla G.U. n.29 – Suppl. Ordinario n.30 – del 4 febbraio 2008);
- EC2_UNI-ENV-1992: “Progettazione Strutture in c.a.”;
- EC3_UNI-ENV-1993: “Progettazione delle strutture in acciaio”;
- EC7_UNI-ENV-1997: “Progettazione geotecnica”;
- EC8_UNI-ENV-1998: “Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture”;
- Ancoraggi nei Terreni e nelle Rocce, Raccomandazioni AGI-AICAP, AGI, Roma, 2012;
- UNI-EN 1537, Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Tiranti di ancoraggio;
- Circolare 617 – 2/2/2009.

3 SOFTWARE UTILIZZATI

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

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

3.1 FLAC 8.0

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

3.1.1 Analisi alle differenze finite

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

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

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

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

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

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

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

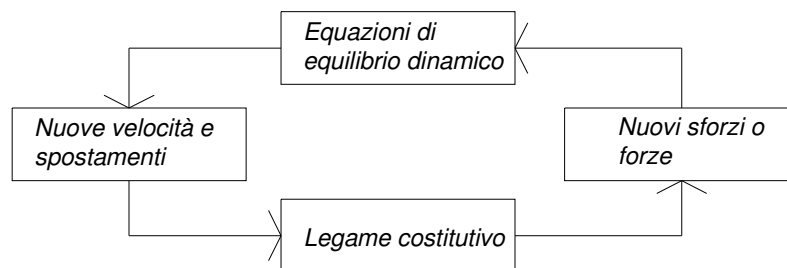


Figura 5 - Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

3.1.2 Leggi di comportamento e parametri del materiale

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

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

comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso.

Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali σ_1 , σ_2 , σ_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:

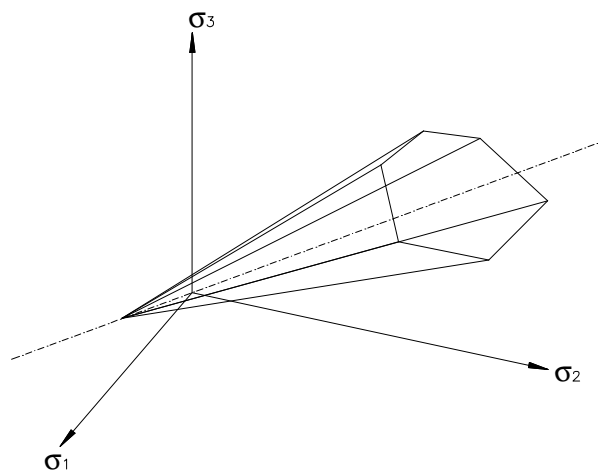


Figura 6 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni

3.1.3 Rivestimento

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

4 DESCRIZIONE DELL’INTERVENTO

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

4.1 *Imbocco sud*

Nella zona di imbocco è prevista la realizzazione di una galleria artificiale (6.5 m in canna sud e 5 m in canna nord) in calcestruzzo C28/35, con arco rovescio di spessore minimo pari a 1.1 m e calotta di spessore minimo pari a 1.1 m. Le gallerie terminano con un portale d’imbocco lungo 15m, mentre a contatto con la paratia è prevista una dima d’attacco a protezione temporanea degli scavi e la sezione del rivestimento definitivo si riduce a 0.9 m in calotta e a 1 m in arco rovescio.

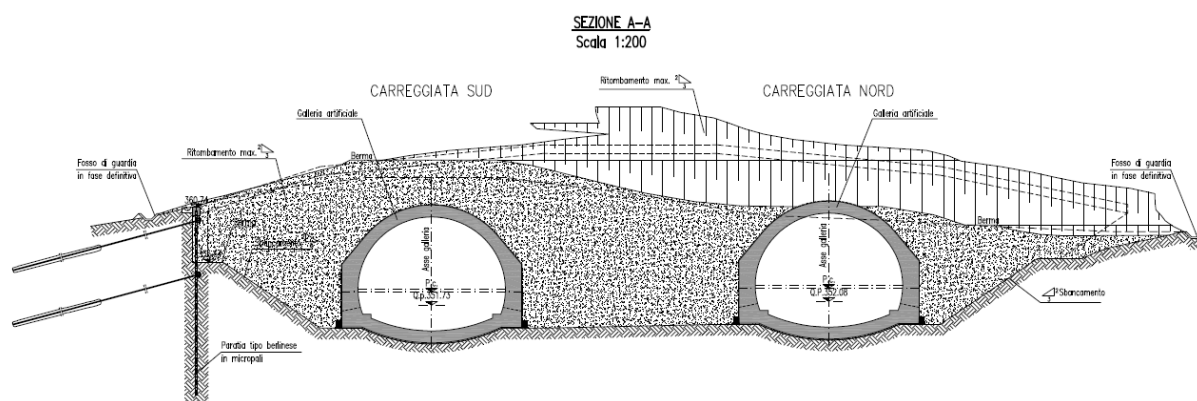


Figura 7 - Galleria artificiale

4.1.1 *Fasi esecutive*

Per l’are di imbocco, sono state individuate 3 macro fasi:

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

4.2 *Imbocco nord*

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

riduce a 0.7 m in calotta e a 0.8 m in arco rovescio.

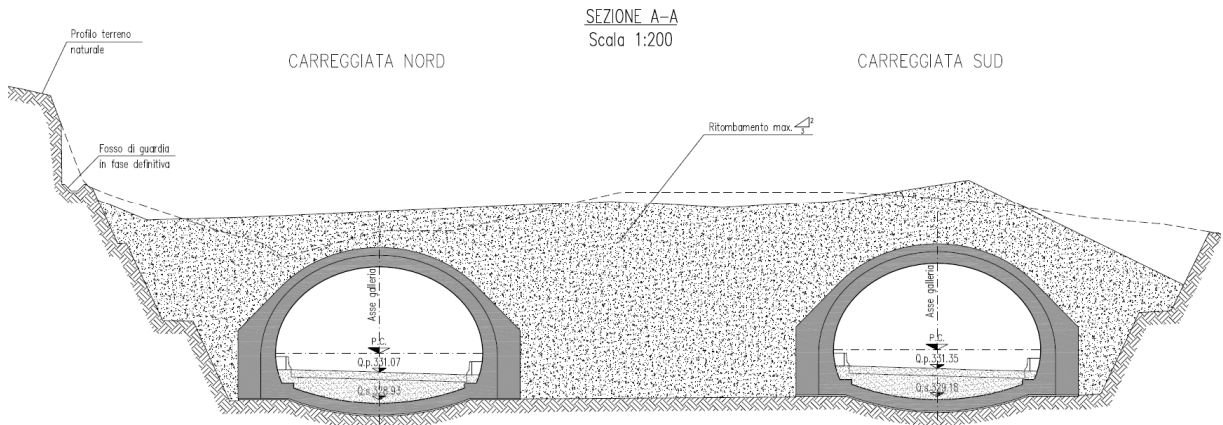


Figura 8 - Dima + Galleria artificiale

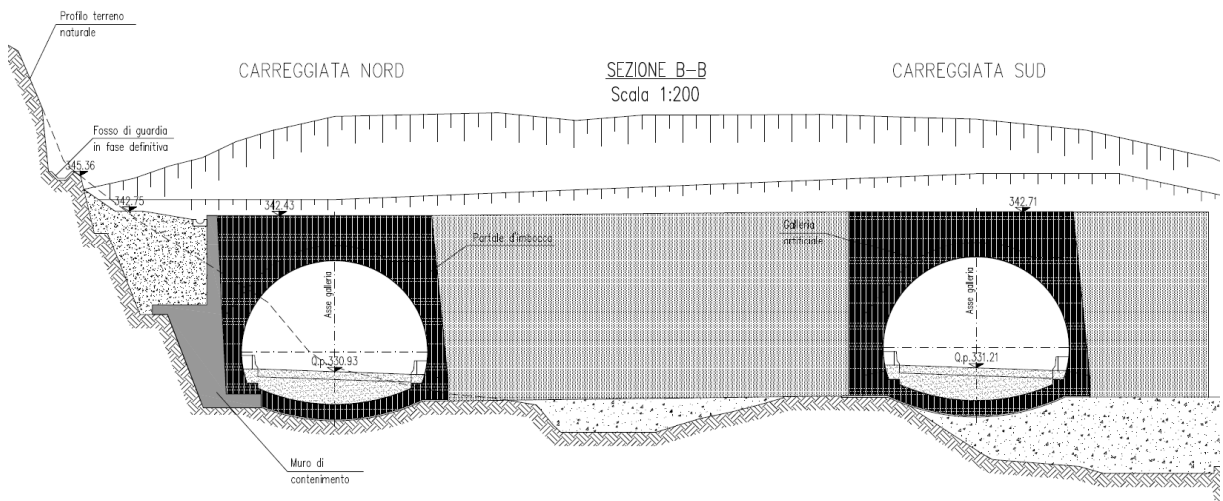


Figura 9 - Galleria artificiale

4.2.1 Fasi esecutive

Per l'are di imbocco, sono state individuate 3 macro fasi:

- Fase 1: riprofilatura del versante e intervento di chiodatura;
- Fase 2: realizzazione della dima e scavo delle due canne;
- Fase 3: realizzazione dei muri di contenimento e ritombamento finale.

5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L’imbocco sud della Galleria “Pedescala” 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 di progetto e, per un approfondimento, si rimanda alla relazione geologica e geotecnica.

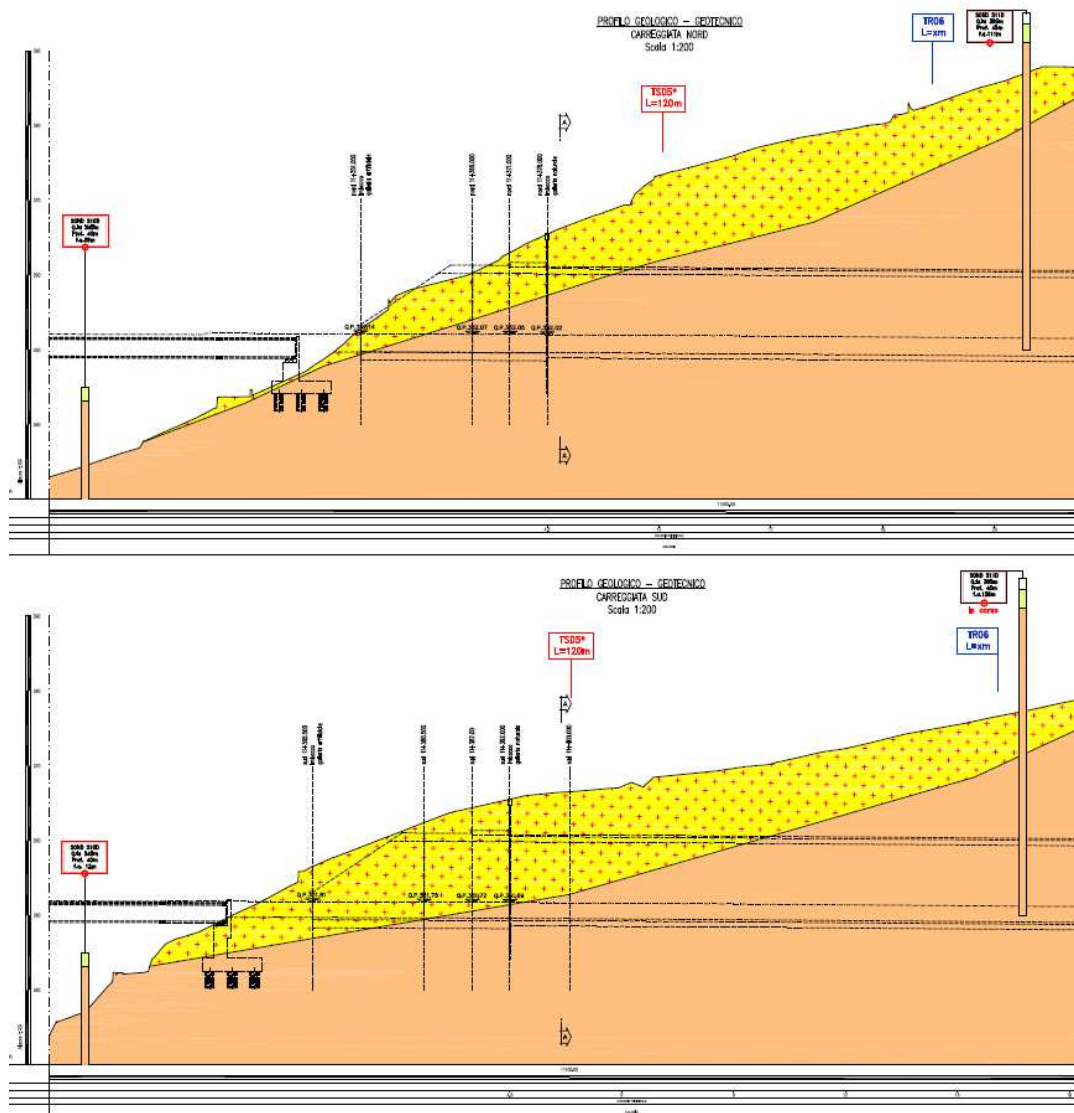


Figura 10 - Stratigrafia imbocco sud

L’imbocco nord della Galleria “Pedescala” 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 di progetto e, per un approfondimento, si rimanda alla relazione geologica e geotecnica.

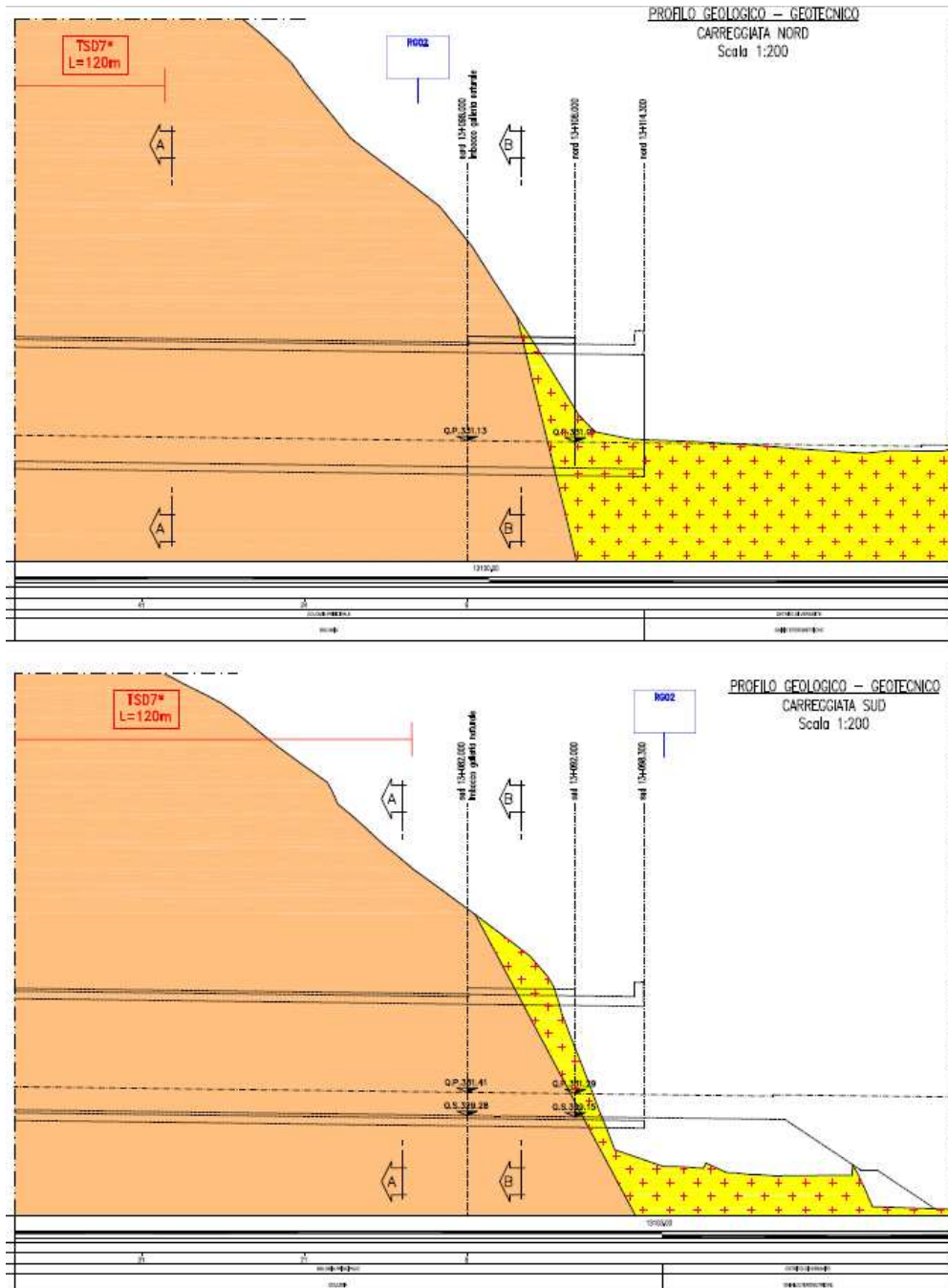


Figura 11 - Stratigrafia imbocco nord

6 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

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

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

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

- Massimo rapporto a/c 0.5
- Cemento CEMIV 32.5R – 42.5R
- Minimo contenuto in cemento 340kg/m³
- 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 5.3 m sul concio d'attacco e di 4.5 m sulla galleria artificiale, mentre all'imbocco nord la copertura arriva a 8 m sul concio d'attacco (decrecendo rapidamente) e a 4 m sulla galleria artificiale.

In fase di verifica, si procederà all'analisi delle sezioni rappresentative all'imbocco sud, che risultano 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 dreni.

7.3 CARICO SISMICO

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

L'incremento di spinta del terreno, applicata lateralmente ad un solo lato della struttura come pressione equivalente, è stato stimato utilizzando la seguente formula, in cui compaiono il peso del terreno γ , l'altezza del calotta H_{cal} e l'altezza del ricoprimento H_{cop} :

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

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

In accordo a quanto dichiarato nella relazione sismica J16L1_03_09_01_001_0101_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 $a_g = 0.205$ g.

In SLD, $a_g = 0.089$ g.

Il coefficiente sismico orizzontale (k_h) viene calcolato come:

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

dove:

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

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

All'imbocco sud, con sottosuolo di tipo A, S_S è pari a 1 e 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. Anche all'imbocco nord, in direzione della sezione di scavo, S_S e S_T sono pari ad 1.

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

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

$$PP_h = PP \cdot k_h$$

$$PP_v = PP \cdot k_v$$

8 CRITERI DI VERIFICA

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

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

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

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

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d è il valore di progetto dell’azione pari all’azione nominale moltiplicata per il coefficiente parziale per le azioni γ , 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)

γ_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)

γ_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 θ 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 σ_{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;

α angolo di inclinazione dell’armatura trasversale rispetto all’asse della trave;

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

α_c coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrature non compresse

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

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

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

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

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

dove:

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

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

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

8.2.1 Verifica a Fessurazione

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Stato limite di apertura delle fessure

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

$$w_d = 1.7 w_m$$

dove w_m , rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

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

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

Per il calcolo di ϵ_{sm} , e Δ_{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 Δ_{sm} e ϵ_{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 Δ_{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);

Φ = diametro delle barre (mm);

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

$k_3 = 0.125$, per diagramma delle σ 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 ϵ_{sm} può valutarsi secondo la seguente espressione che tiene conto della collaborazione del calcestruzzo teso che la circonda:

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

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

σ_{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 Pedescala.

Il primo modello “Concio d’attacco”, in corrispondenza del concio d’attacco, considera una copertura pari a 5.3m e non tiene conto della dima, con sola funzione di protezione degli operatori in fase di sfondo della paratia d’imbocco e nelle altre fasi realizzative.

Il secondo modello “GA”, in corrispondenza della galleria artificiale, considera una copertura pari a 4.5m.

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 0.36.
- step 1: attivazione dell’arco rovescio.
- step 2: attivazione della calotta.
- step 3: ritombamento fino alla sistemazione definitiva.
- step 4: applicazione delle spinte in fase sismica SLV.
- step 4b (dipendente da step 3): applicazione delle spinte in fase sismica SLD.

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

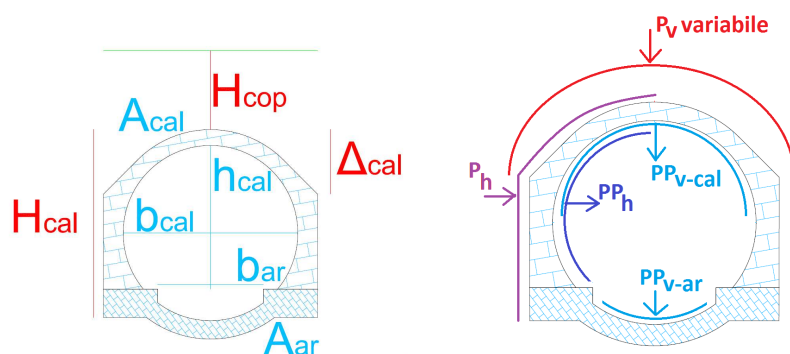


Figura 12 - Definizione del carico sismico

Spinta terreno orizzontale			Spinta terreno verticale		
H_{cal}	11.1	[m]	$P_v \times Flac$	12.0	[kPa]
H_{cop}	5.3	[m]	Δ_{cal}	7.8	[m]
γ	22	[kN/m ³]	$\Delta P_v \times Flac$	17.6	[kPa]
S_h	1213.0	[kN]			
$P_h \times Flac$	109.3	[kPa]			
A_{cal}	26.2	[m ²]			
A_{AR}	16.4	[m ²]			
Inerzia riv. orizzontale			Inerzia riv. orizzontale		
PP_h	109.2	[kN]	PP_{v-cal}	67.1	[kN]
h_{cal}	9	[m]	b_{cal}	13.5	[m]
$PP_h \times Flac$	12.1	[kPa]	$PP_{v-cal} \times Flac$	5.0	[kPa]
			PP_{v-ar}	42.0	[kN]
			b_{ar}	11.2	[m]
			$PP_{v-ar} \times Flac$	3.8	[kPa]

Tabella 1: Carico sismico SLV – Modello 1 – Concio d'attacco

Spinta terreno orizzontale			Spinta terreno verticale		
H_{cal}	11.1	[m]	$P_v \times Flac$	5.2	[kPa]
H_{cop}	5.3	[m]	Δ_{cal}	7.8	[m]
γ	22	[kN/m ³]	$\Delta P_v \times Flac$	7.6	[kPa]
S_h	526.6	[kN]			
$P_h \times Flac$	47.4	[kPa]			
A_{cal}	26.2	[m ²]			
A_{AR}	16.4	[m ²]			
Inerzia riv. orizzontale			Inerzia riv. orizzontale		
PP_h	47.4	[kN]	PP_{v-cal}	29.1	[kN]
h_{cal}	9	[m]	b_{cal}	13.5	[m]
$PP_h \times Flac$	5.3	[kPa]	$PP_{v-cal} \times Flac$	2.2	[kPa]
			PP_{v-ar}	18.2	[kN]
			b_{ar}	11.2	[m]
			$PP_{v-ar} \times Flac$	1.6	[kPa]

Tabella 2: Carico sismico SLD – Modello 1 – Concio d'attacco

Spinta terreno orizzontale			Spinta terreno verticale		
H_{cal}	11.2	[m]	$P_v \times Flac$	10.1	[kPa]
H_{cop}	4.5	[m]	Δ_{cal}	5.5	[m]
γ	22	[kN/m ³]	$\Delta P_v \times Flac$	12.4	[kPa]
S_h	1111.7	[kN]			
$P_h \times Flac$	99.3	[kPa]			
A_{cal}	34.9	[m ²]			
A_{AR}	21.2	[m ²]			
Inerzia riv. orizzontale			Inerzia riv. orizzontale		
PP_h	143.8	[kN]	PP_{v-cal}	89.4	[kN]
h_{cal}	9	[m]	b_{cal}	13.5	[m]
$PP_h \times Flac$	16.0	[kPa]	$PP_{v-cal} \times Flac$	6.6	[kPa]
			PP_{v-ar}	54.3	[kN]
			b_{ar}	11.2	[m]
			$PP_{v-ar} \times Flac$	4.9	[kPa]

Tabella 3: Carico sismico SLV – Modello 2 – GA

Spinta terreno orizzontale			Spinta terreno verticale		
H_{cal}	11.2	[m]	$P_v \times Flac$	4.4	[kPa]
H_{cop}	4.5	[m]	Δ_{cal}	5.5	[m]
γ	22	[kN/m ³]	$\Delta P_v \times Flac$	5.4	[kPa]
S_h	482.6	[kN]			
$P_h \times Flac$	43.1	[kPa]			
A_{cal}	34.9	[m ²]			
A_{AR}	21.2	[m ²]			
Inerzia riv. orizzontale			Inerzia riv. orizzontale		
PP_h	62.4	[kN]	PP_{v-cal}	38.8	[kN]
h_{cal}	9	[m]	b_{cal}	13.5	[m]
$PP_h \times Flac$	6.9	[kPa]	$PP_{v-cal} \times Flac$	2.9	[kPa]
			PP_{v-ar}	23.6	[kN]
			b_{ar}	11.2	[m]
			$PP_{v-ar} \times Flac$	2.1	[kPa]

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 “Cappellaccio”, e 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]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ϕ [°]	c' [kPa]
Ritombamento	0 - 17	22*	50	30	0
Cappellaccio	> 17	26	2800	40	70

Tabella 5: Stratigrafia per Pedescala 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 14m di diametro, il modello ha una larghezza di 95m e un’altezza di 45m.

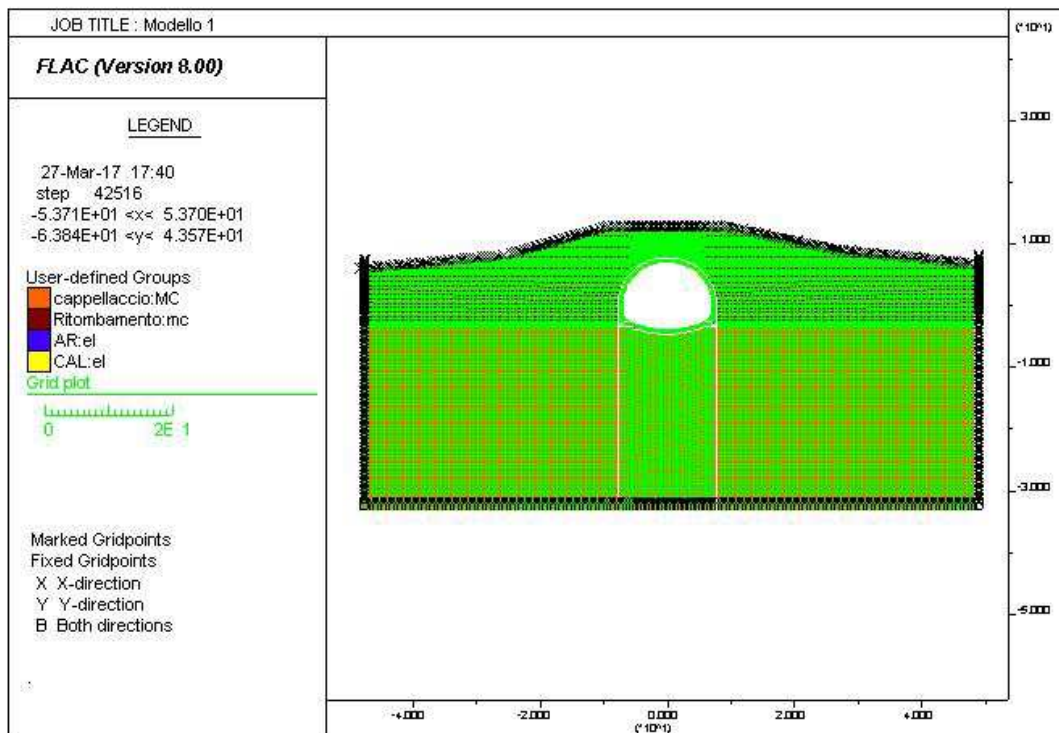


Figura 13 - Modello “Concio d’attacco”

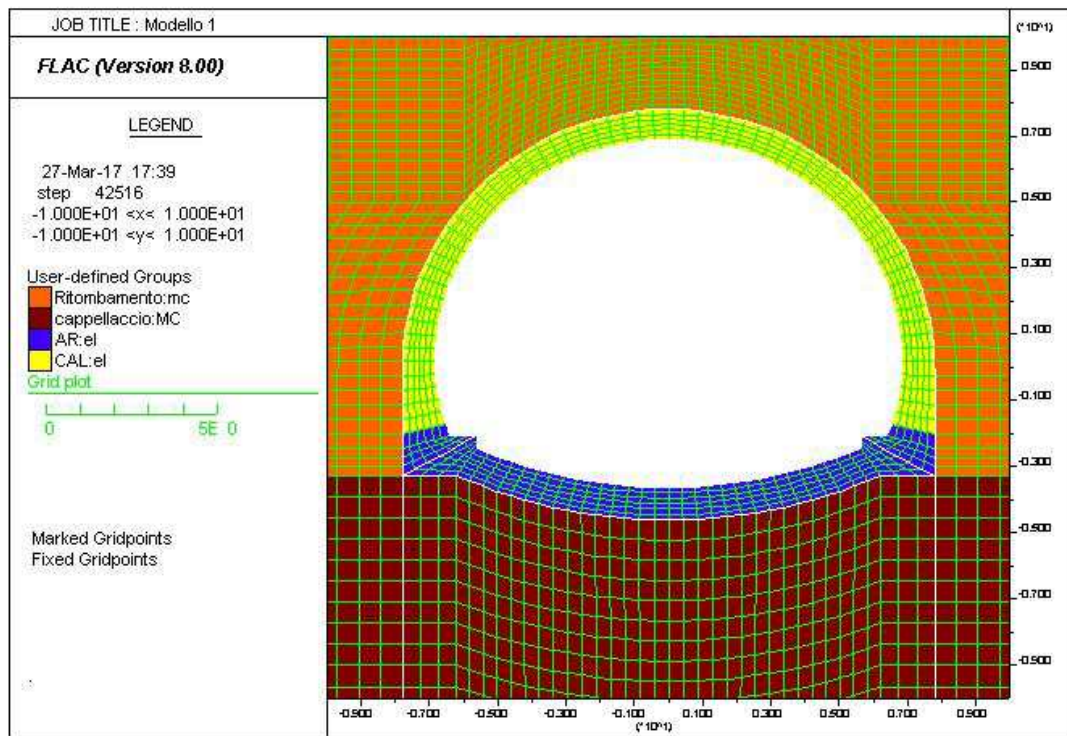


Figura 14 - Modello “Concio d’attacco” - particolare

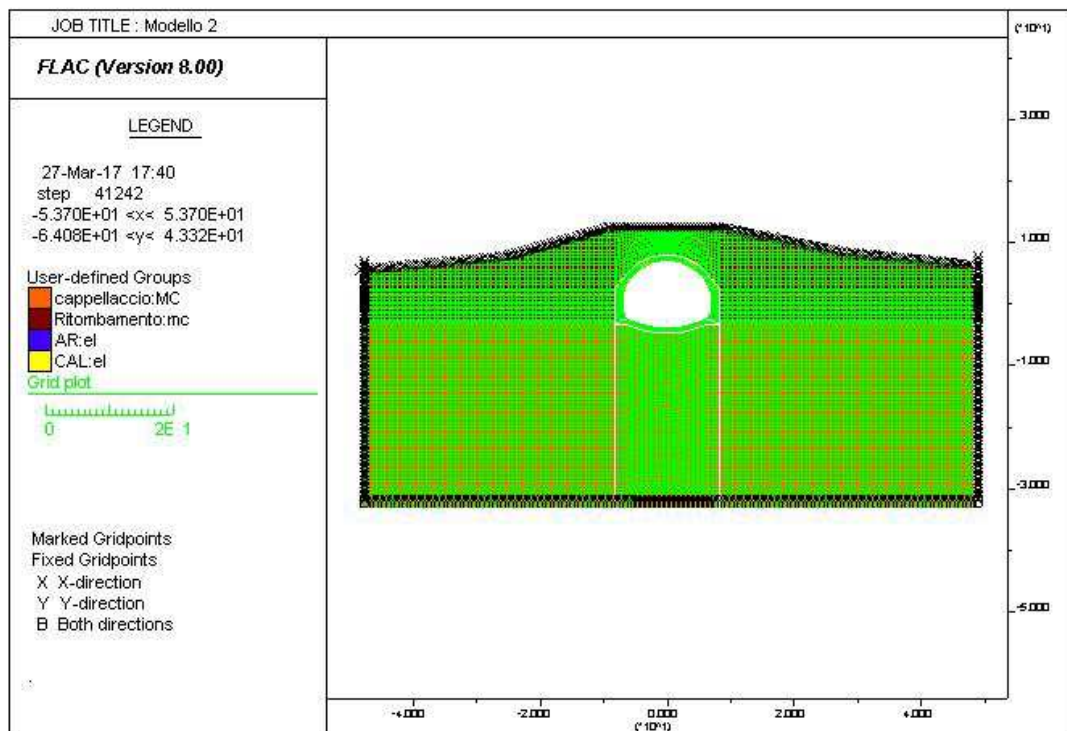


Figura 15 - Modello “GA”

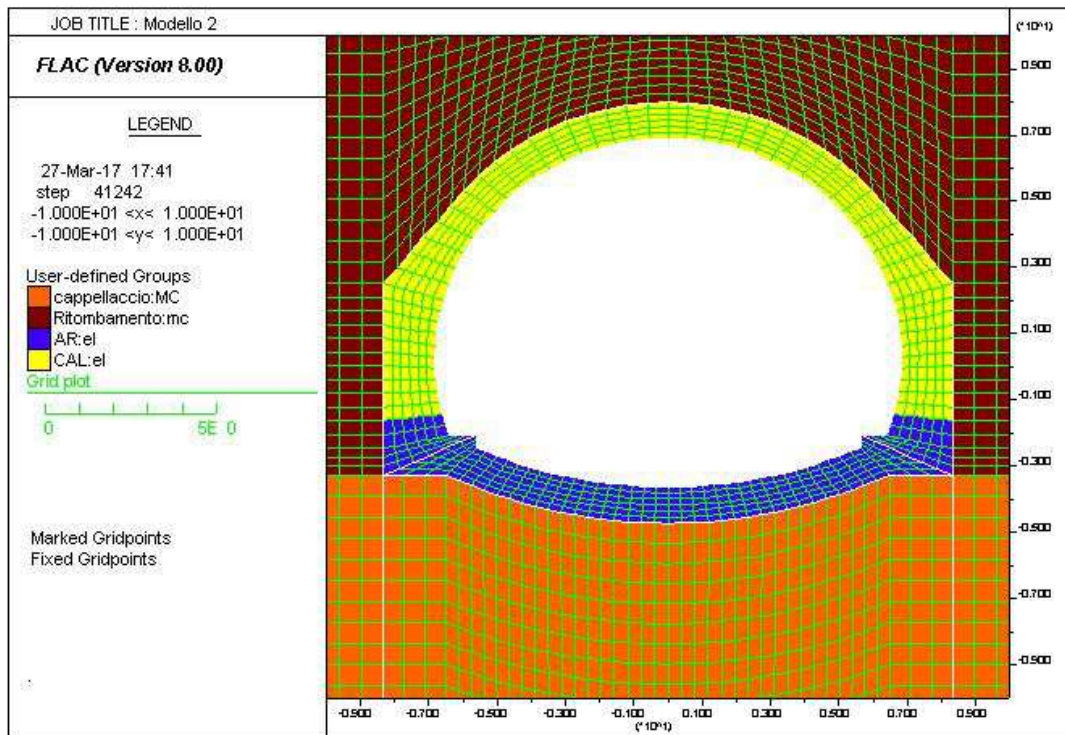


Figura 16 - Modello "GA" - particolare

10 MODELLO 1 – Concio d’attacco

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
Calotta	0.96	5.04	4.38
Arco rovescio	0.26	1.00	1.11
Convergenza radiale	0.7	4.04	3.27

Tabella 6: Spostamento verticale [mm]

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

10.2 *Verifiche a pressoflessione*

In calotta e in arco rovescio si prevedono dei ferri $\varnothing 24$ ogni 20cm 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

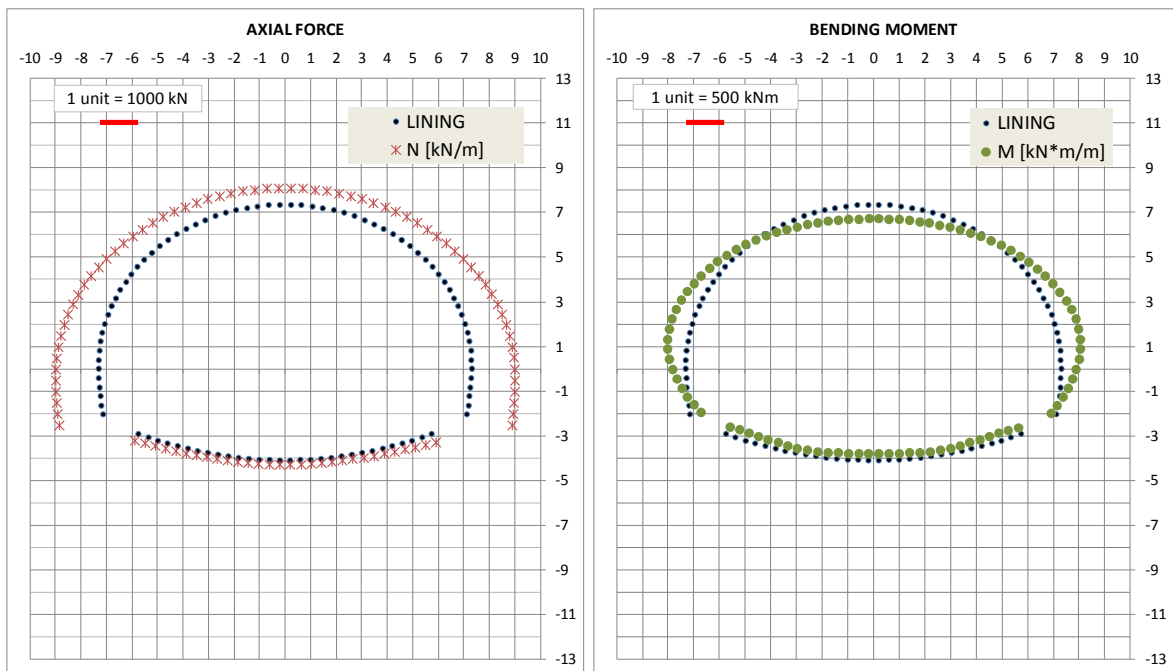


Figura 17 - Diagrammi N e M – Step 3

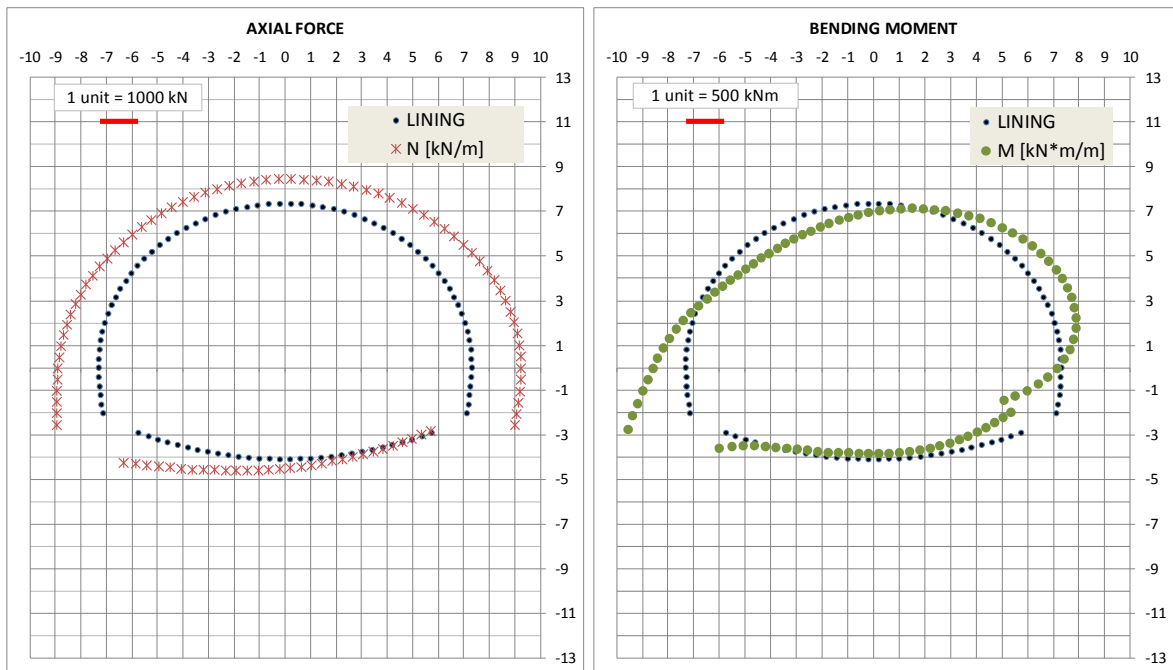


Figura 18 - Diagrammi N e M – Step 4

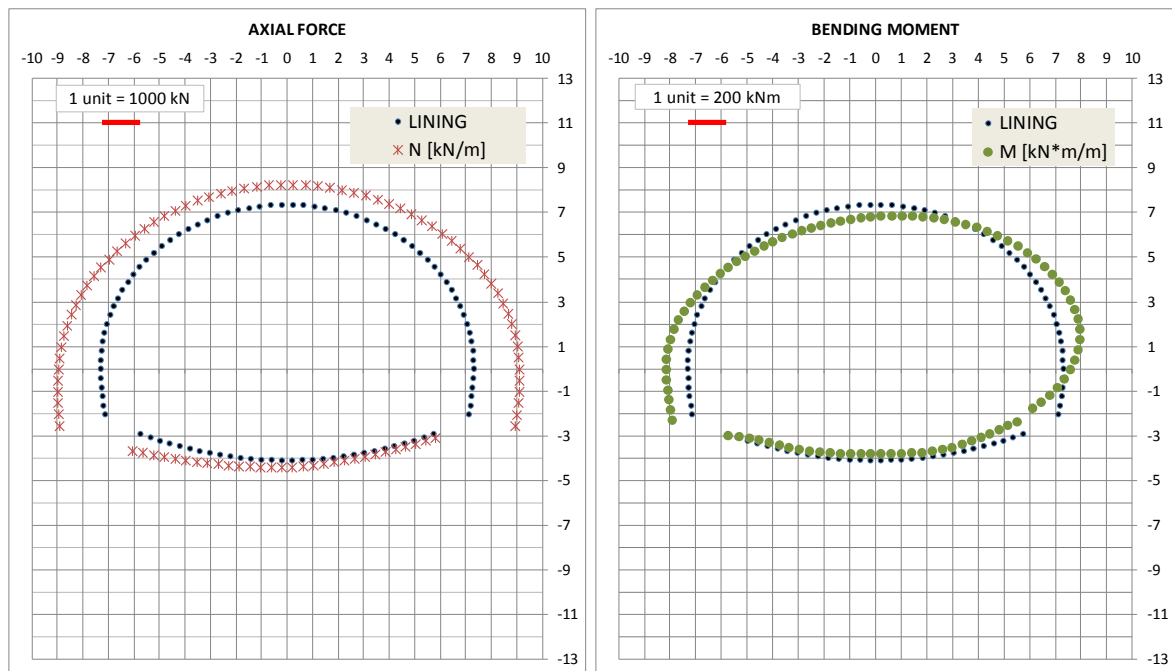


Figura 19 - Diagrammi N e M – Step 4b

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 ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	0.98	22.62	22.62	7.60	7.60	-2164	345	1635	4.7
ren2	0.92	22.62	22.62	7.60	7.60	-1953	551	1448	2.6
cal	0.90	22.62	22.62	7.60	7.60	-942	-401	-1053	2.6
ren	0.92	22.62	22.62	7.60	7.60	-1974	541	1455	2.7
pie	0.98	22.62	22.62	7.60	7.60	-2208	376	1651	4.4
ar	1.01	22.62	22.62	7.60	7.60	-354	-253	-962	3.8

Tabella 7: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

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

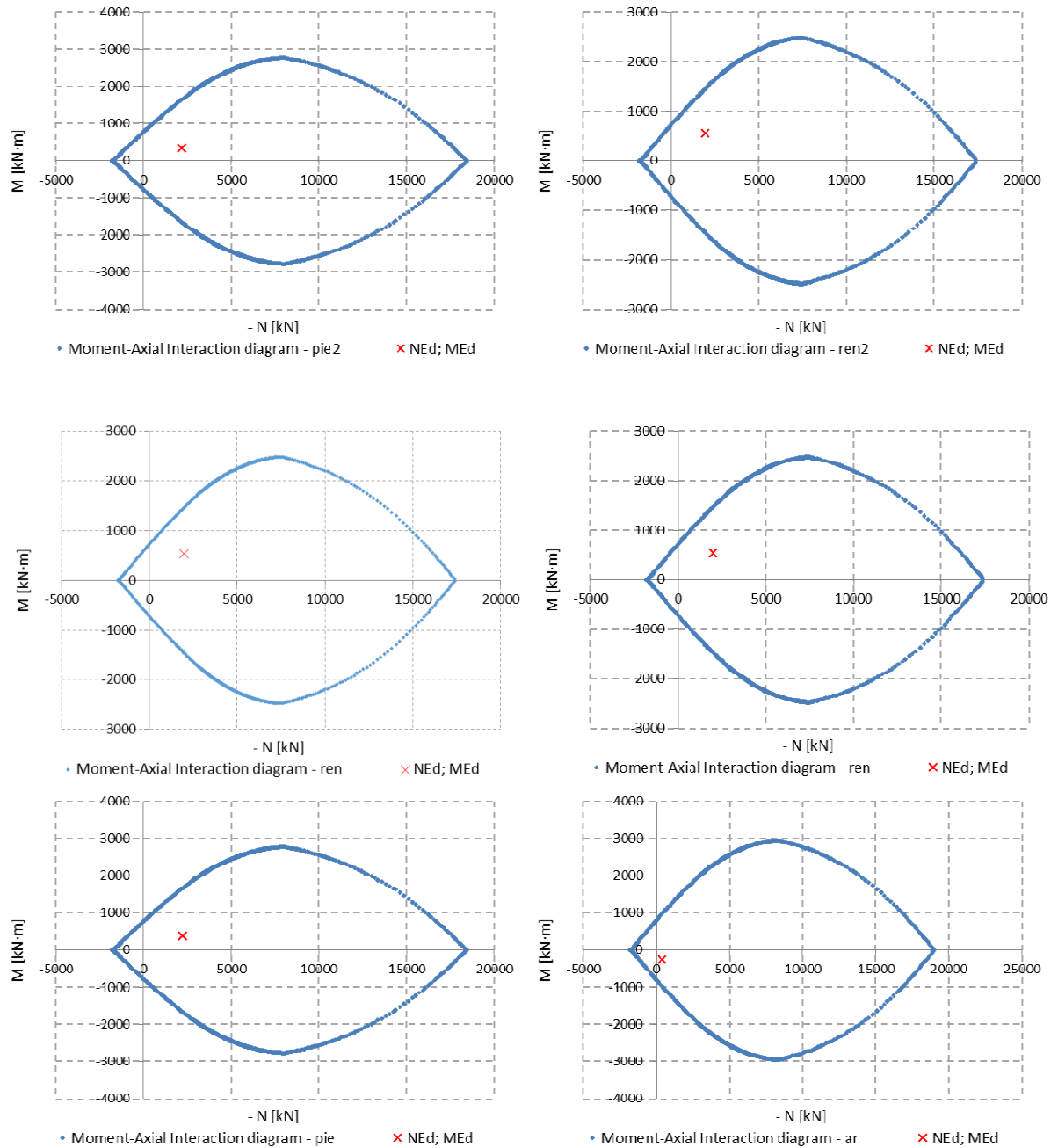


Figura 20 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.25	22.62	22.62	7.60	7.60	-1812	1127	1985	1.8
ren2	0.96	22.62	22.62	7.60	7.60	-1547	561	1377	2.5
cal	0.90	22.62	22.62	7.60	7.60	-1073	-389	-1100	2.8
ren	0.90	22.62	22.62	7.60	7.60	-1686	507	1322	2.6

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

pie	1.38	22.62	22.62	7.60	7.60	-1959	-1084	-2289	2.1
ar	1.02	22.62	22.62	7.60	7.60	67	-511	-782	1.5

Tabella 8: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

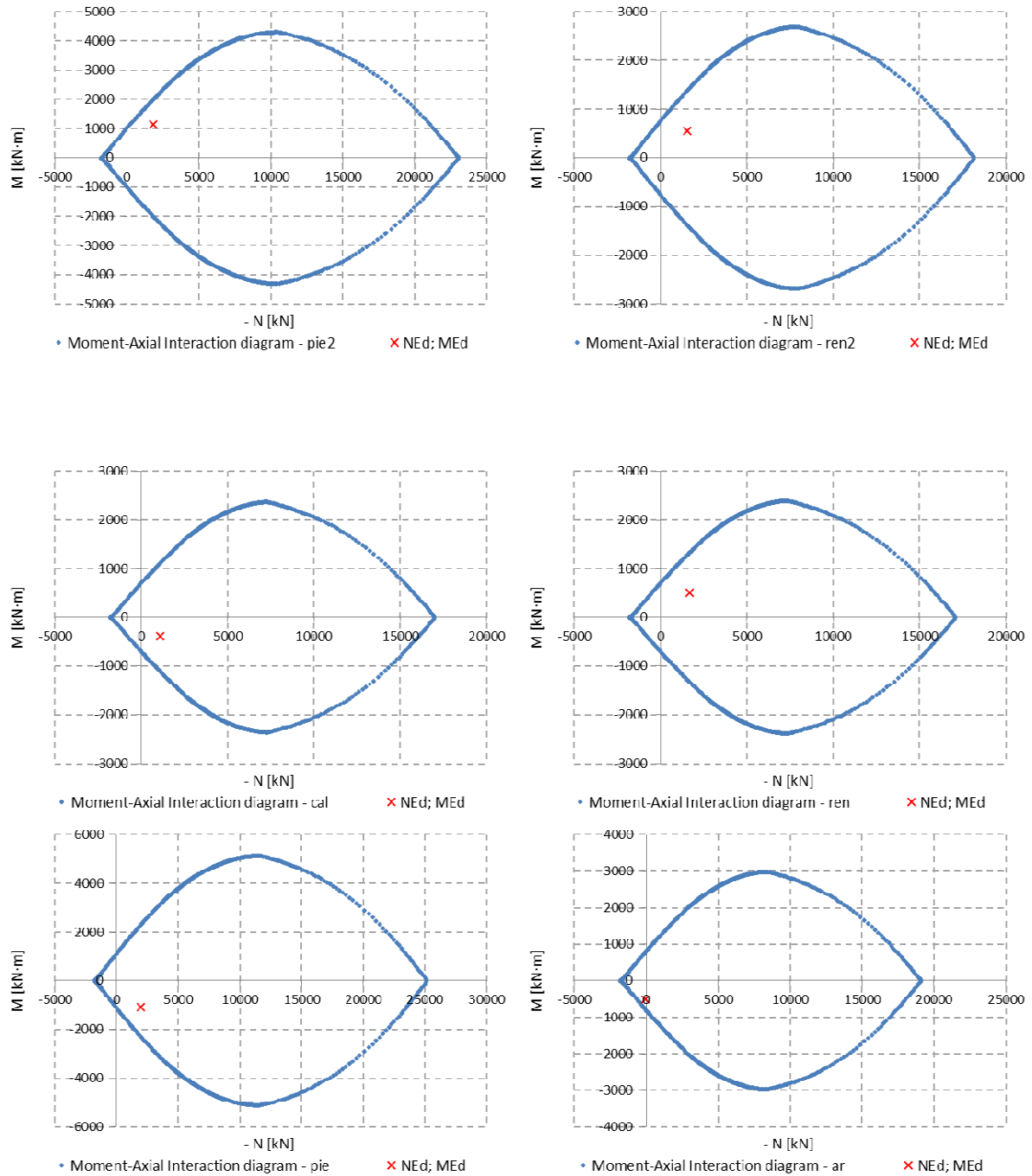


Figura 21 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

10.2.2 Stato Limite di Esercizio

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati delle verifiche condotte (negativi gli sforzi di compressione), tutte con esito positivo.

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	σ_c	σ_s	wk
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	0.98	22.62	22.62	7.6	7.6	-1664.4	265.0	-3.0	-5.6	0.00
ren2	0.92	22.62	22.62	7.6	7.6	-1456.5	412.9	-4.4	22.4	0.02
cal	0.90	22.62	22.62	7.6	7.6	-724.4	-308.4	-3.5	50.9	0.07
ren	0.92	22.62	22.62	7.6	7.6	-1518.6	416.0	-4.4	19.6	0.02
pie	0.98	22.62	22.62	7.6	7.6	-1698.6	289.0	-3.2	-4.4	0.00
ar	1.01	22.62	22.62	7.6	7.6	-272.4	-194.6	-1.9	46.5	0.08

Tabella 9: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	σ_c	σ_s
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]
pie2	0.98	22.62	22.62	7.6	7.6	-1637.8	431.4	-4.1	12.3
ren2	0.95	22.62	22.62	7.6	7.6	-1565.6	420.4	-4.2	15.6
cal	0.90	22.62	22.62	7.6	7.6	-889.8	-287.9	-3.2	25.4
ren	0.91	22.62	22.62	7.6	7.6	-1572.0	424.3	-4.6	20.3
pie	1.38	22.62	22.62	7.6	7.6	-1886.9	-542.5	-2.9	1.5
ar	1.02	22.62	22.62	7.6	7.6	-172.9	-300.3	-2.9	116.9

Tabella 10: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4b

10.3 Verifiche a taglio

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

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	σ_{cp}	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm ²]	[cm ²]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	572	-2319	1302	1.392	2261.9	13781	-1.682	697	725	1.27
ren2	-233	-1417	824	1.493	2261.9	8997	-1.575	486	473	2.09
cal	-182	-1096	821	1.494	2261.9	8968	-1.222	441	428	2.43
ren	232	-1418	824	1.493	2261.9	8997	-1.577	486	473	2.10
pie	-536	-2380	1302	1.392	2261.9	13781	-1.727	706	733	1.37
ar	-107	-539	945	1.460	2261.9	10206	-0.528	387	383	3.63

Tabella 11: Verifica a taglio – Step 3

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	σ_{cp}	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm ²]	[cm ²]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	-264	-1589	904	1.470	2261.9	9804	-1.621	525	519	1.99
ren2	-291	-1390	845	1.487	2261.9	9210	-1.510	486	475	1.67
cal	166	-1249	821	1.494	2261.9	8968	-1.392	462	449	2.78
ren	-425	-1930	889	1.474	2261.9	9649	-2.000	569	561	1.34
pie	-731	-1946	1177	1.412	2261.9	12528	-1.554	624	640	0.88
ar	301	-1451	945	1.460	2261.9	10206	-1.421	513	510	1.71

Tabella 12: Verifica a taglio – Step 4

ELEMENT	VEk	d	z	Φ_w	n. equ. arm/m	Asw	θ	Vrd,steel	Vrd,cls	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ² /m]	[°]	[kN]	[kN]	[-]
pie	-731	1177	1059	14	8.3	1282.8	35	759	4334	1.04

Tabella 13: Verifica a taglio – Step 4 – con spilli

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
Calotta	0.82	3.94	3.72
Arco rovescio	0.33	1.12	1.25
Convergenza radiale	0.49	2.82	2.47

Tabella 14: 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 20cm 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

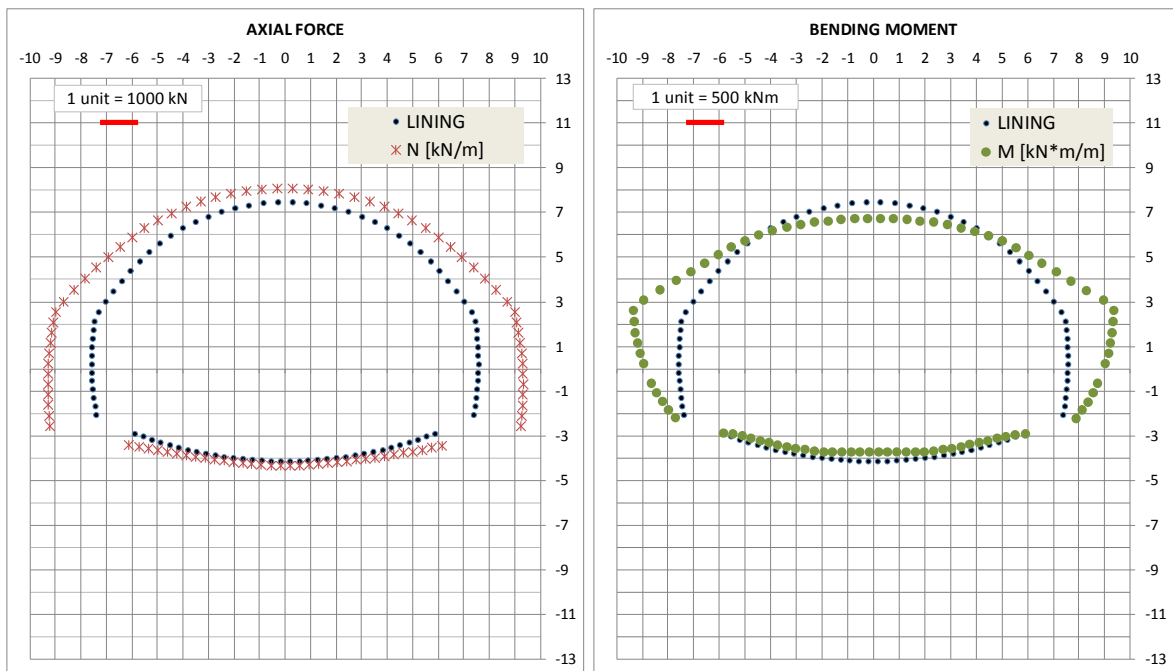


Figura 22 - Diagrammi N e M – Step 3

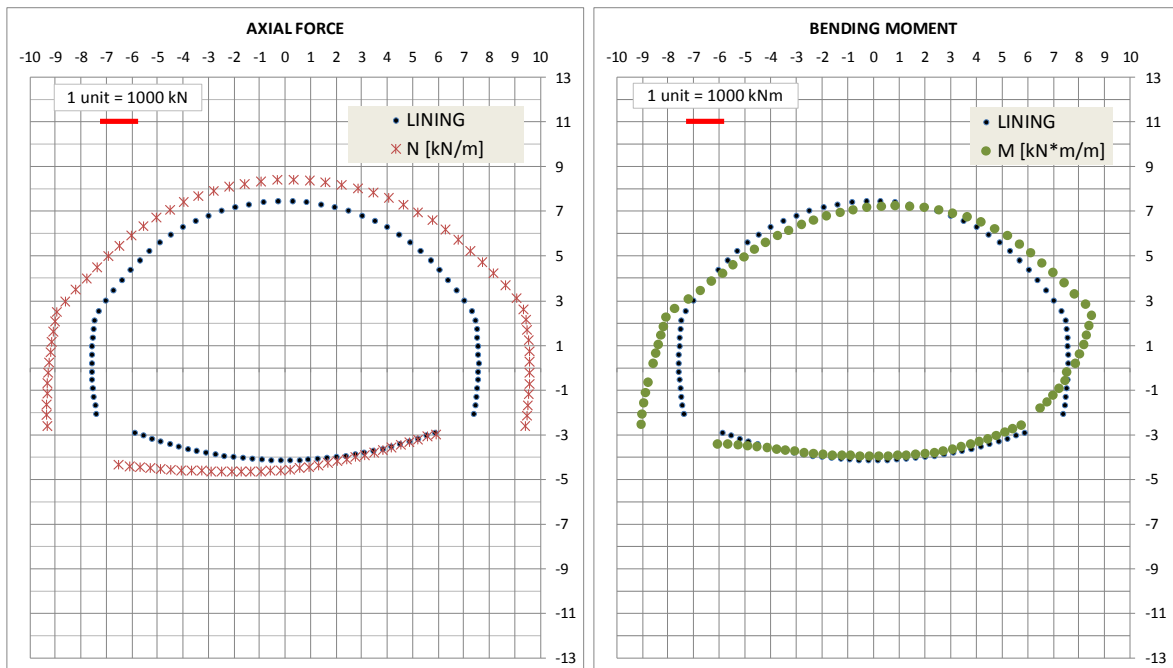


Figura 23 - Diagrammi N e M – Step 4

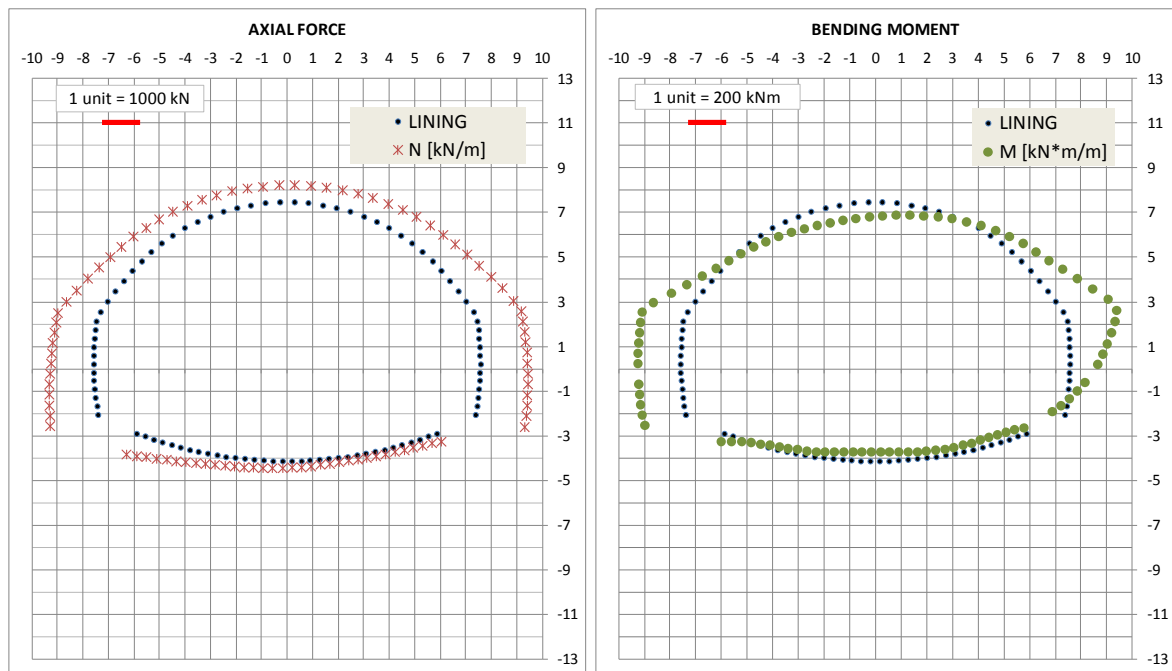


Figura 24 - Diagrammi N e M – Step 4b

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.

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[KN·m]	[-]
pie2	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2234	818	2731	3.3
ren2	1.68	22.62	22.62	7.60	7.60	-2072	1215	2926	2.4
cal	1.10	22.62	22.62	7.60	7.60	-803	-453	-1261	2.8
ren	1.68	22.62	22.62	7.60	7.60	-2096	1205	2943	2.4
pie	1.52	22.62	22.62	7.60	7.60	-2273	851	2755	3.2
ar	1.11	22.62	22.62	7.60	7.60	-252	-289	-1011	3.5

Tabella 15: Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

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

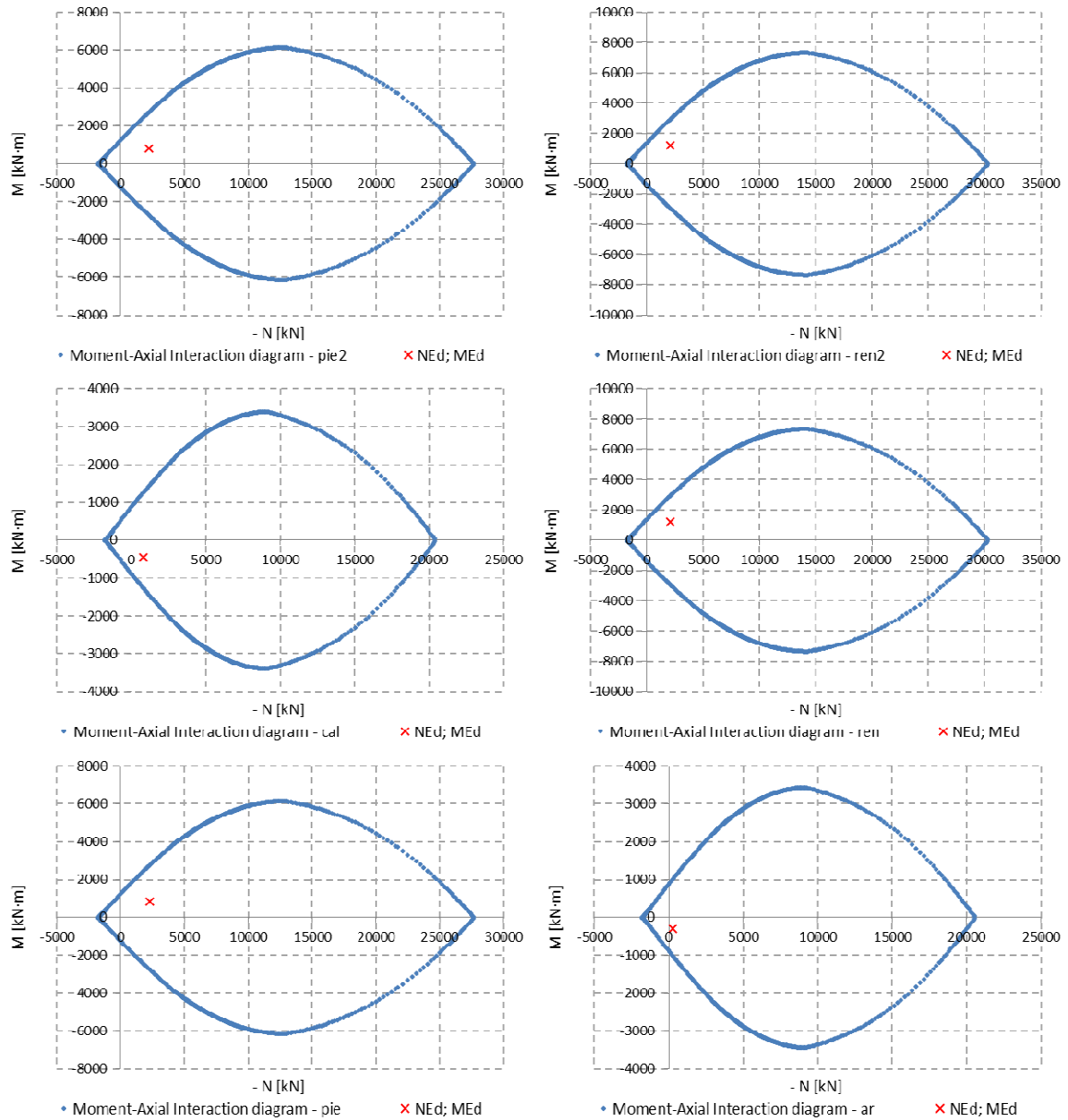


Figura 25 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	MRd	MRd/MEd
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[kN·m]	[-]
pie2	1.78	22.62	22.62	7.60	7.60	-1936	1625	3020	1.9
ren2	1.51	22.62	22.62	7.60	7.60	-1660	1039	2349	2.3
cal	1.10	22.62	22.62	7.60	7.60	-946	-437	-1330	3.0
ren	1.34	22.62	22.62	7.60	7.60	-1634	756	2042	2.7
pie	1.90	22.62	22.62	7.60	7.60	-2093	-967	-3359	3.5

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

ar	1.18	22.62	22.62	7.60	7.60	-84	-391	-997	2.6
----	------	-------	-------	------	------	-----	------	------	-----

Tabella 16: Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

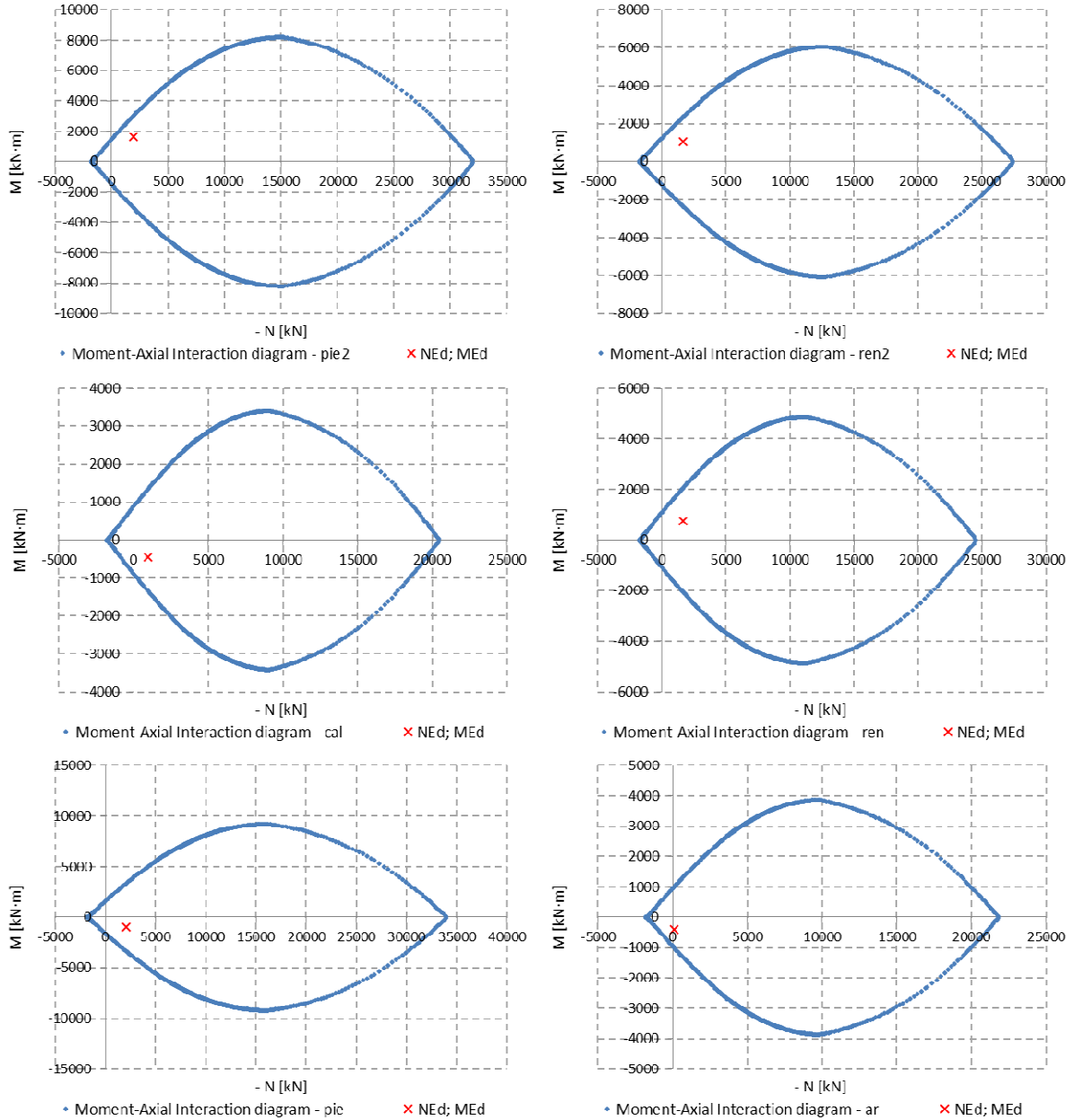


Figura 26 - Verifica a pressoflessione SLU – Step 4

11.2.2 Stato Limite di Esercizio

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati delle verifiche condotte (negativi gli sforzi di compressione), tutte con esito positivo.

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

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	σ_c	σ_s	wk
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1718.7	629.0	-2.6	5.8	0.01
ren2	1.68	22.62	22.62	7.6	7.6	-1594.1	934.5	-3.2	30.9	0.05
cal	1.10	22.62	22.62	7.6	7.6	-617.3	-348.6	-2.8	50.4	0.08
ren	1.68	22.62	22.62	7.6	7.6	-1612.1	926.8	-3.2	28.9	0.05
pie	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1748.1	654.4	-2.7	6.8	0.01
ar	1.11	22.62	22.62	7.6	7.6	-194.2	-222.5	-1.9	64.0	0.12

Tabella 17: Verifica a pressoflessione SLE – Step 3

ELEMENT	Height	As	As'	d	d'	NEk	MEk	σ_c	σ_s	wk
[m]	[m]	[cm ²]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[mm]
pie2	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1724.6	-842.7	-3.4	24.8	0.04
ren2	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1655.7	843.8	-3.5	28.4	0.04
cal	1.10	22.62	22.62	7.6	7.6	-765.6	-336.1	-2.6	29.5	0.04
ren	1.51	22.62	22.62	7.6	7.6	-1516.1	758.5	-3.2	25.3	0.04
pie	1.52	22.62	22.62	7.6	7.6	-1865.0	-411.4	-2.1	-4.6	0.00
ar	1.09	22.62	22.62	7.6	7.6	-265.2	-214.4	-1.8	49.0	0.09

Tabella 18: Verifica a pressoflessione SLE – Step 4b

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	σ_{cp}	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm ²]	[cm ²]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	383	-2435	1823	1.331	2261.9	18992	-1.282	792	869	2.27
ren2	-156	-1186	1028	1.441	2261.9	11043	-1.074	492	495	3.18

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

cal	-171	-1003	1025	1.442	2261.9	11010	-0.911	466	469	2.74
ren	243	-2070	1698	1.343	2261.9	17742	-1.167	722	787	3.23
pie	-340	-2491	1823	1.331	2261.9	18992	-1.311	800	877	2.58
ar	-174	-806	1105	1.426	2261.9	11805	-0.682	451	461	2.66

Tabella 19: Verifica a taglio – Step 3

ELEMENT	VEk	NEk	d	k	Asl	Ac	σ_{cp}	VRd,c	VRd,c,min	VRd,c/Ved
[m]	[kN]	[kN]	[mm]	[-]	[mm ²]	[cm ²]	[MPa]	[kN]	[kN]	[-]
pie2	-437	-1705	1449	1.372	2261.9	15246	-1.118	633	674	1.54
ren2	-448	-1620	1447	1.372	2261.9	15233	-1.064	621	662	1.48
cal	150	-1005	1022	1.442	2261.9	10978	-0.916	465	468	3.13
ren	-338	-2009	1437	1.373	2261.9	15125	-1.328	674	714	2.11
pie	-661	-2093	1823	1.331	2261.9	18992	-1.102	742	820	1.24
ar	109	-46	1065	1.433	2261.9	11408	-0.040	338	345	3.15

Tabella 20: Verifica a taglio – Step 4

12 VERIFICA AL FUOCO

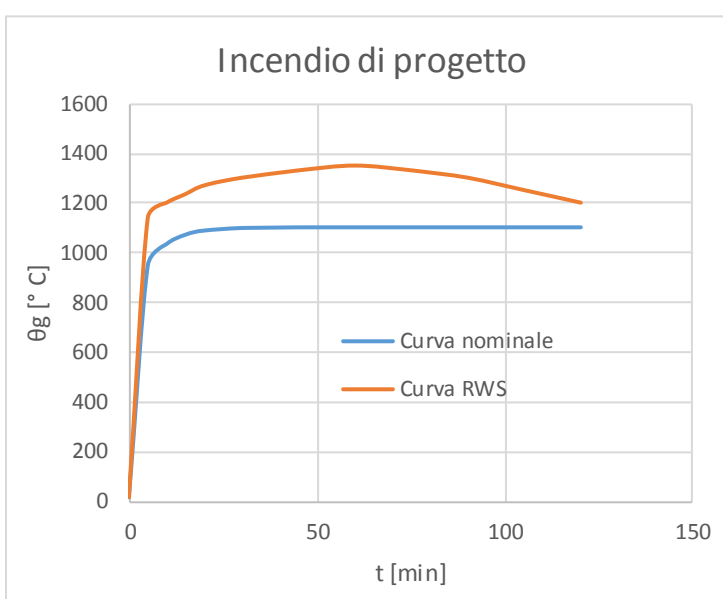
Il rivestimenti definitivi della galleria, ad esclusione dell’arco rovescio, può essere esposto ad un incendio durante la sua vita d’esercizio. Nel seguito si verifica che le strutture previste assicurino il necessario livello di sicurezza in questa combinazione di carico eccezionale.

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]	θ_g [° C]	θ_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 μ_{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 3 del lungo termine.

SEZIONE DI CALCOLO	H [cm]	N _{ek} [kNm/m]	M _{ek} [kN/m]
MODELLO 1 – Concio d’attacco	0.88	-724.4	-308.4
MODELLO 2 - GA	1.08	-617.3	-348.6

Tabella 21: Sezioni di analisi e carichi a metro di galleria

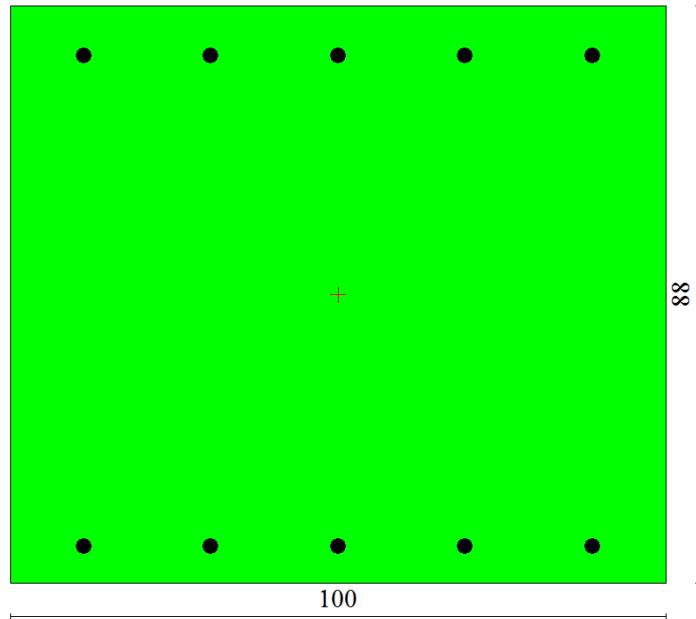


Figura 27 – Sezione di calcolo – Modello 1

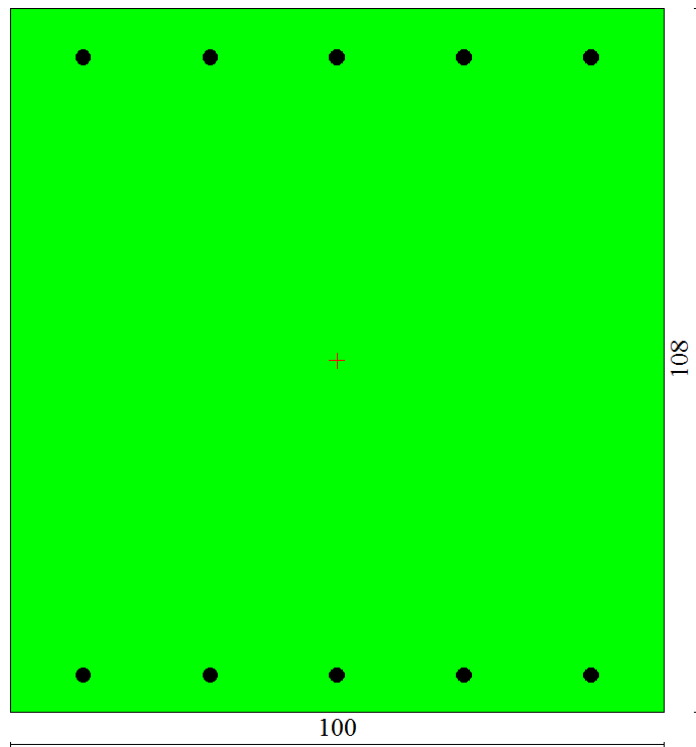


Figura 28 – Sezione di calcolo – Modello 2

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

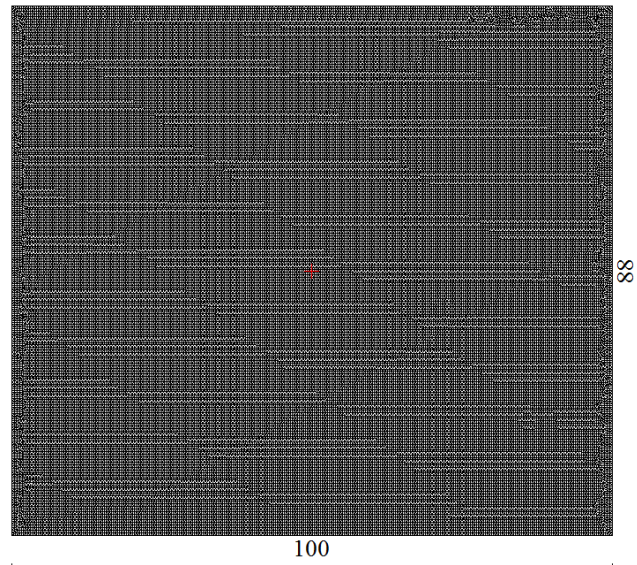


Figura 29 – Mesh di calcolo – Modello 1

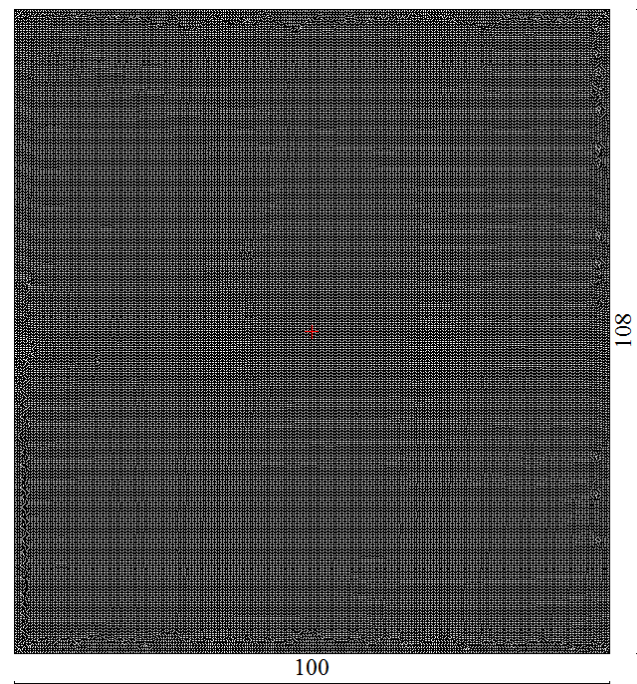


Figura 30 – Mesh di calcolo – Modello 2

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

sicurezza relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali assumono valore unitario nelle condizioni di incendio.

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

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

12.3 Proprietà termiche dei materiali

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

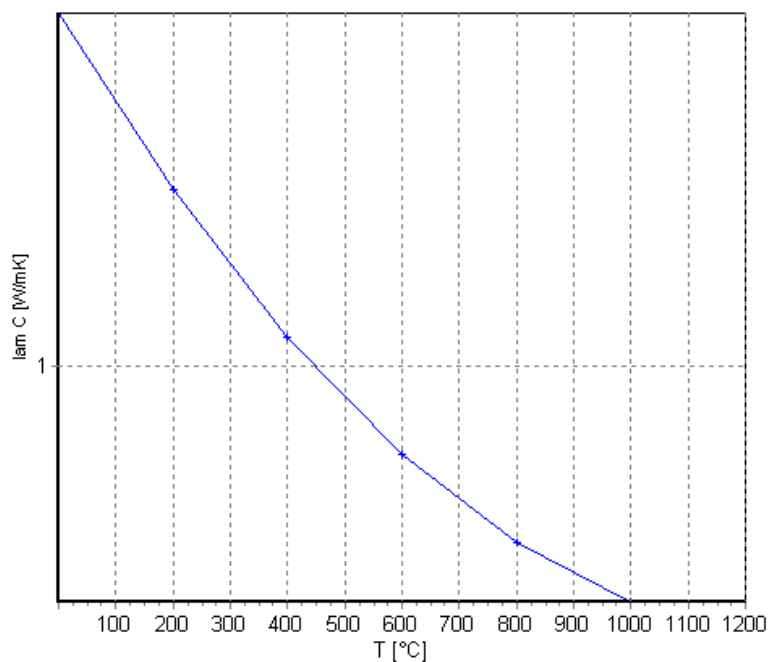


Figura 31 – Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

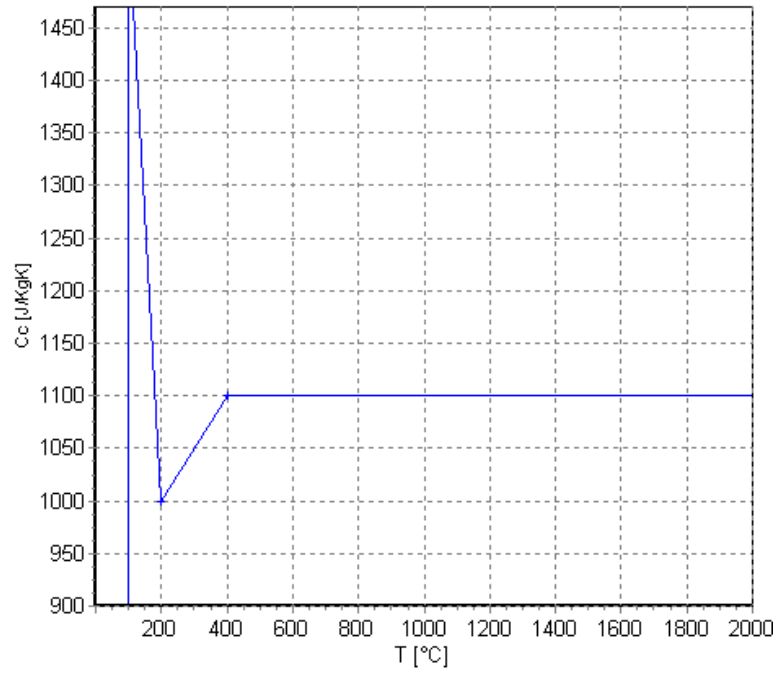


Figura 32 – Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

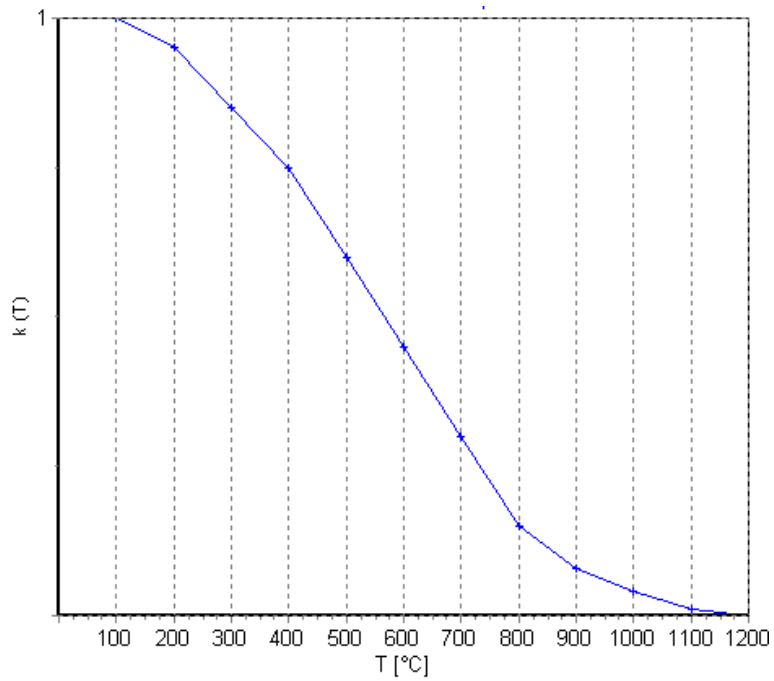


Figura 33 –Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{ck} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

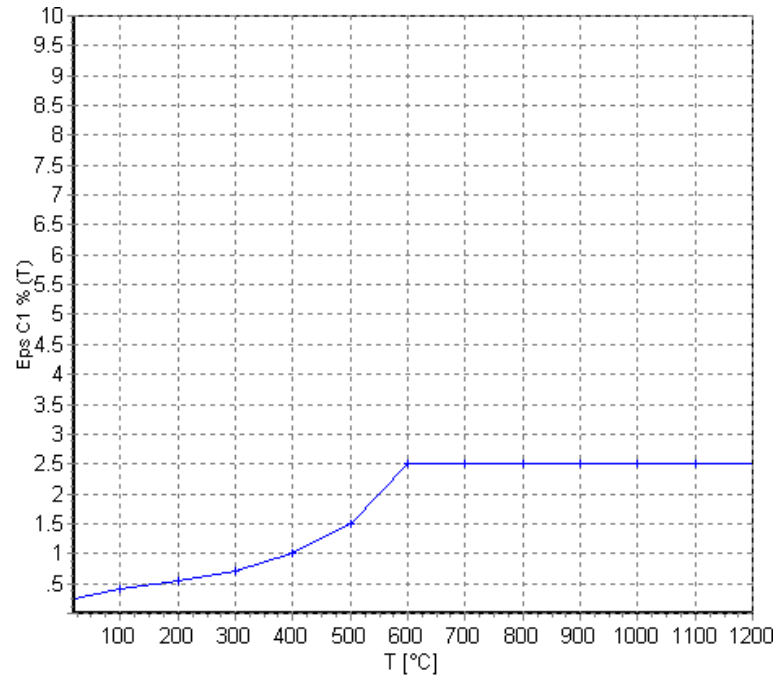


Figura 34 – Fattore di riduzione del valore di ϵ_{c1} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

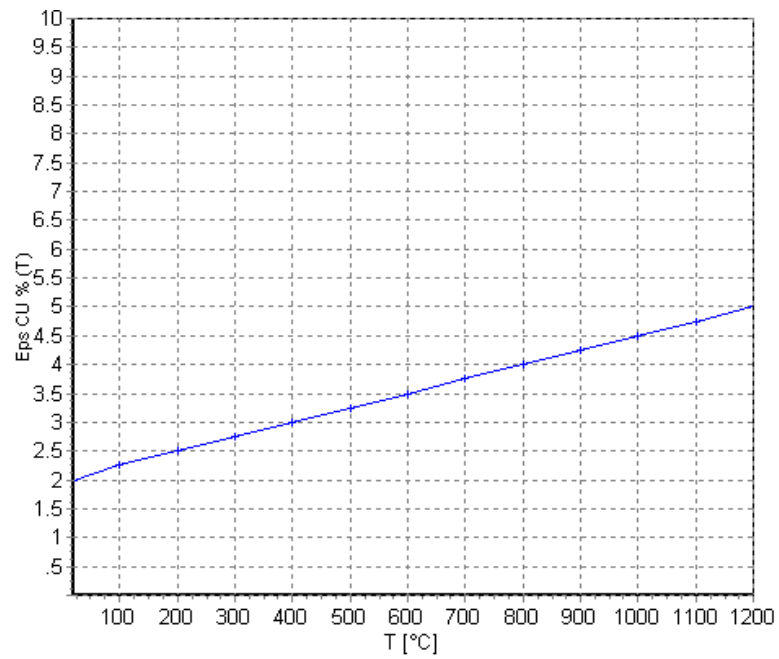


Figura 35 – Fattore di riduzione del valore di ϵ_{cu} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

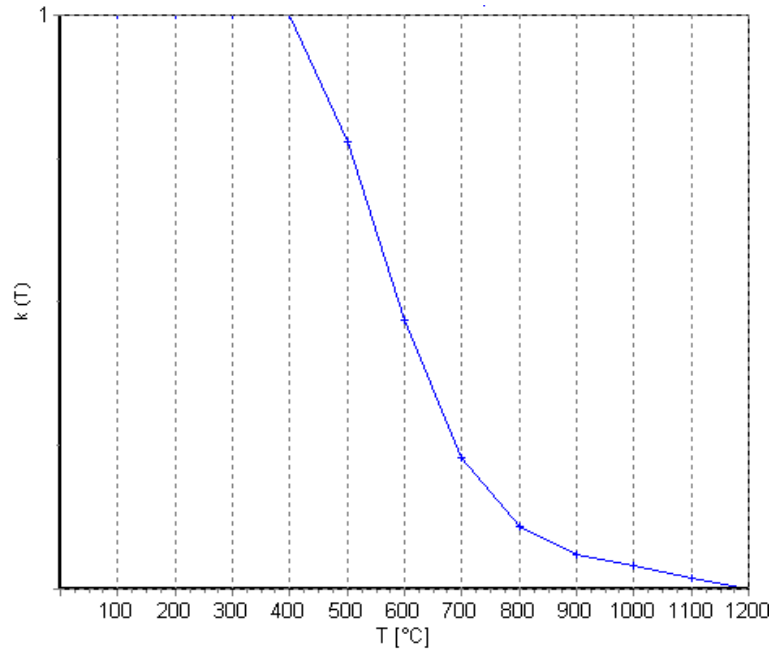


Figura 36 – Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{yk} per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)

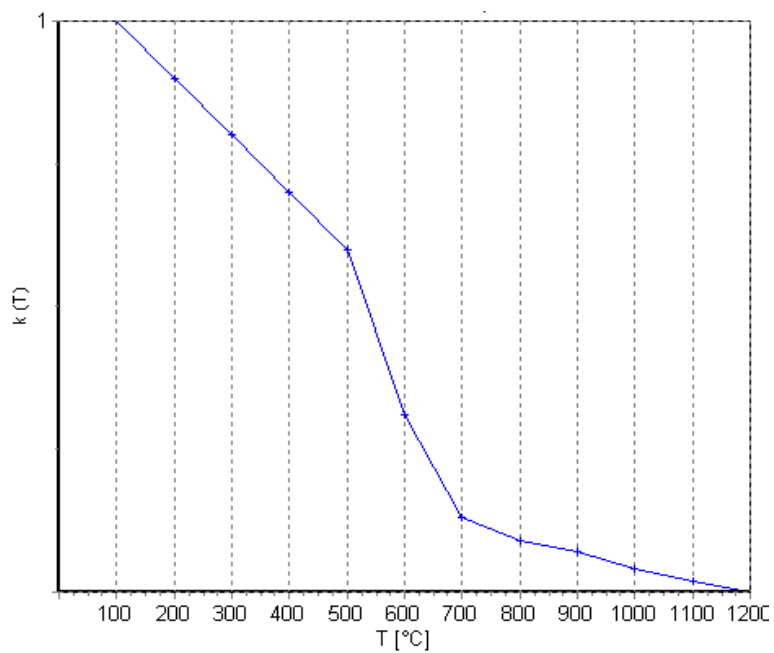


Figura 37 – Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)

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.

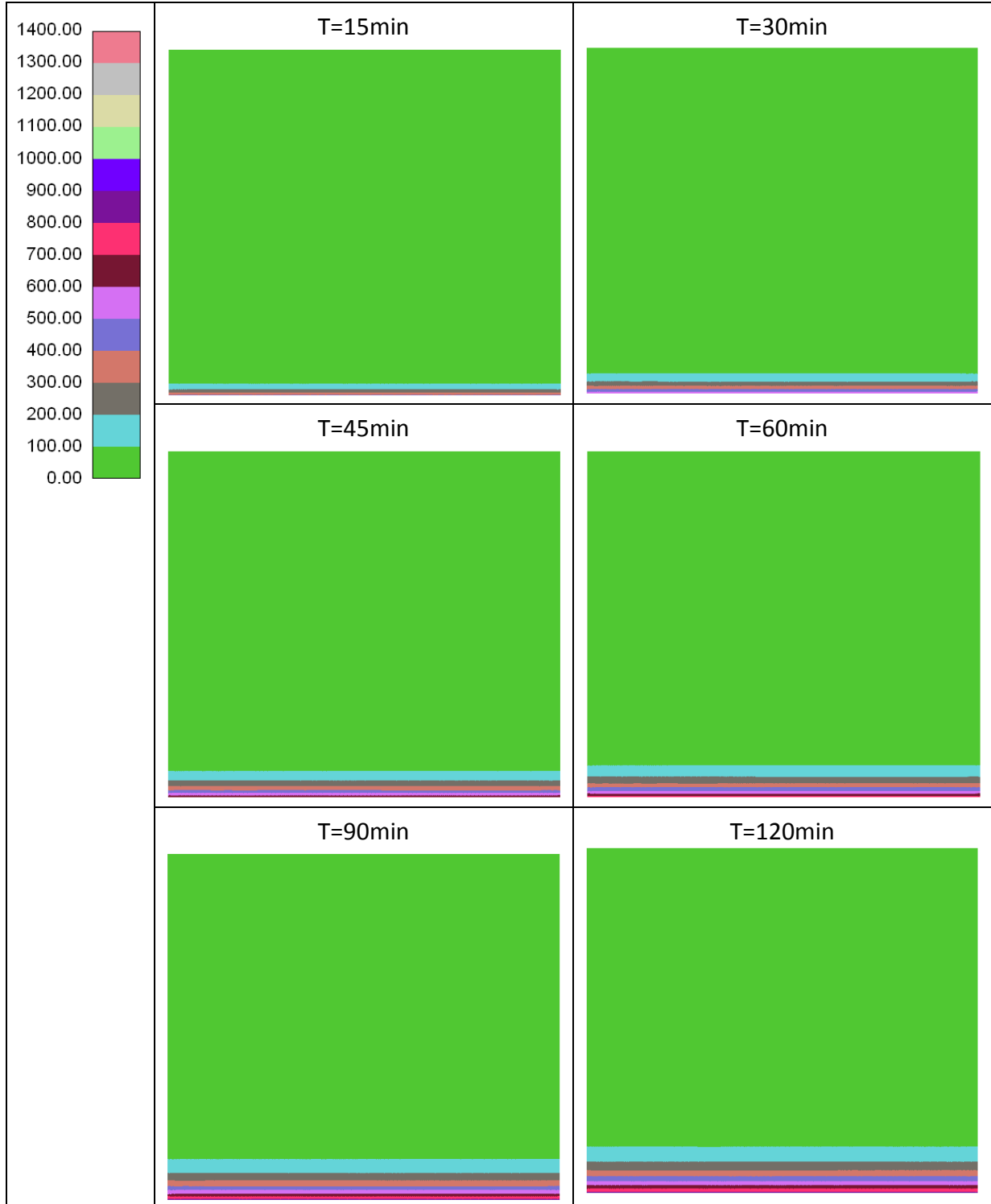


Figura 38 – Analisi termica – Modello 1

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

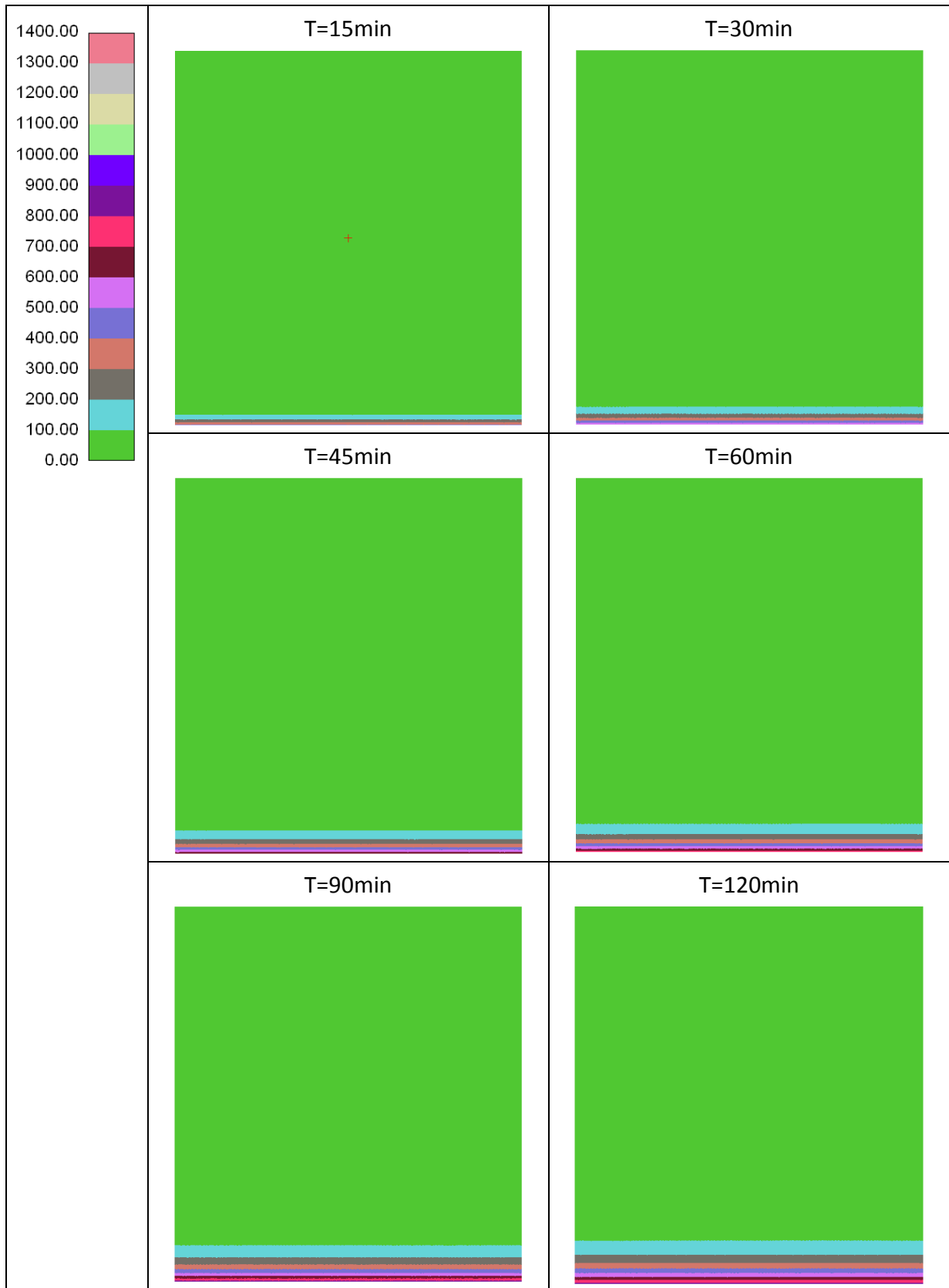


Figura 39 – Analisi termica – Modello 2

12.5 Verifica strutturale

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

Legenda:

- T tempo trascorso [minuti]
- N azione assiale [kN]
- M_x momento in direzione X [kNm]
- M_y momento in direzione Y [kNm]
- ε_{cls} deformazione del CLS
- ε_{acc} deformazione dell’acciaio
- FS fattore di sicurezza nel dominio MN

T	N	M _x	M _y	ε _{cls}	ε _{acc}	FS
15	724.40	0.00	1186.13	0.003851	-0.035534	3.85
20	724.40	0.00	1186.13	0.003851	-0.035534	3.85
30	724.40	0.00	1186.13	0.003851	-0.035534	3.85
45	724.40	0.00	1186.13	0.003851	-0.035534	3.85
60	724.40	0.00	1186.13	0.003860	-0.035633	3.85
90	724.40	0.00	1186.13	0.003857	-0.035599	3.85
120	724.40	0.00	1186.13	0.003862	-0.035650	3.85

Tabella 22 – Analisi al fuoco – Modello 1

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

T	N	M _x	M _y	ε _{cls}	ε _{acc}	FS
15	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
20	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
30	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
45	724.40	0.00	1484.76	0.003834	-0.044867	4.81
60	724.40	0.00	1484.76	0.003842	-0.044977	4.81
90	724.40	0.00	1484.76	0.003842	-0.044977	4.81
120	724.40	0.00	1484.76	0.003847	-0.045040	4.81

Tabella 23 – Analisi al fuoco – Modello 2

13 CONCLUSIONI

Nella presente Relazione di Calcolo si sono analizzate le gallerie artificiali agli imbocchi della galleria “Pedescala”, 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 17 e Figura 22 e controllando poi i valori ottenuti per alcune sezioni rappresentative e presenti in Tabella 9 e Tabella 17. In particolare:

- per quanto riguarda l’azione assiale, la struttura è caricata mediamente da 6.5m di ritombamento (22kN/m^3), a cui si somma il peso proprio del rivestimento (spessore minimo 0.9m); il carico distribuito risulta pari a 165.5kPa . Considerando la luce del portale pari a circa 14m, su entrambe le pareti si scaricano circa 1160kN , comparabili con 1500kN circa ottenuti nel primo modello e 1600kN 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)	0.9	[m]
F_c (area della sezione)	0.9	$[\text{m}^2]$
J_c (momento d'inerzia della sezione)	0.06075	$[\text{m}^4]$
f (freccia)	4.5	[m]
l (luce dell'arco)	14	[m]
v ($45/4 * J_c / (F_c * f^2)$)	0.038	[-]
M_C calotta ($p * l^2 / 24 * v / (1+v)$)	-49	$[\text{kNm/m}]$
M_A rene ($-p * l^2 / 12 * v / (1+v)$)	98	$[\text{kNm/m}]$

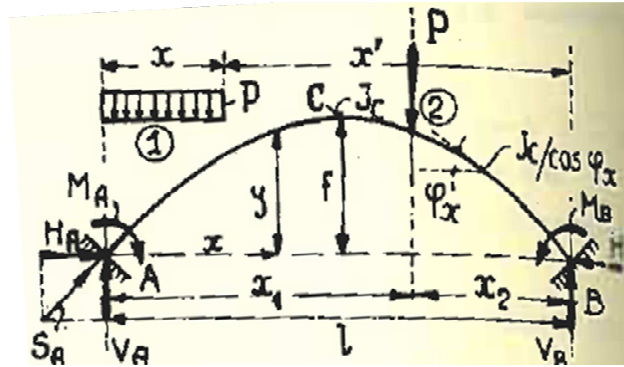


Figura 40 – Fig. 263 del “Prontuario del cemento armato”

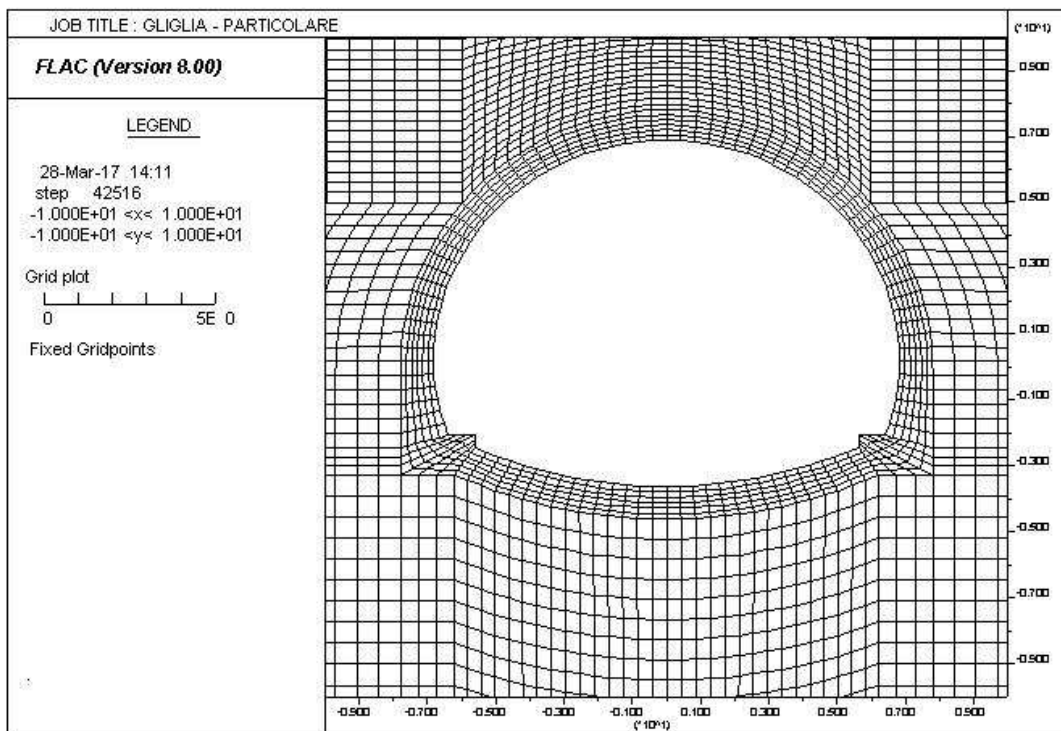
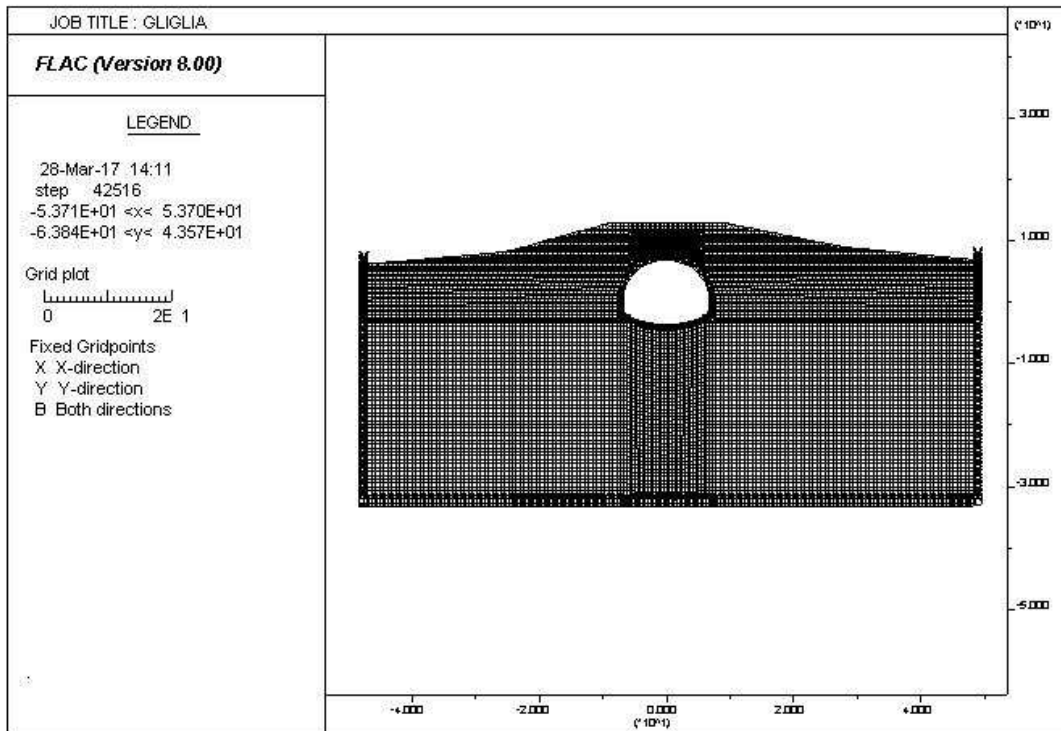
I valori ottenuti risultano correttamente inferiori di quanto trovato nella simulazione Flac, in quanto nel primo modello $M_C = -308 \text{ kNm/m}$ e $M_A = 416 \text{ kNm/m}$ e nel secondo modello $M_C = -348 \text{ kNm/m}$ e $M_A = 934 \text{ kNm/m}$.

Come limite superiore, si considera il caso di trave doppiamente incastrata che prevede momento in mezzeria M_C pari a $p \cdot l^2 / 24 = 1352 \text{ kNm/m}$ e momento all’incastro M_A pari a $p \cdot l^2 / 12 = 2703 \text{ kNm/m}$. 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.

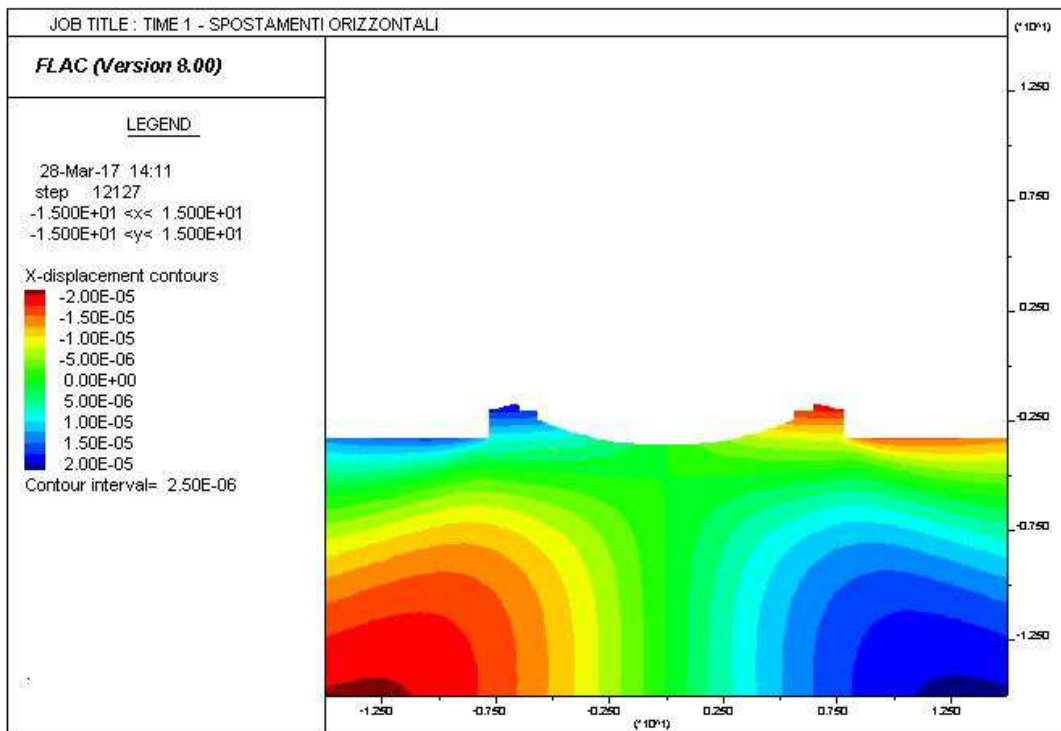
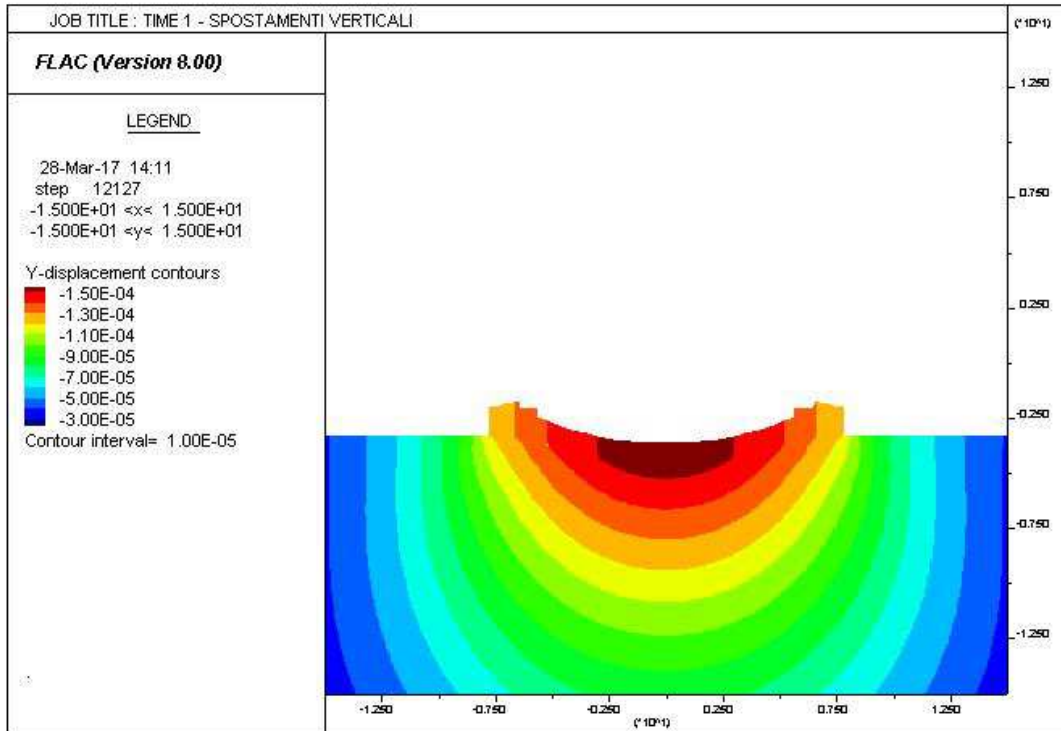
In allegato si riportano le immagini più significative di ogni calcolo.

14 ALLEGATI

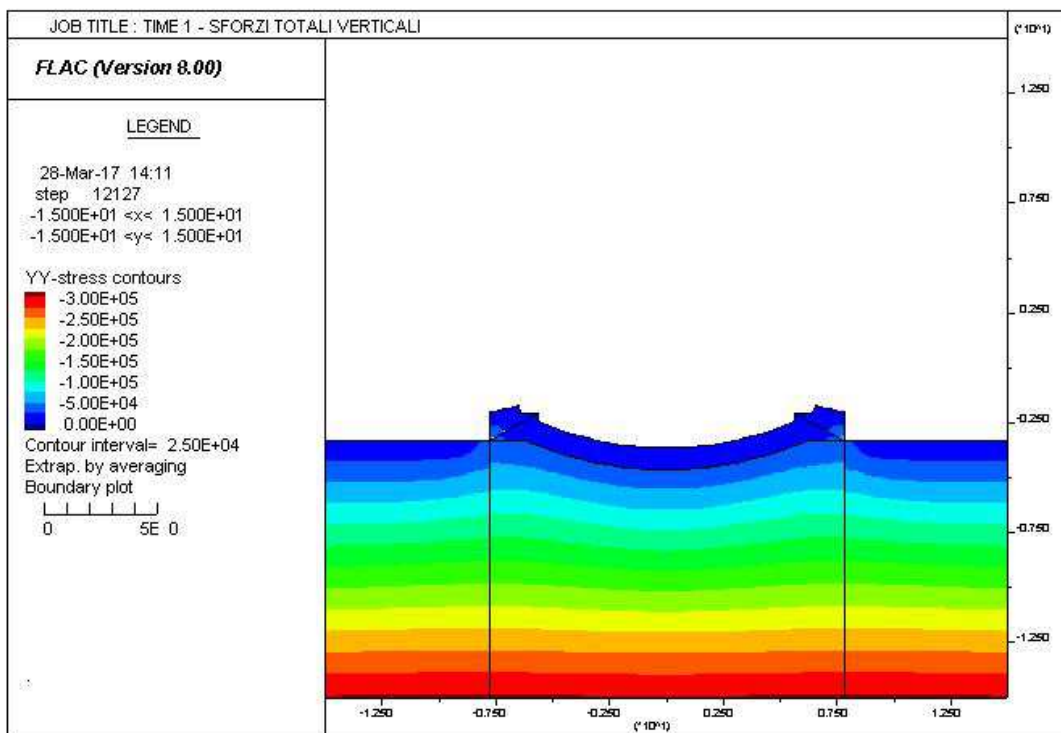
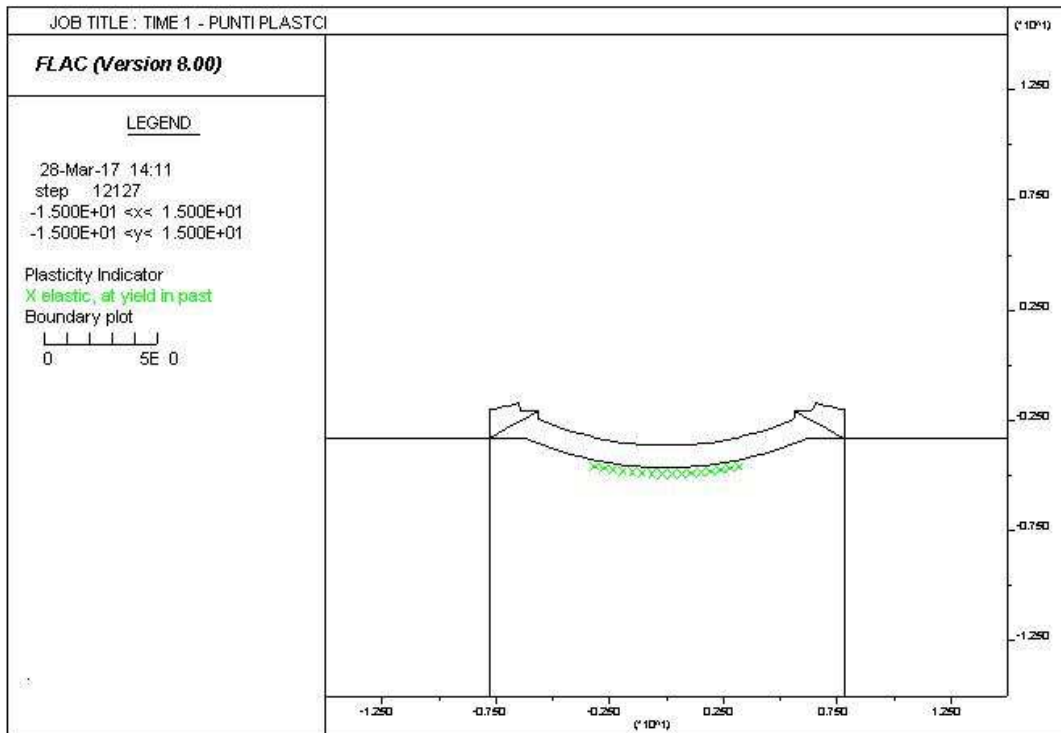
14.1 MODELLO 1 – Concio d'attacco



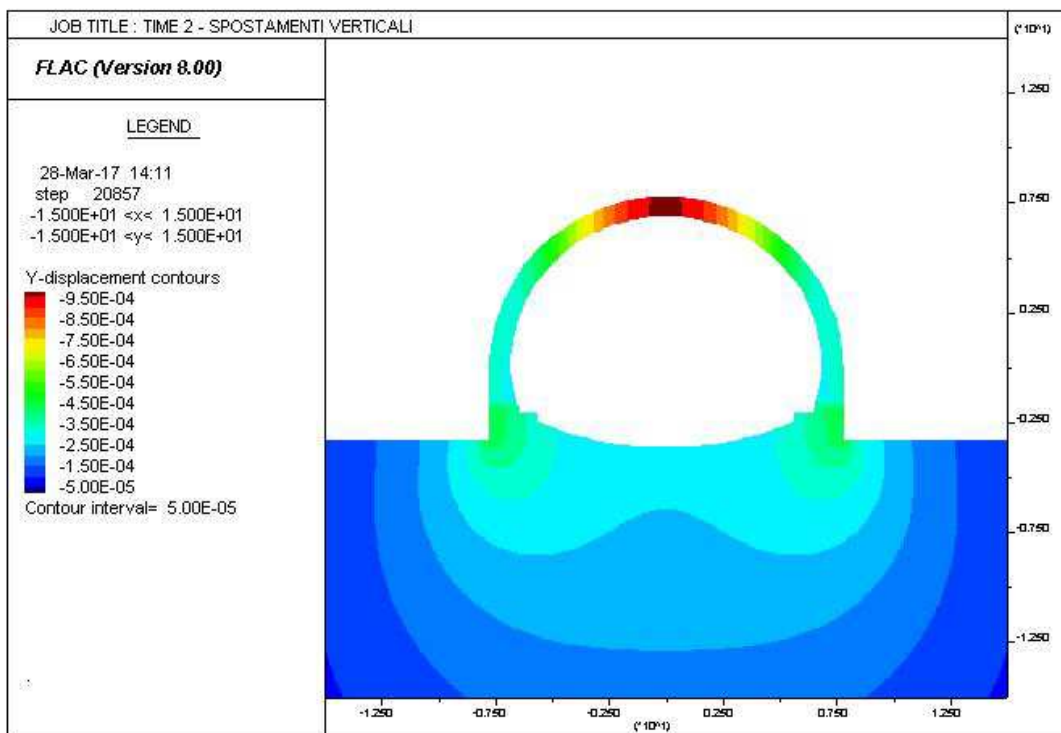
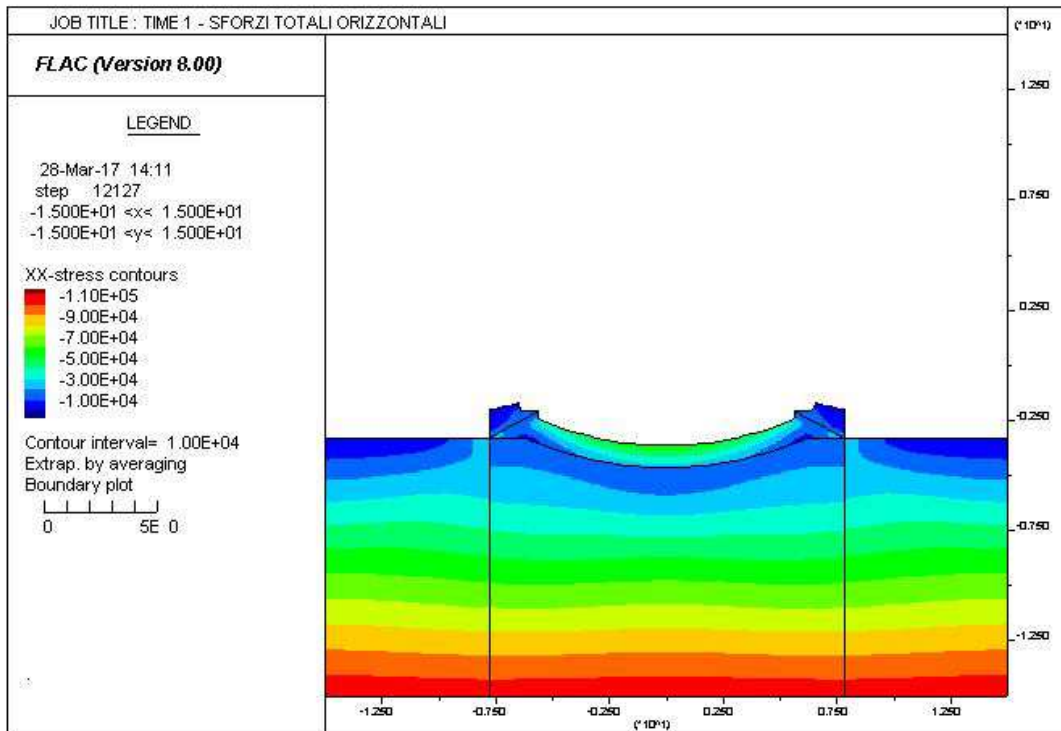
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



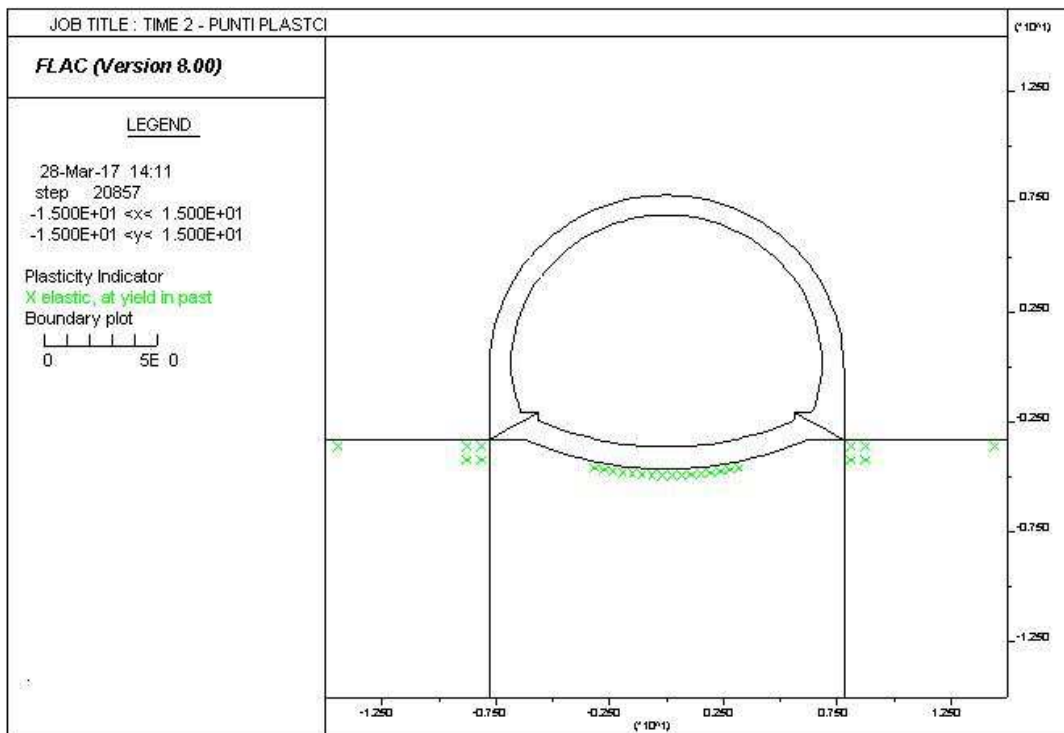
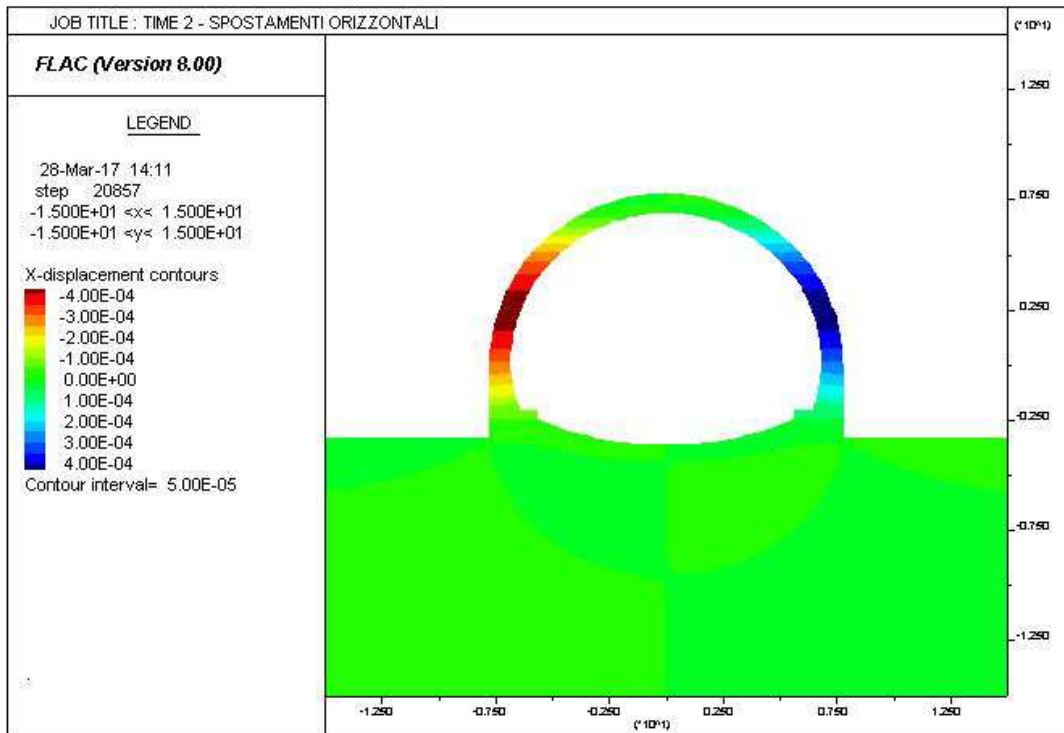
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



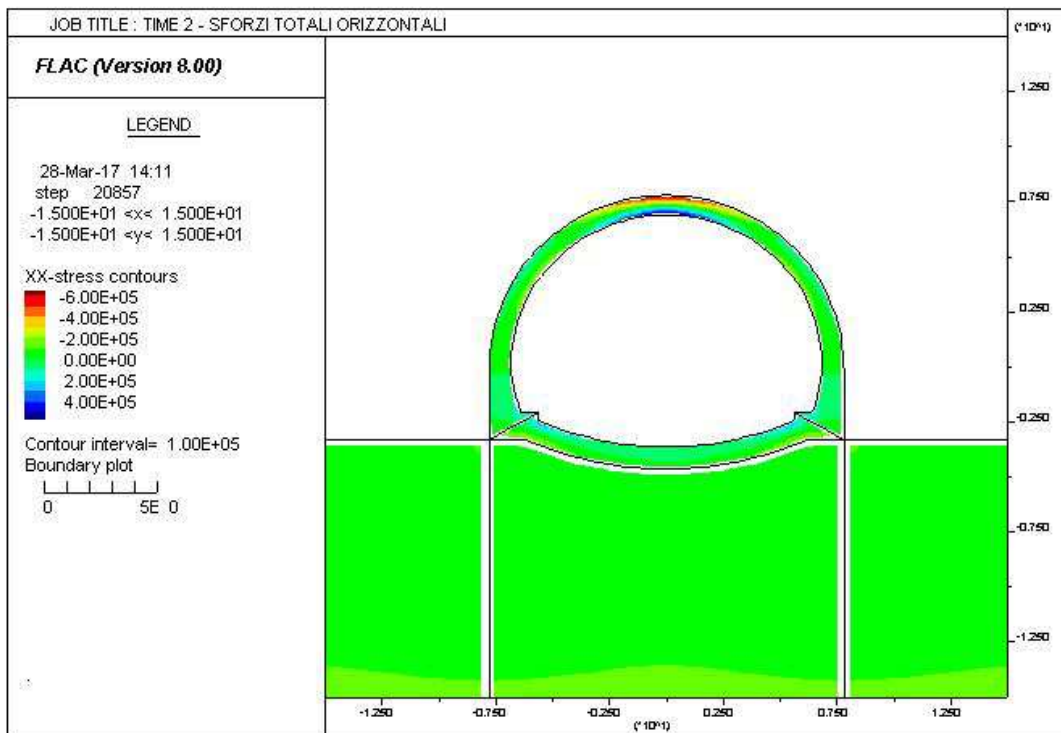
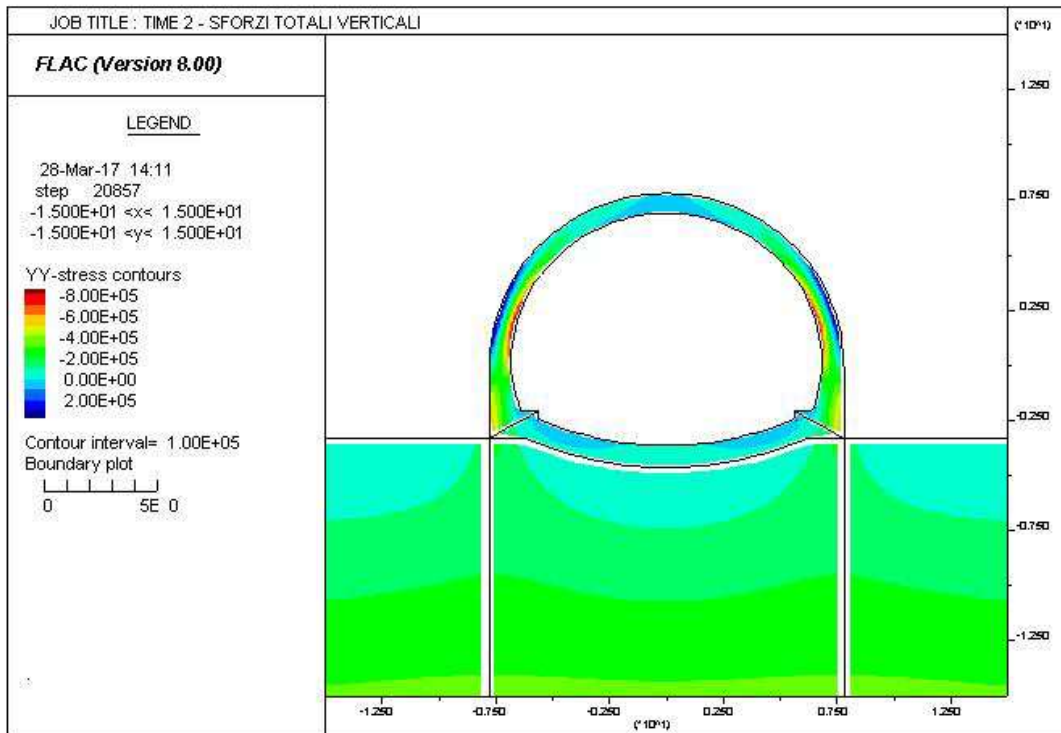
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



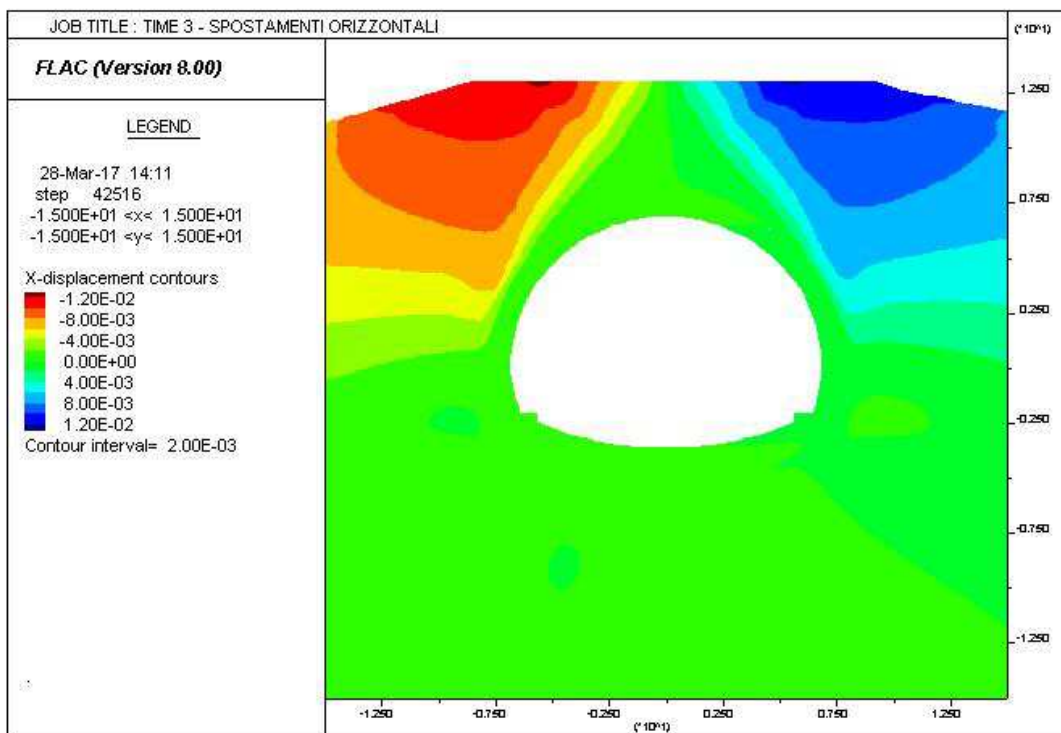
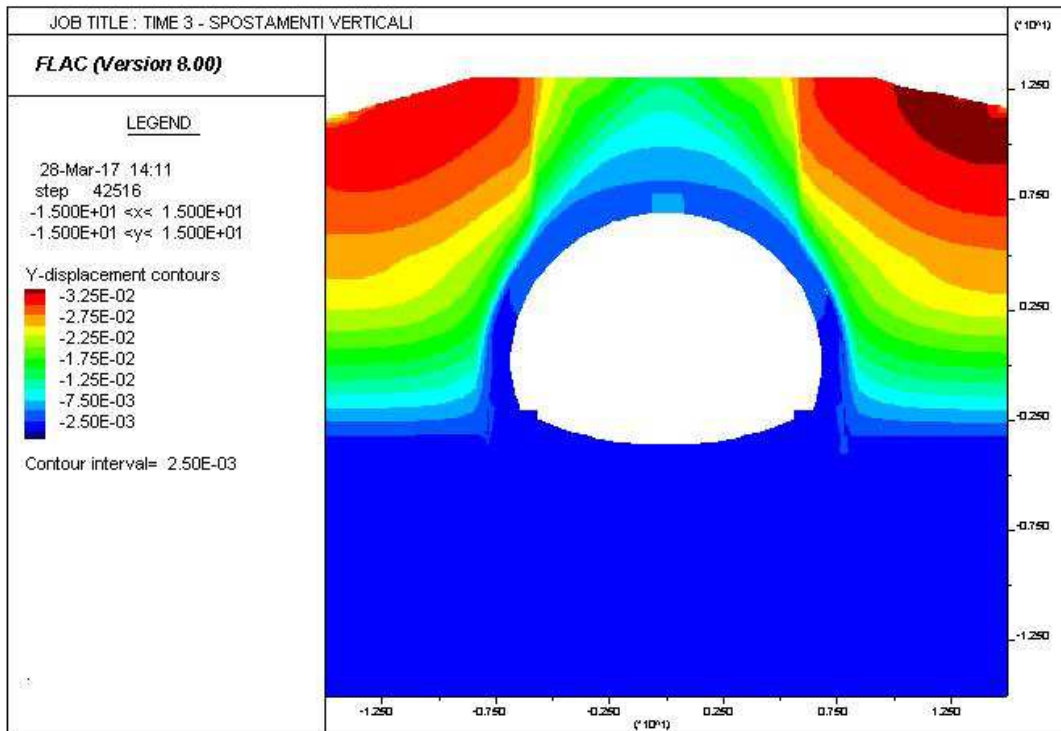
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



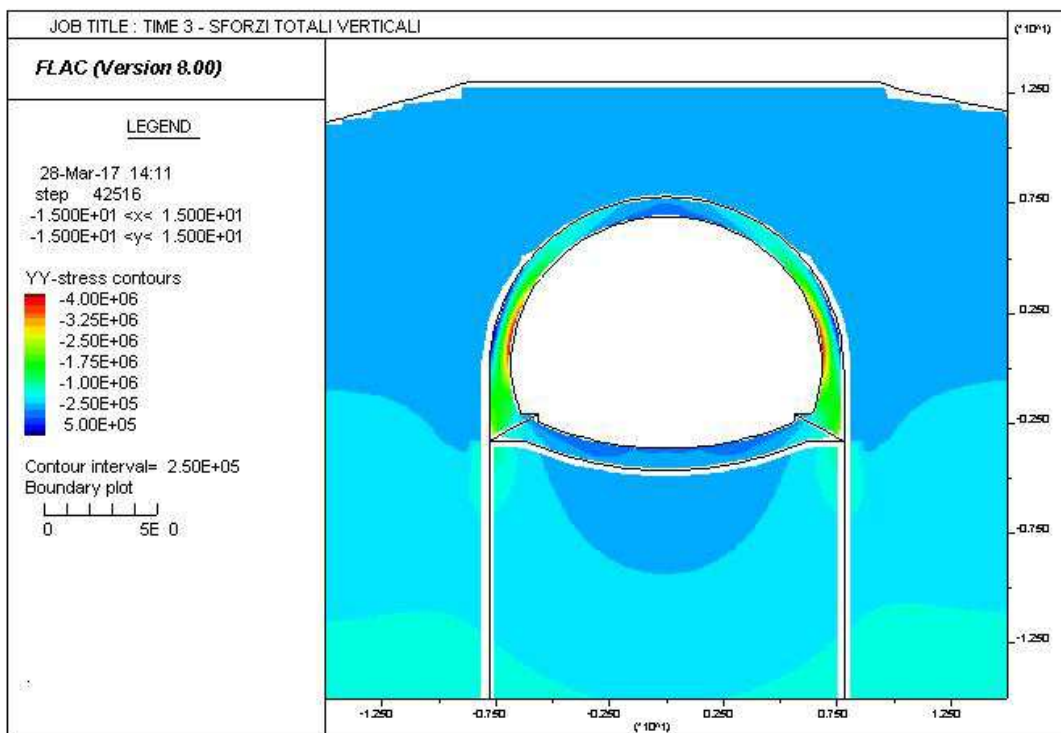
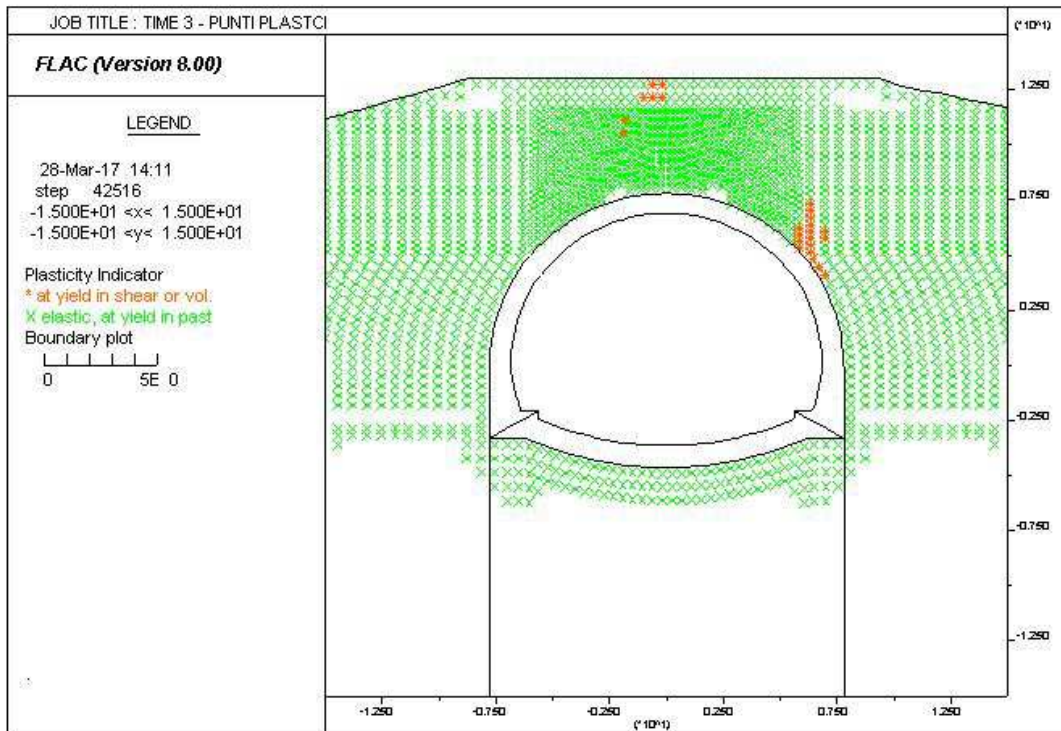
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



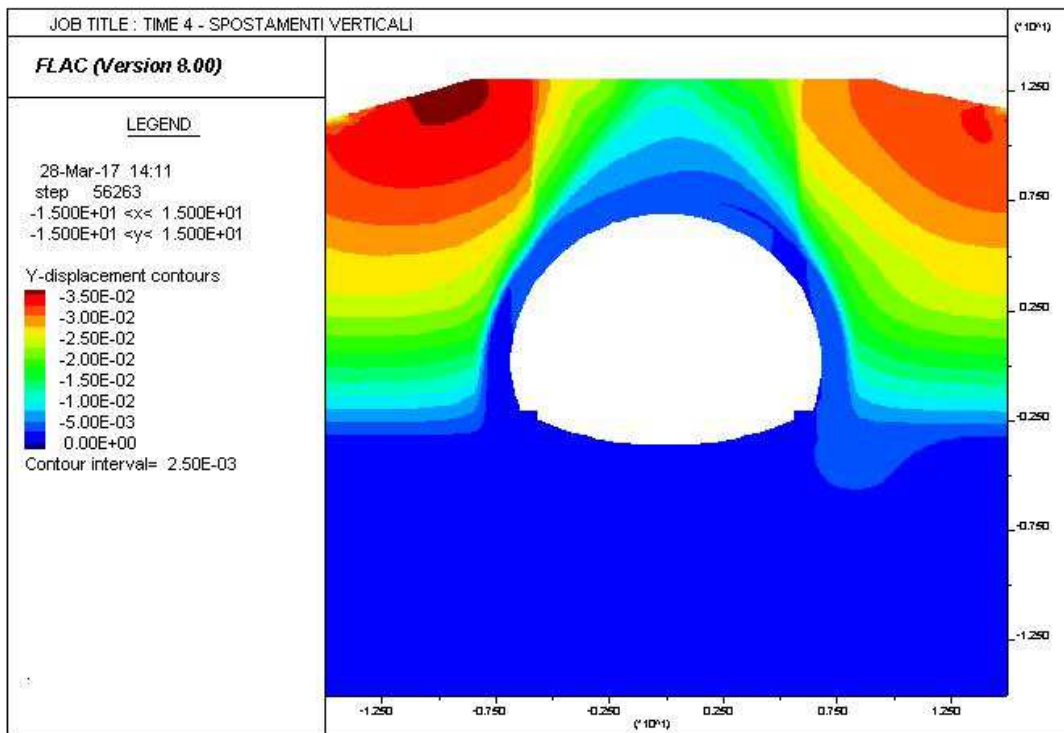
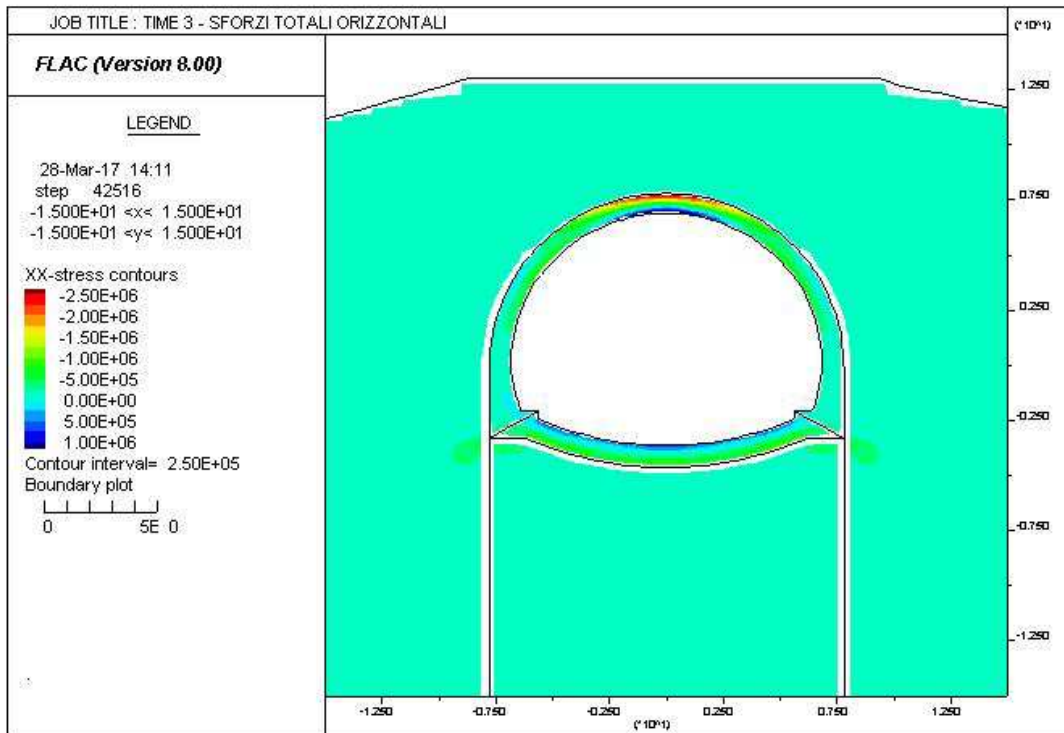
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



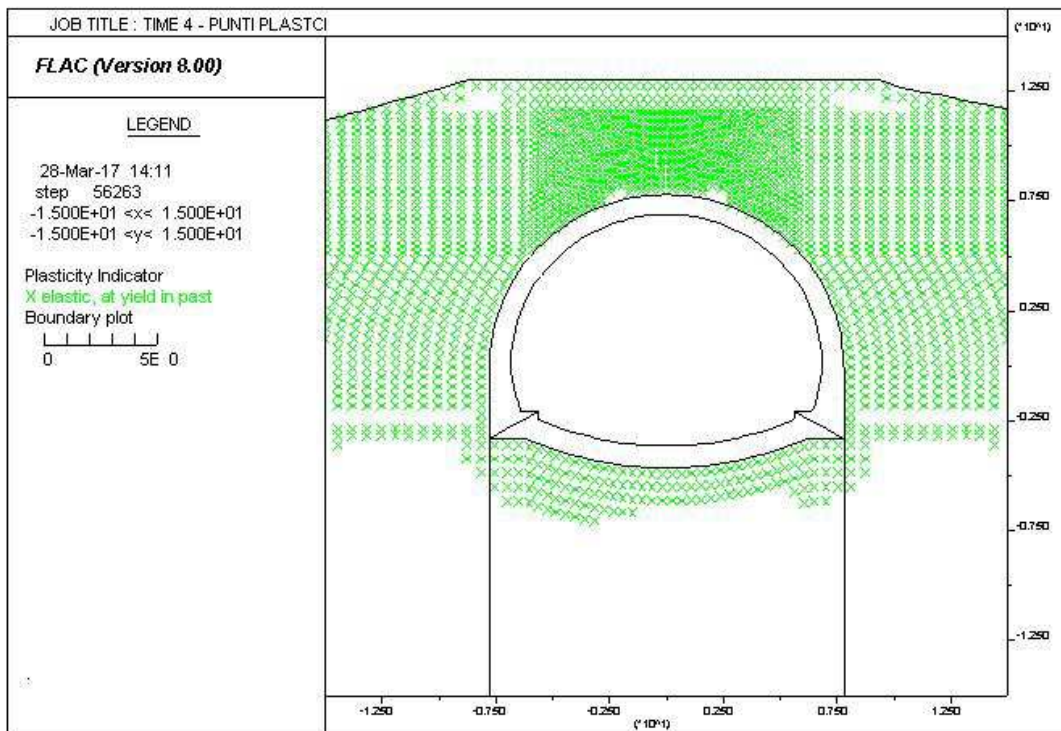
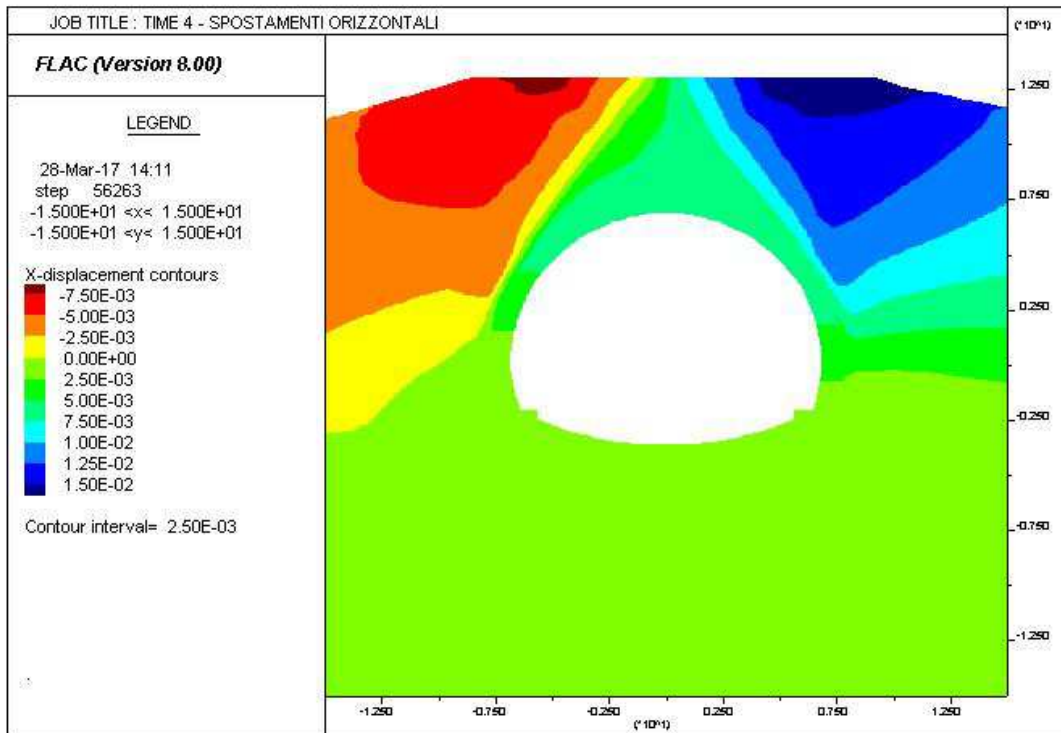
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



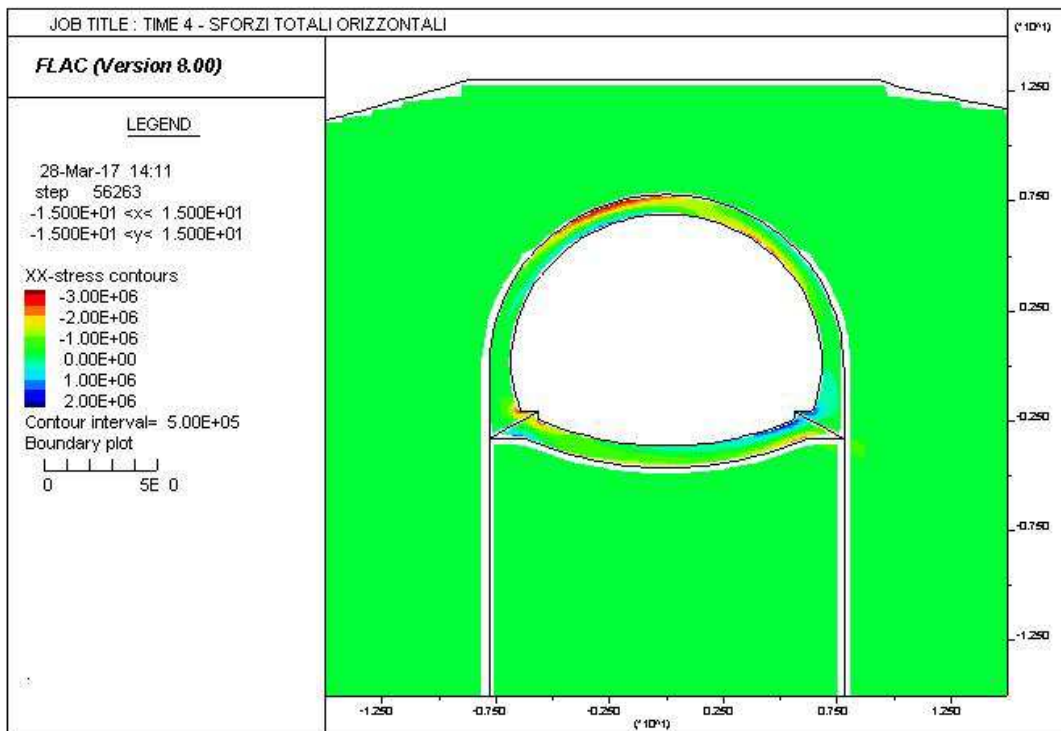
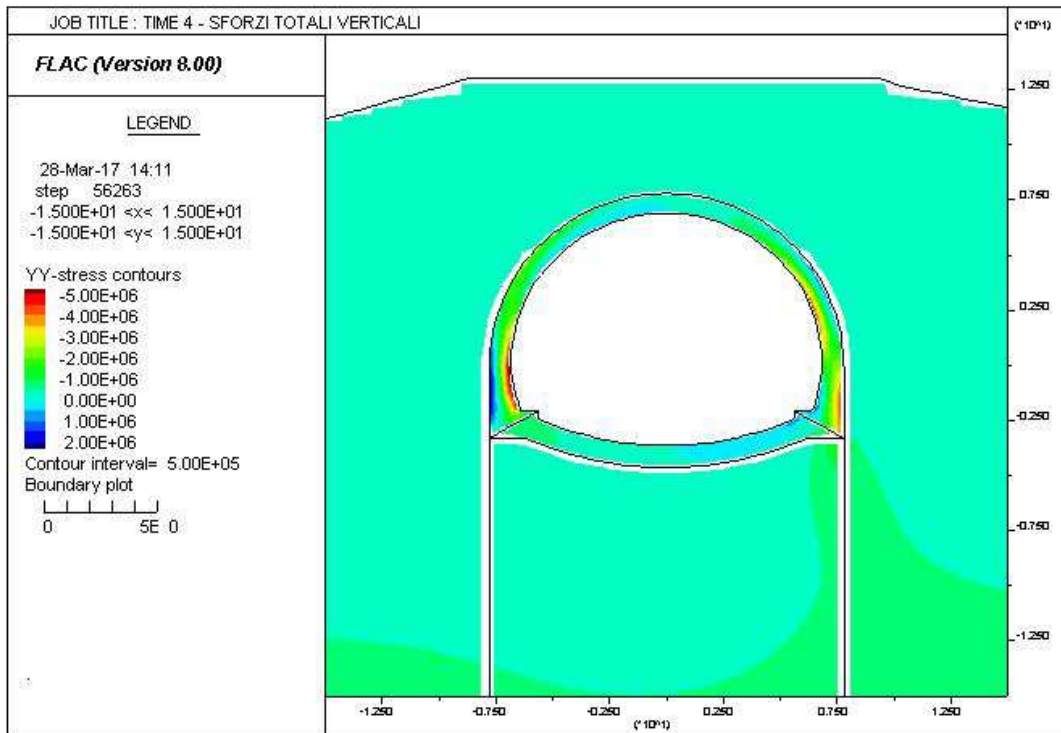
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



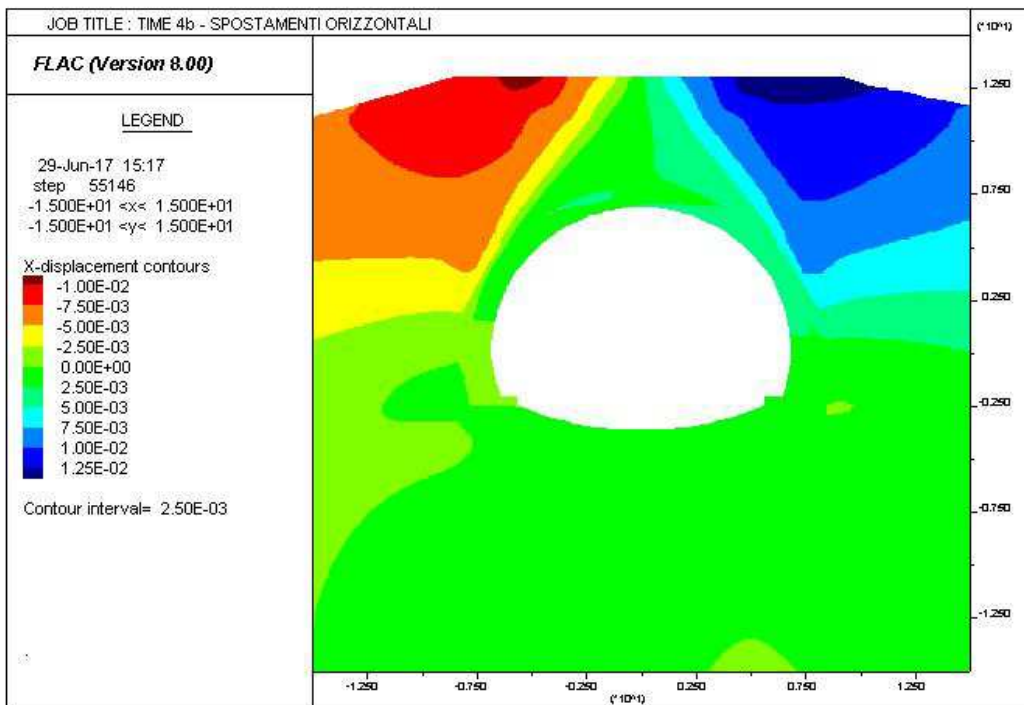
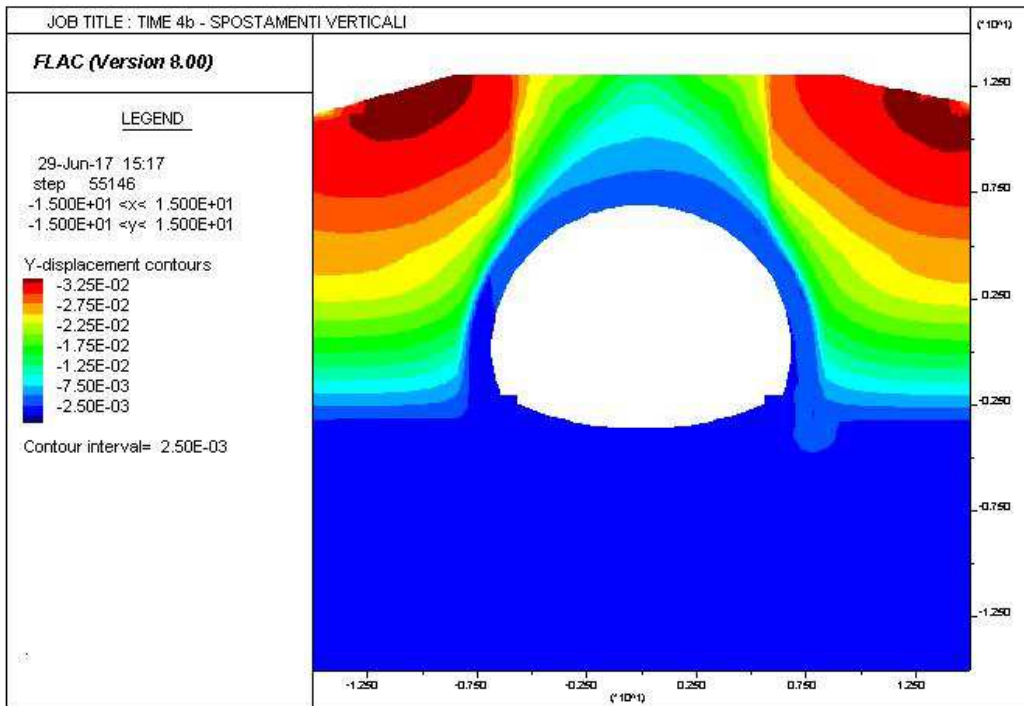
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



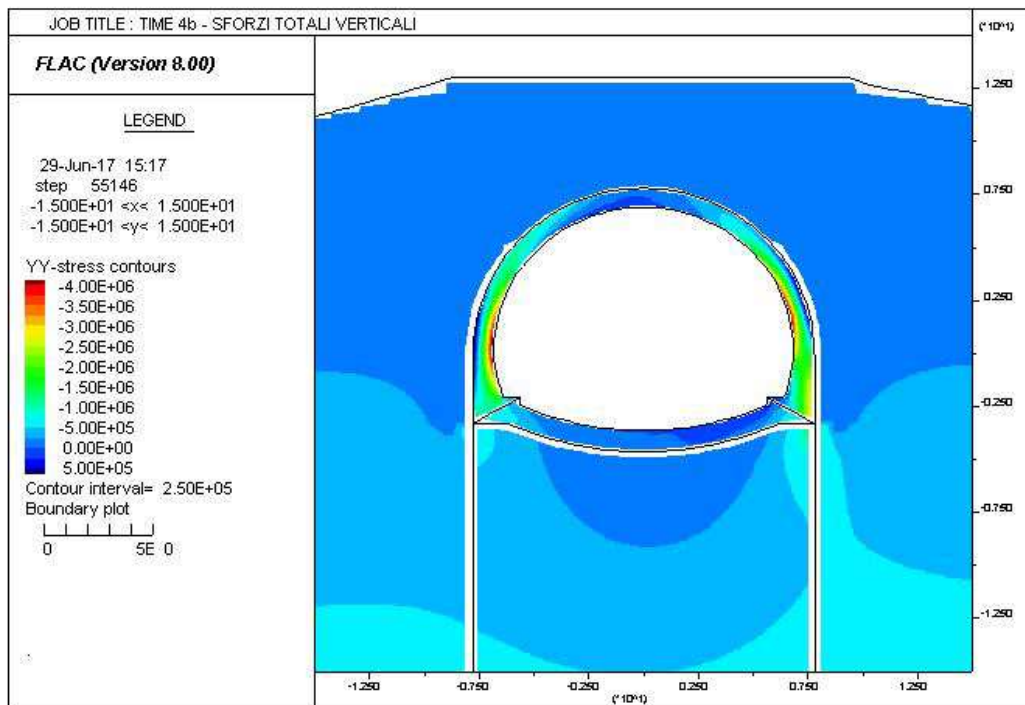
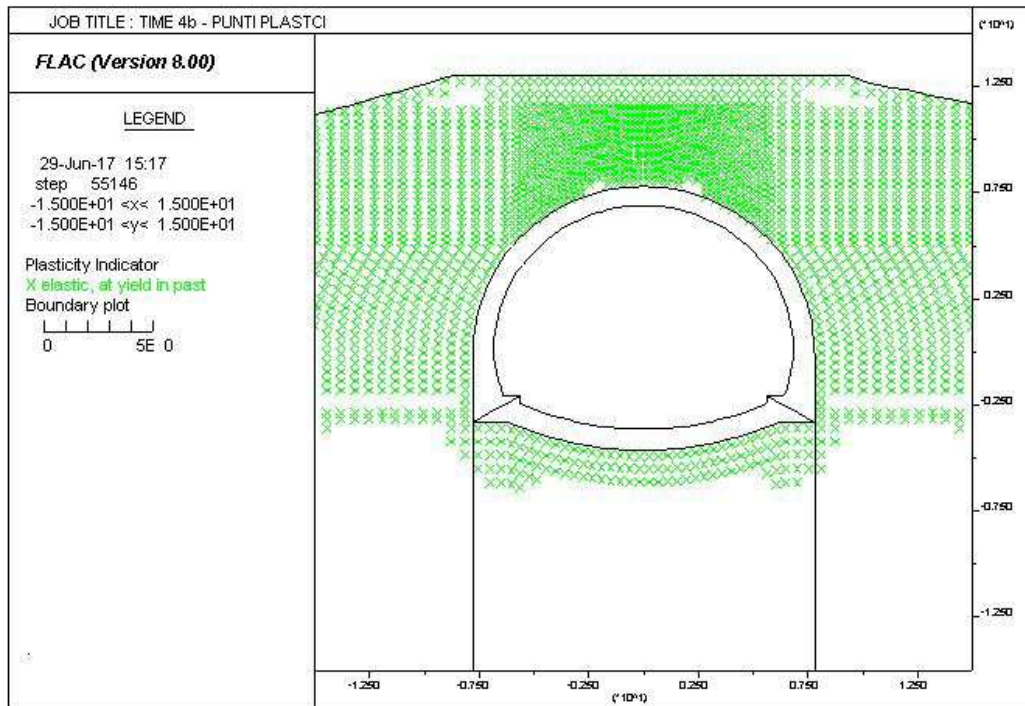
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



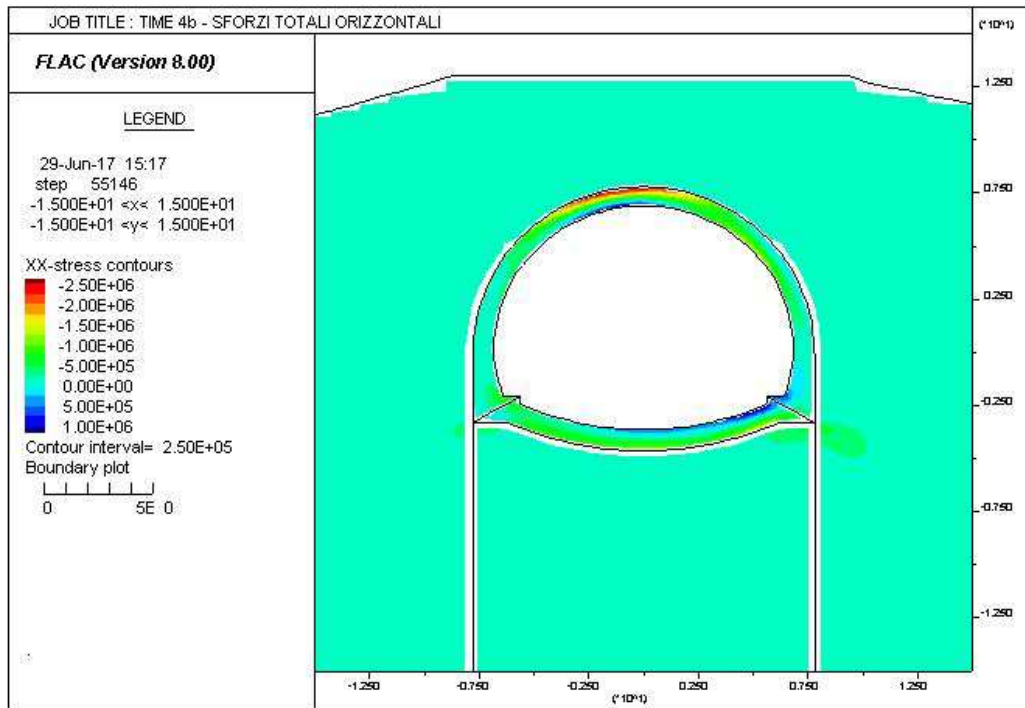
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



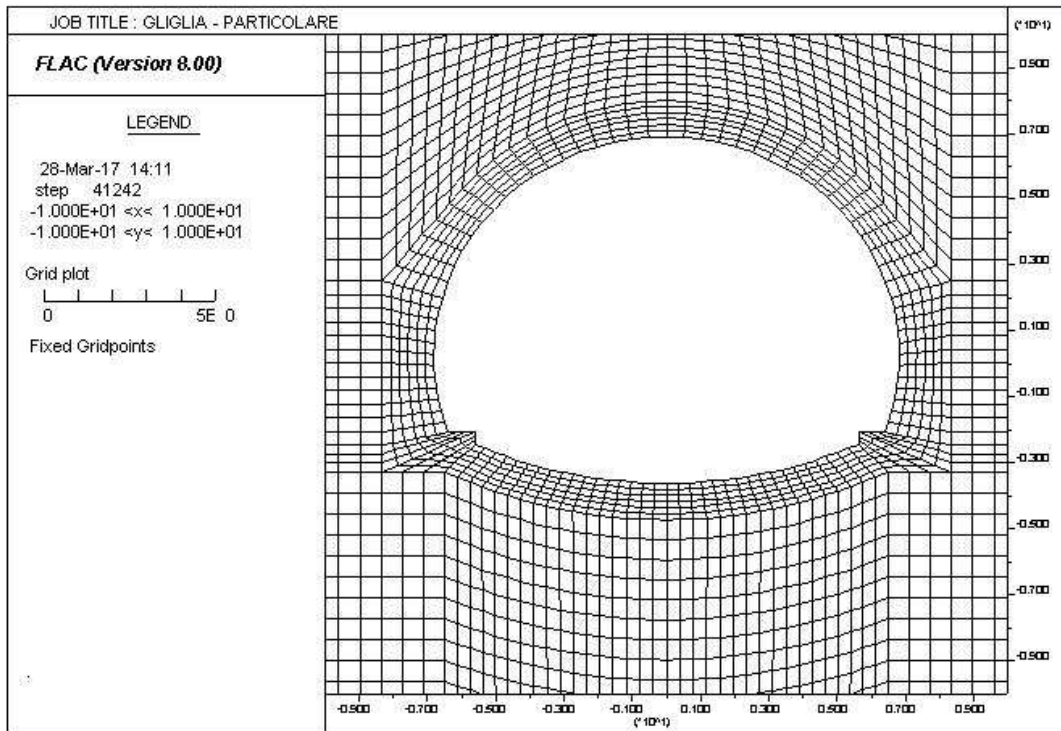
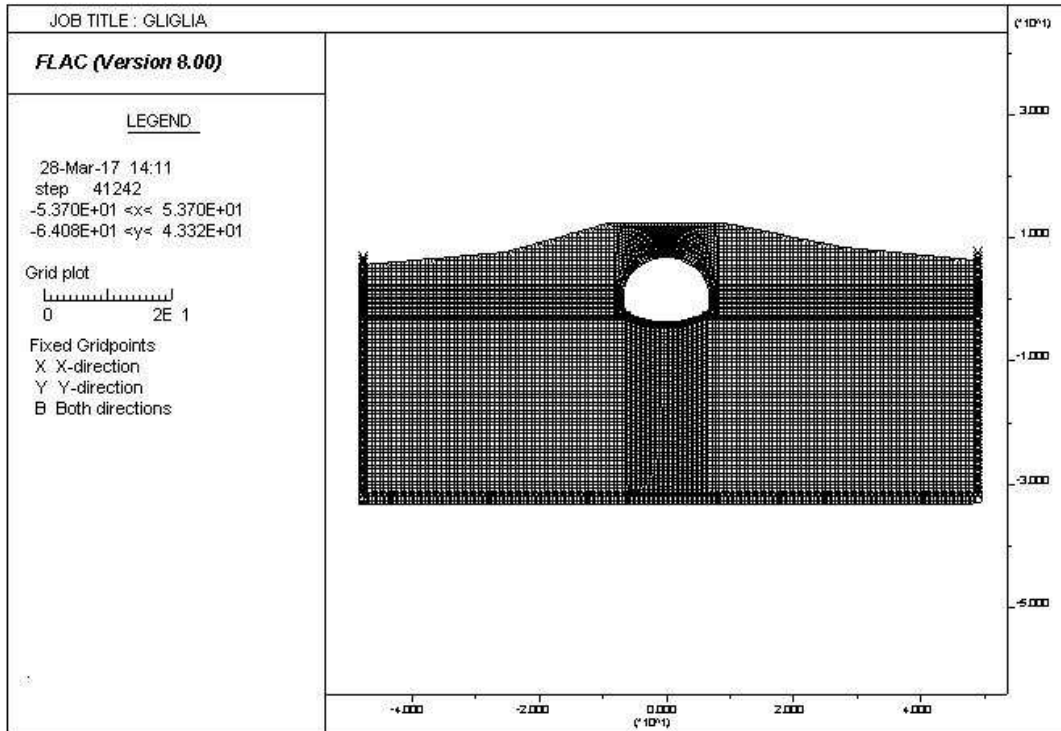
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



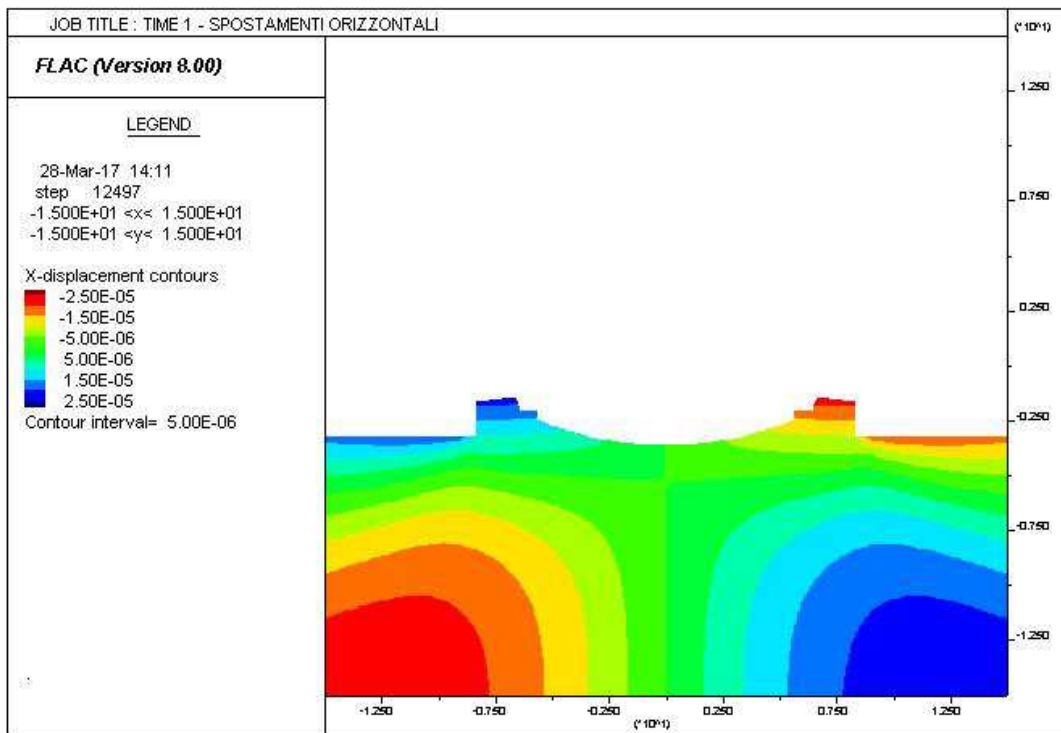
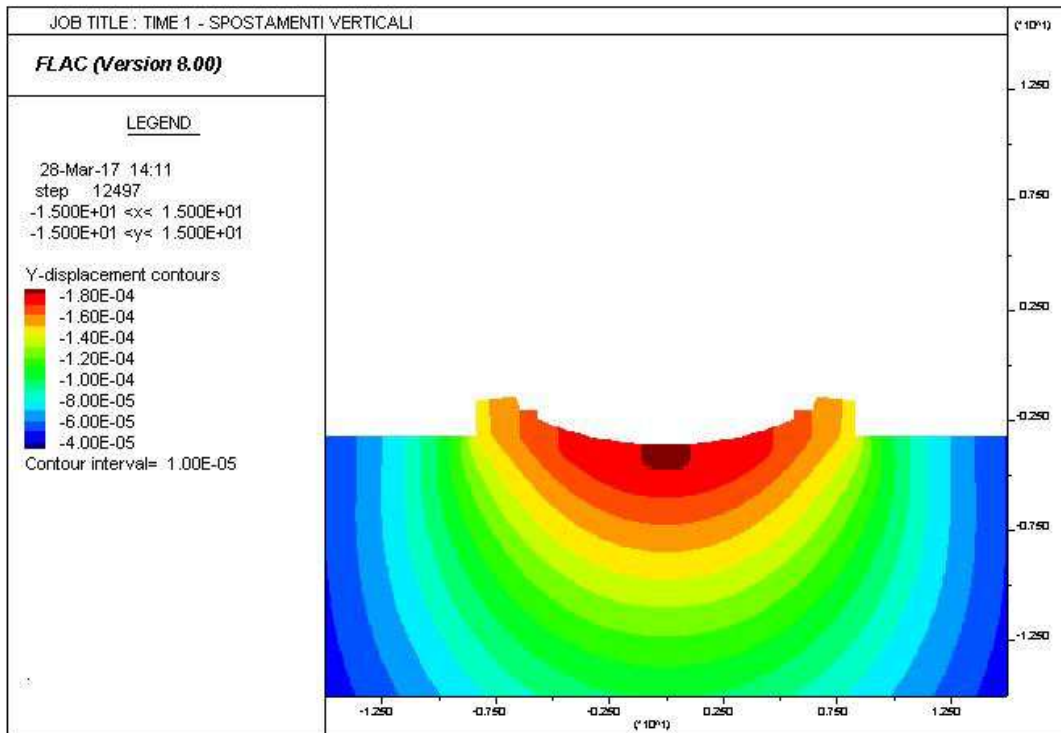
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



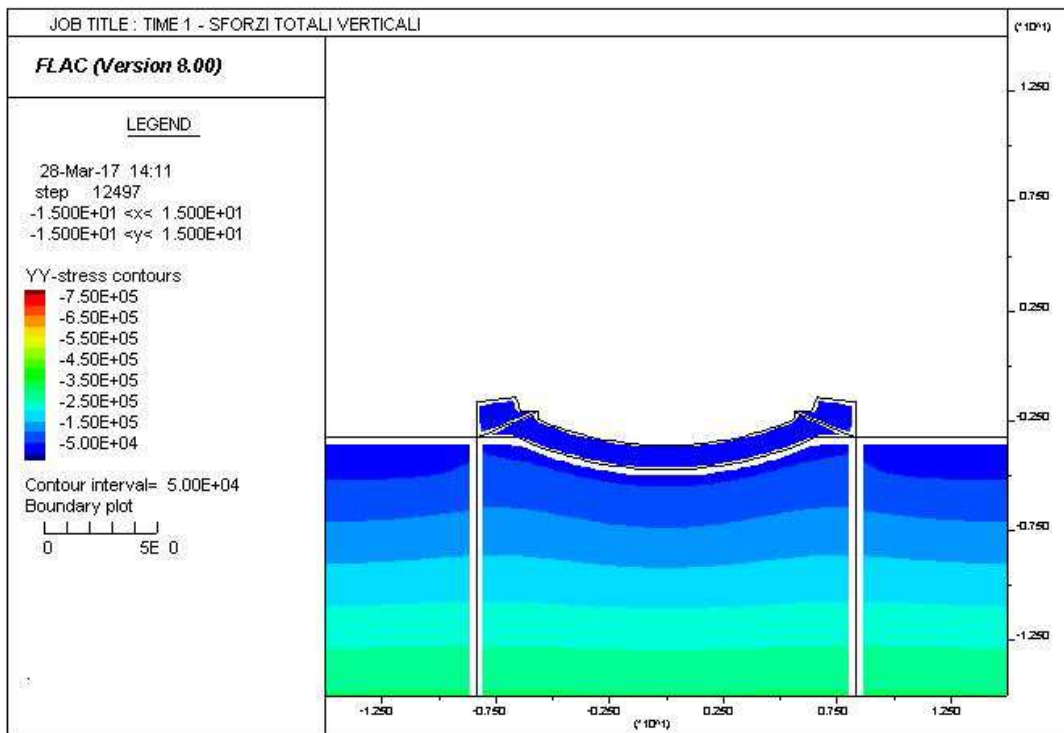
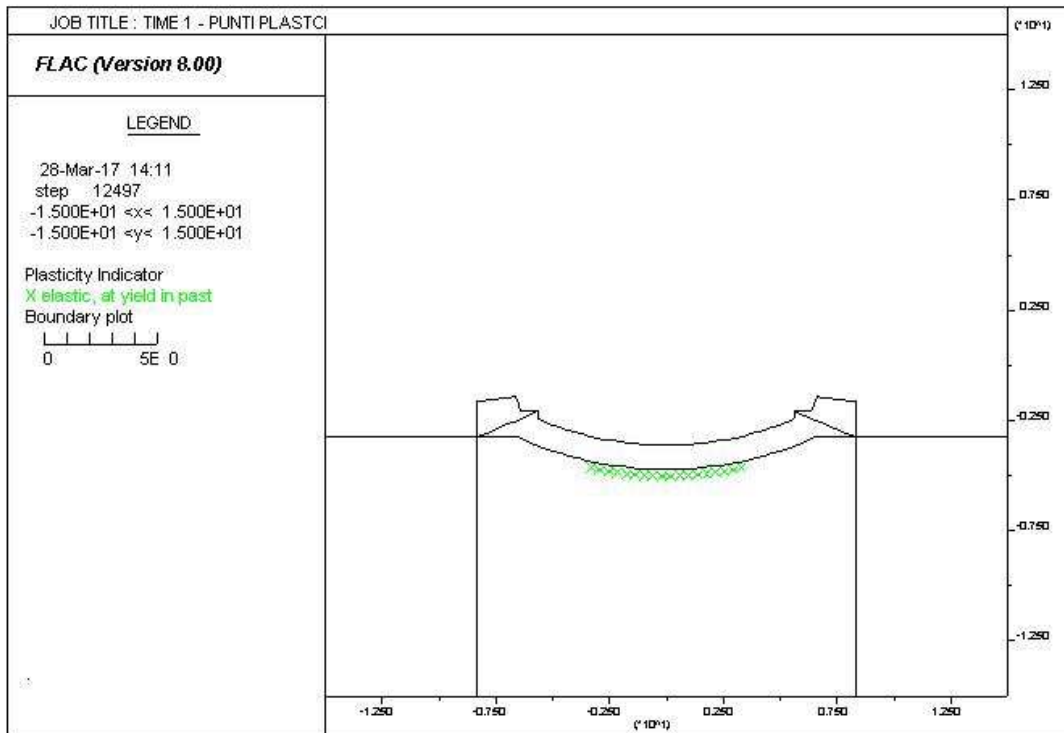
14.2 MODELLO 2 – GA



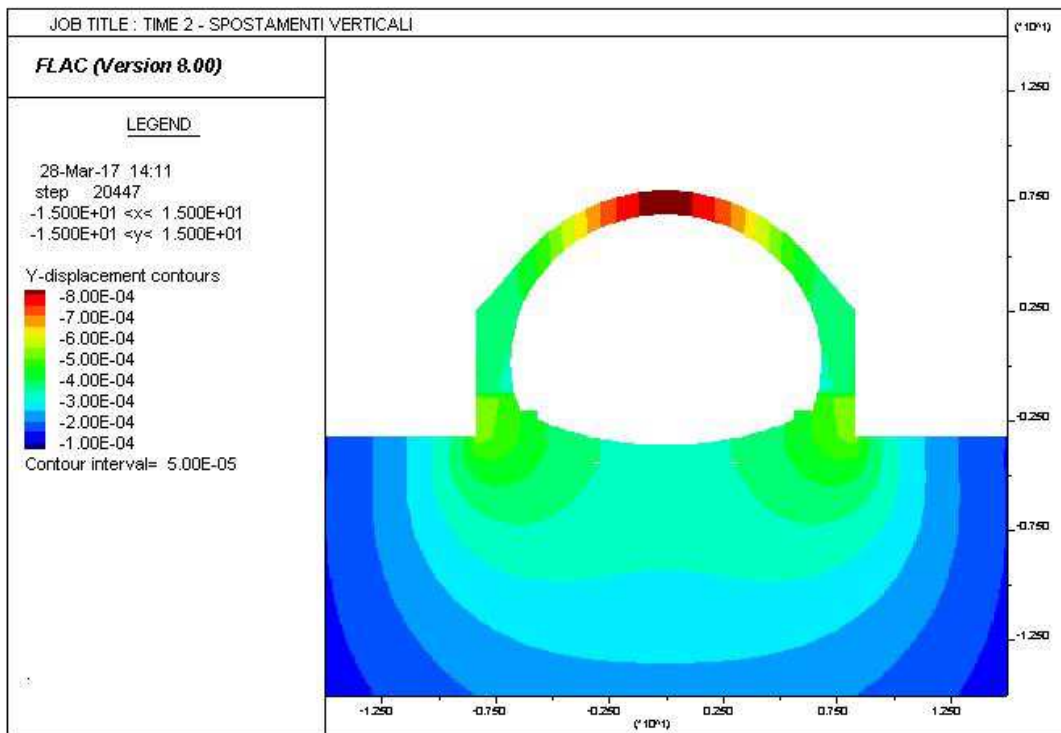
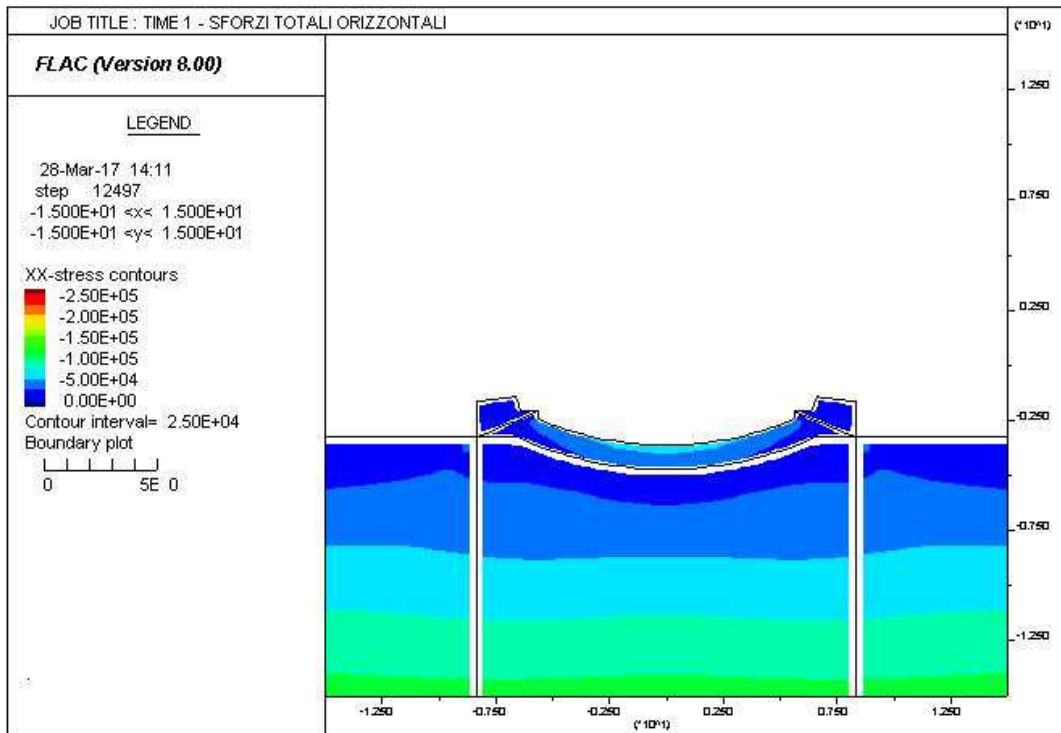
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



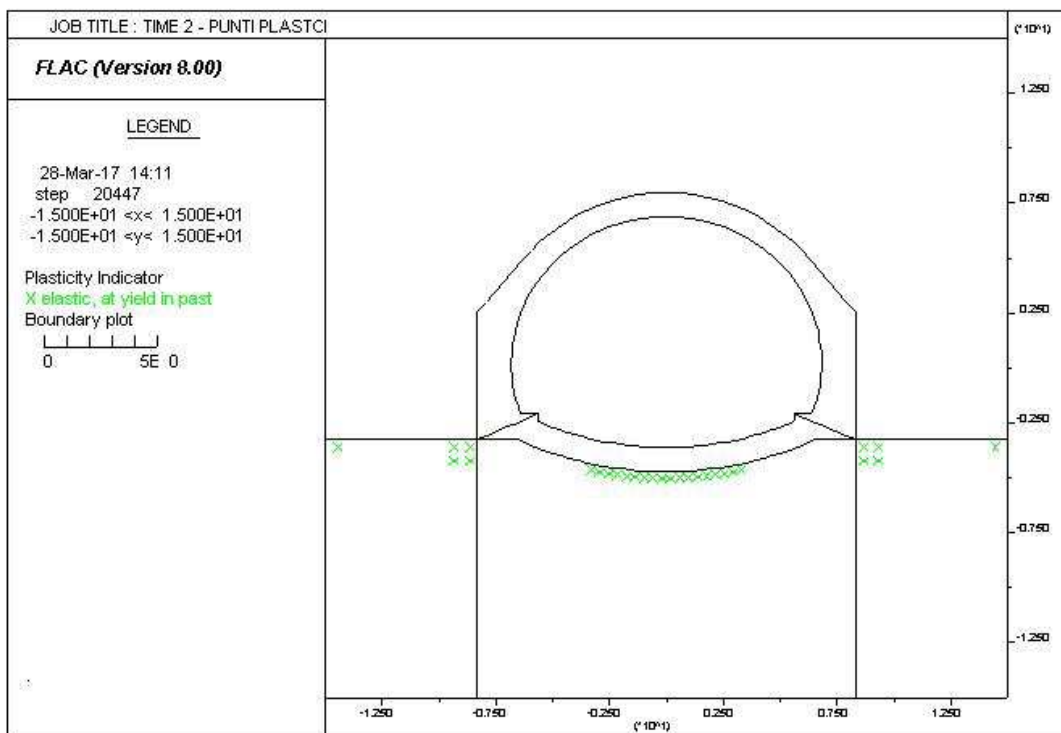
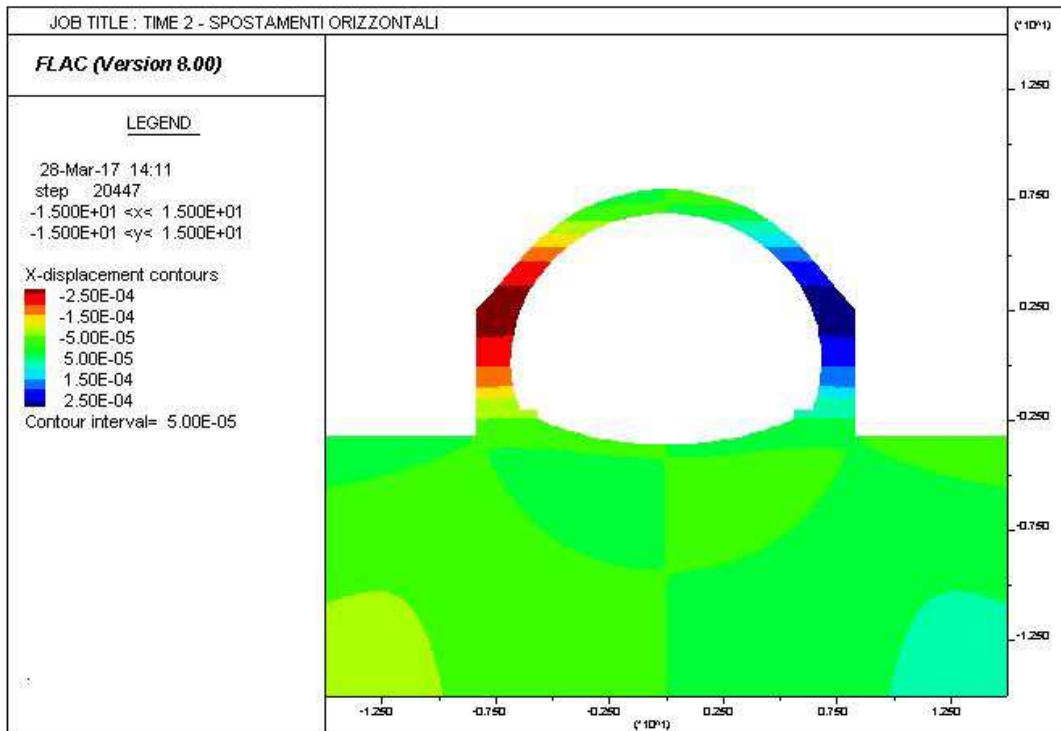
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



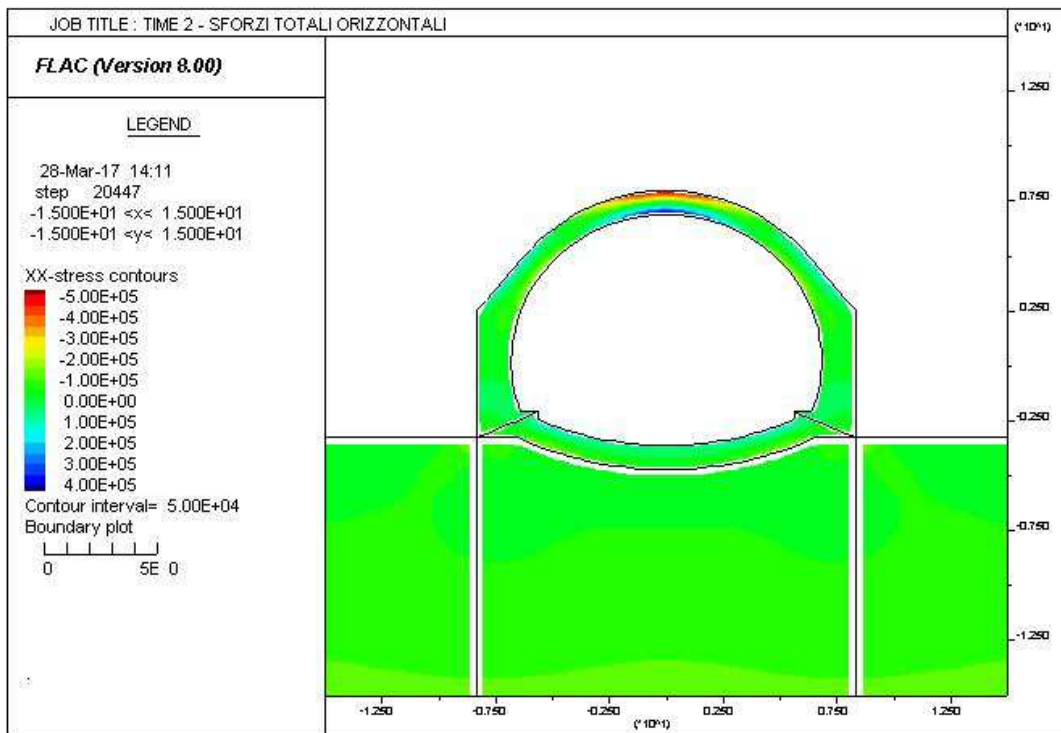
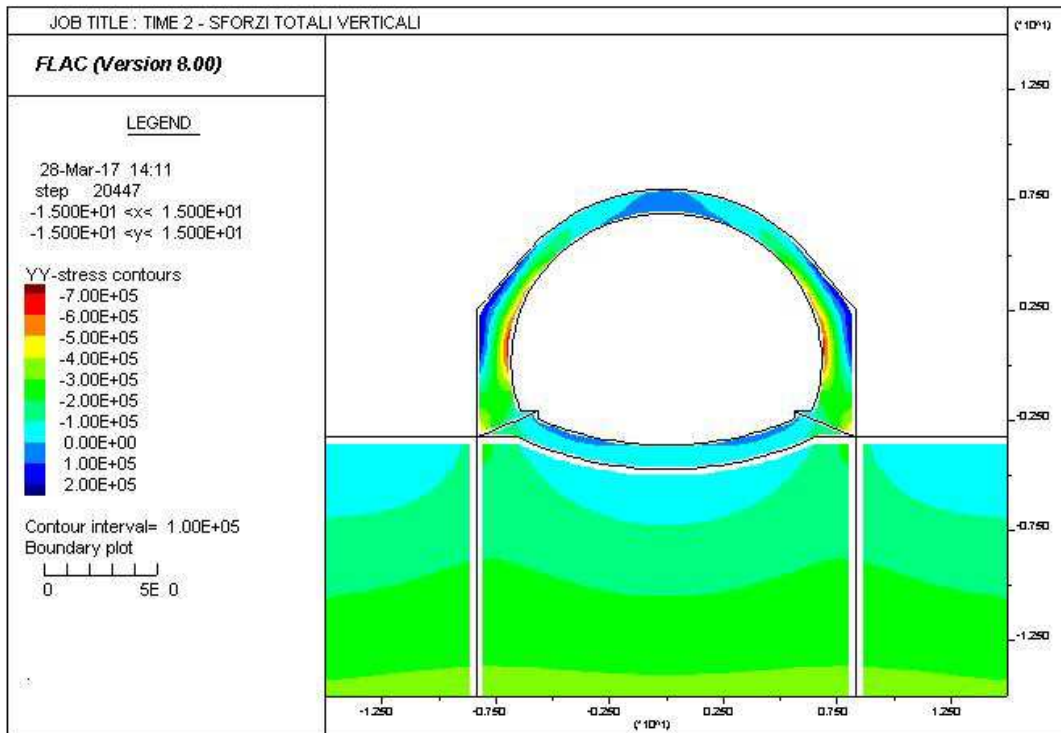
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



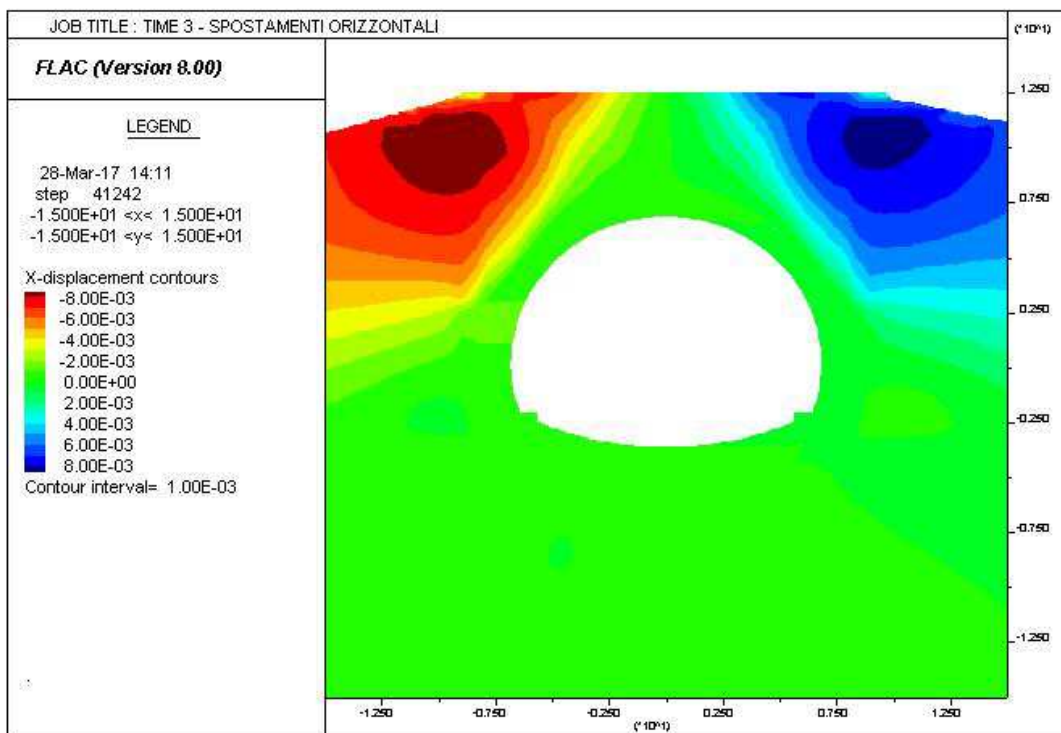
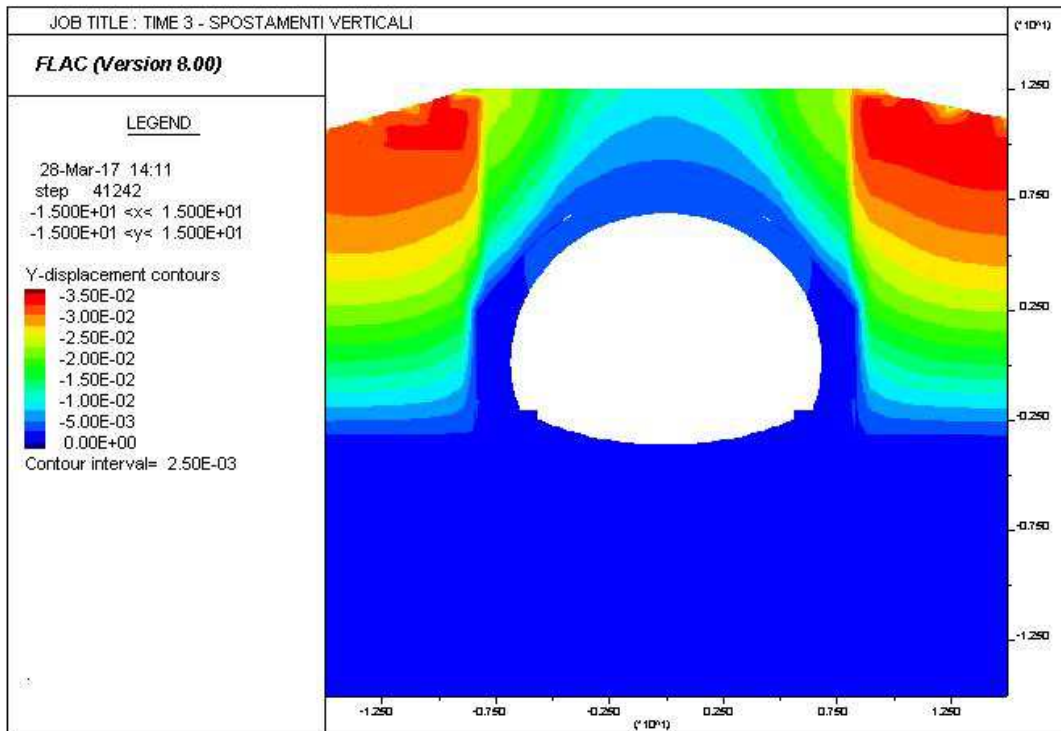
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



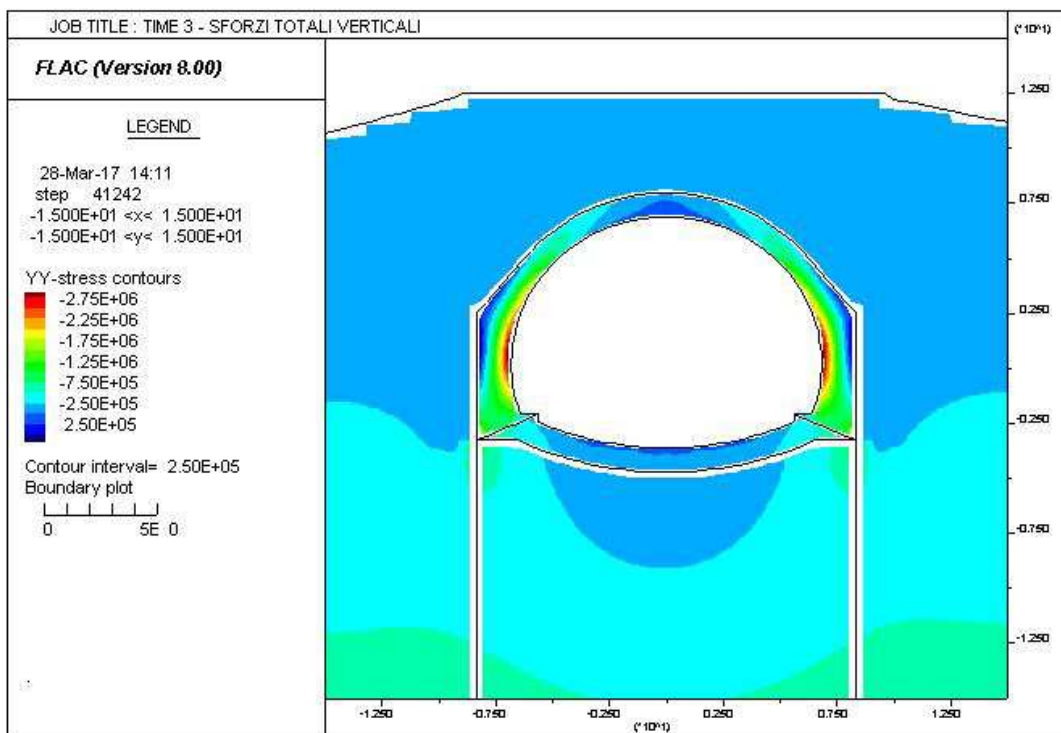
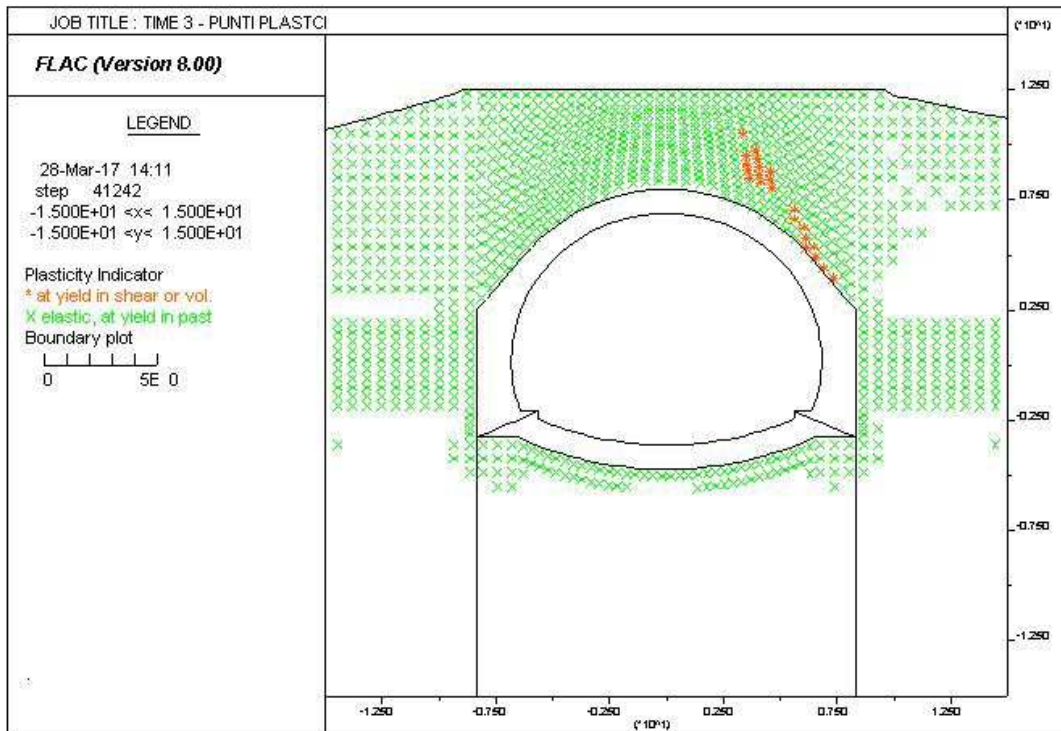
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



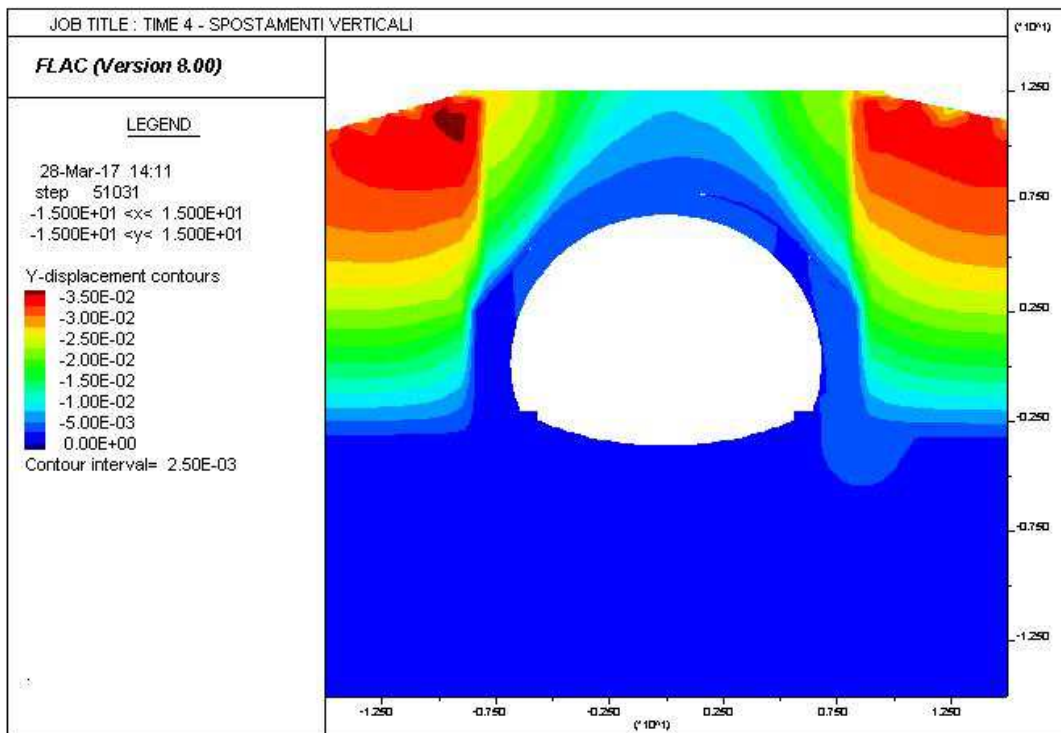
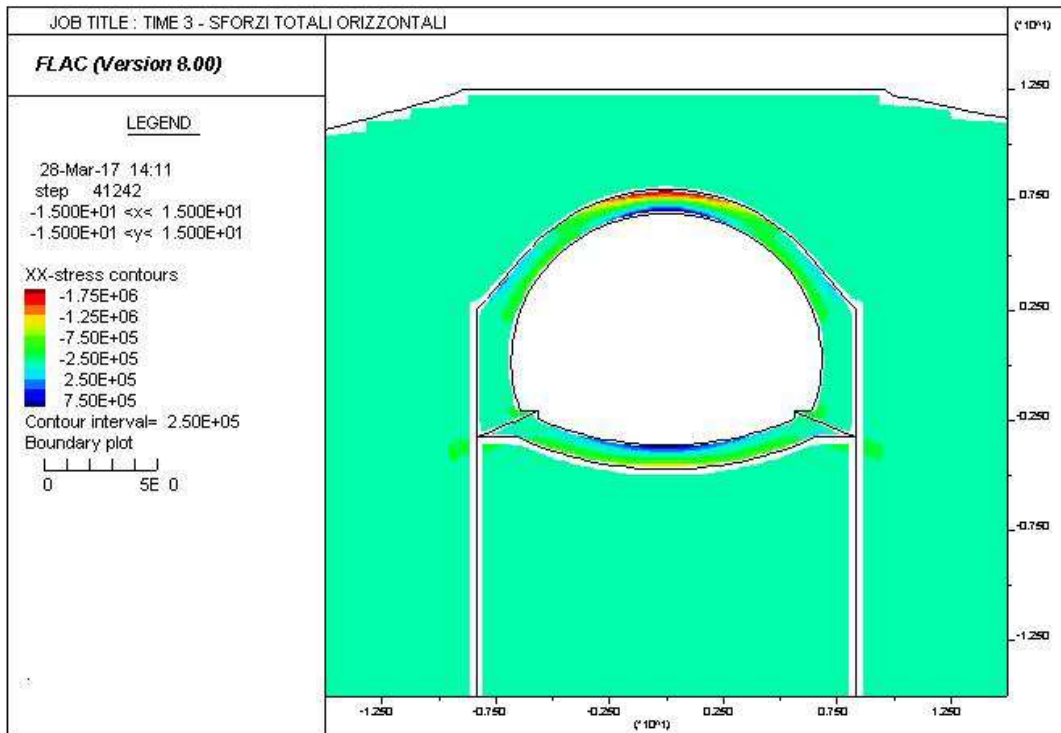
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



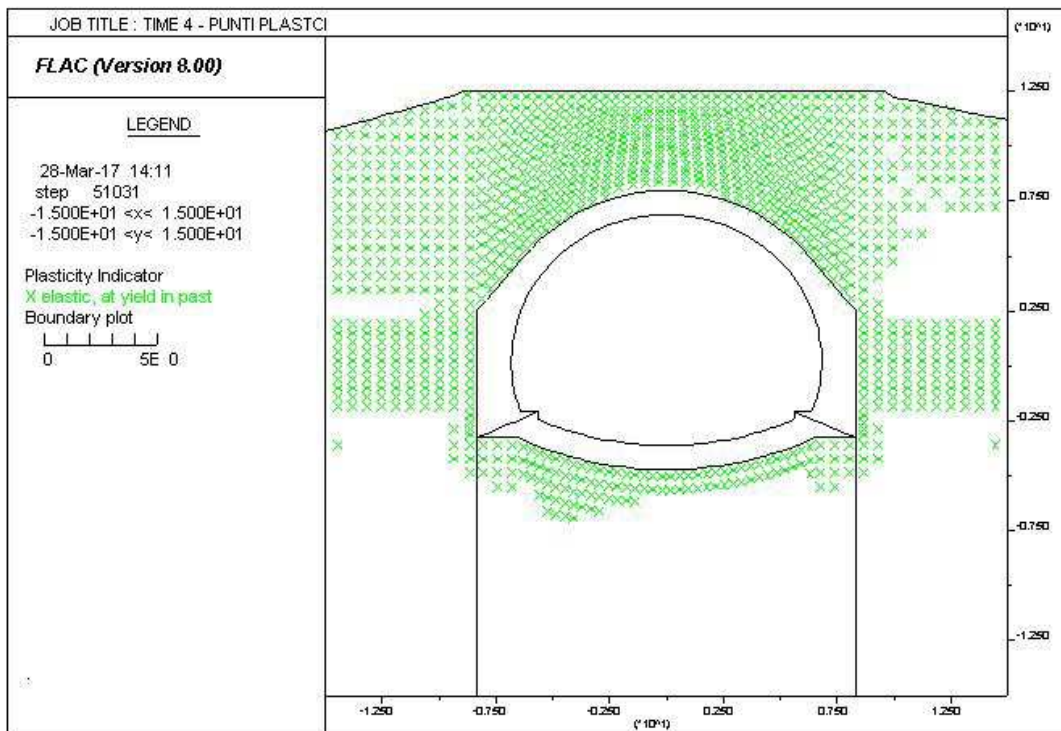
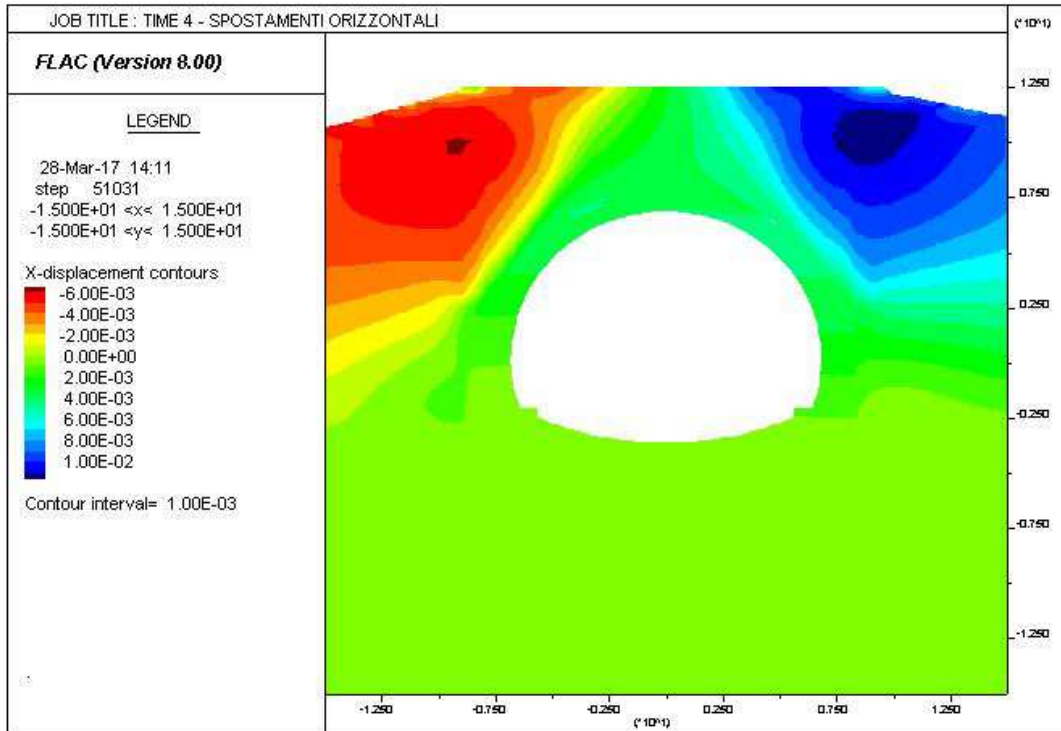
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



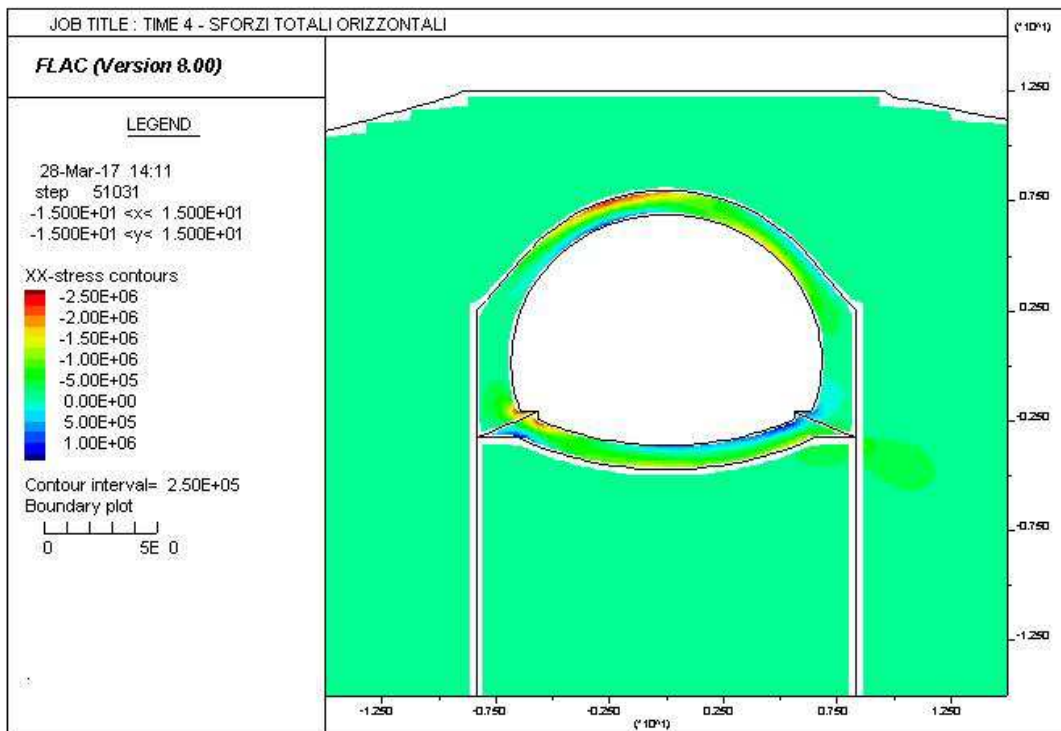
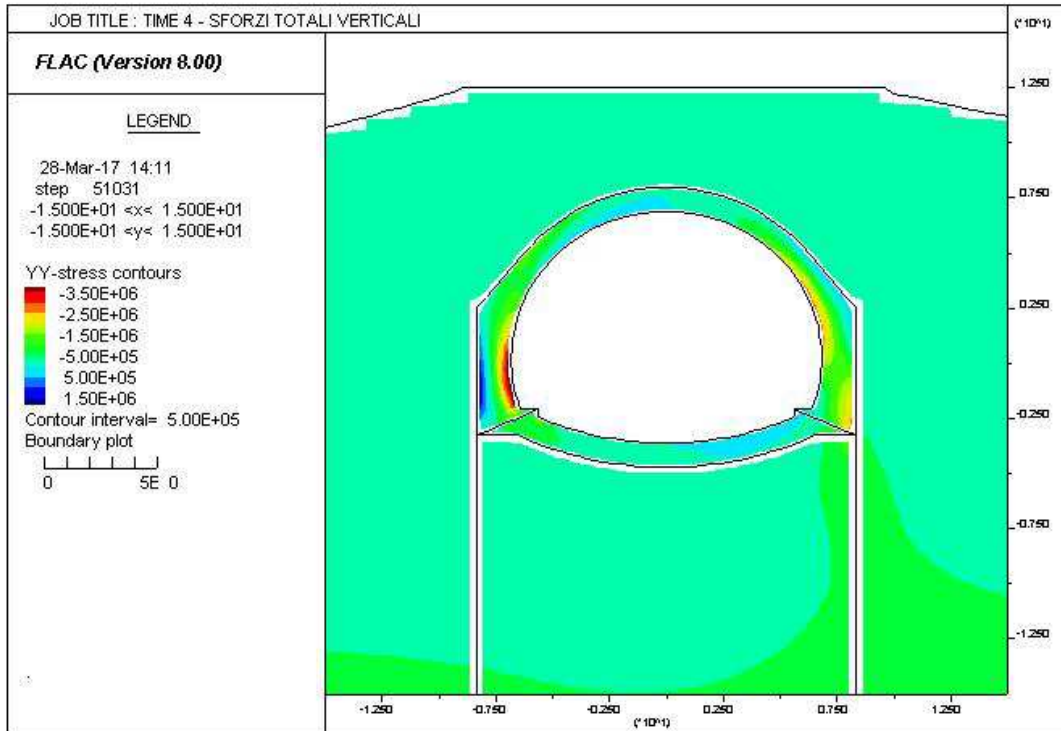
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



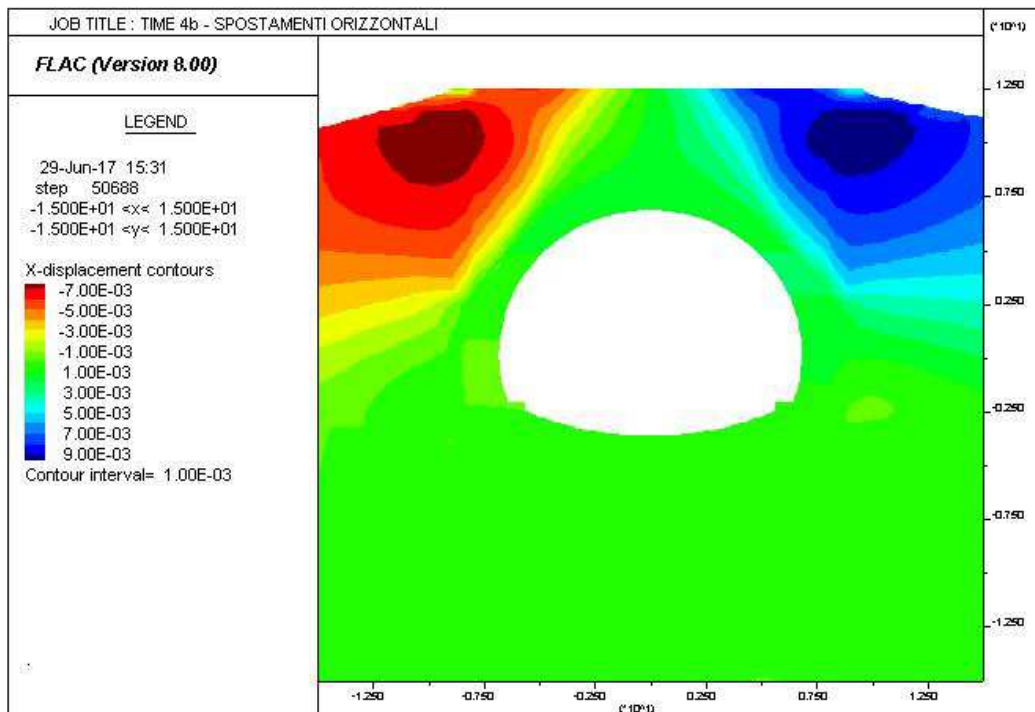
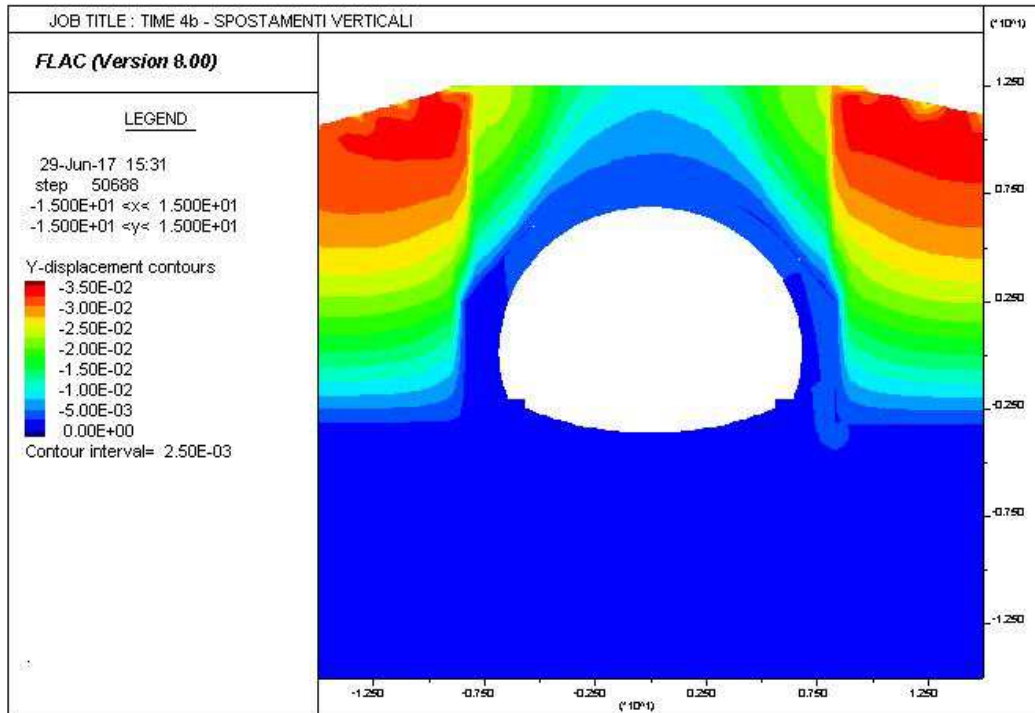
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



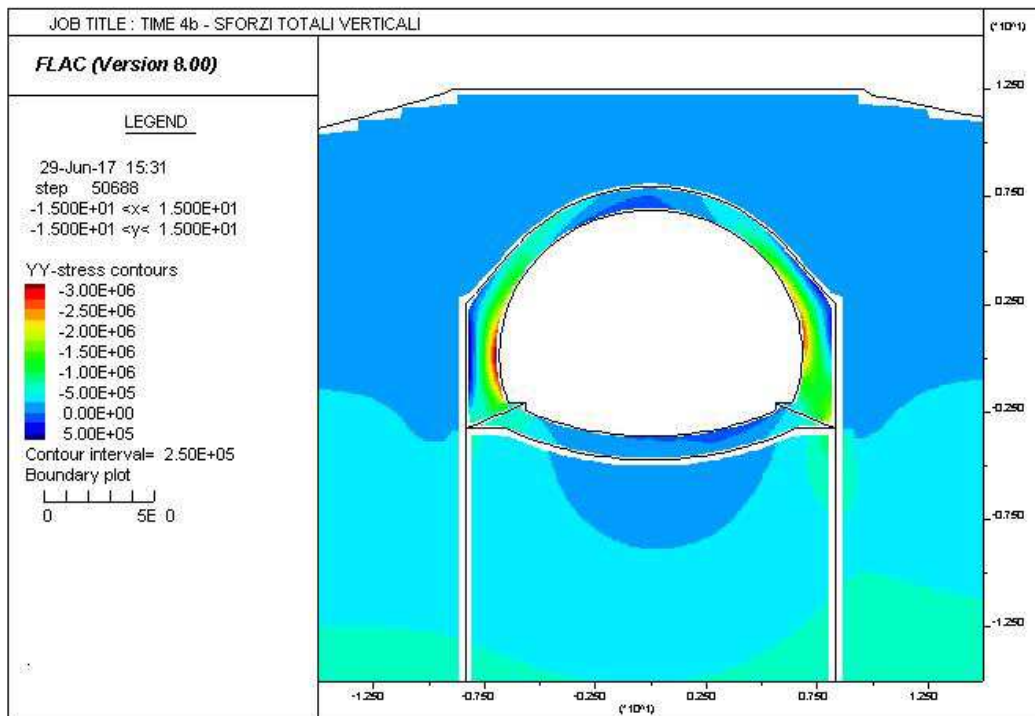
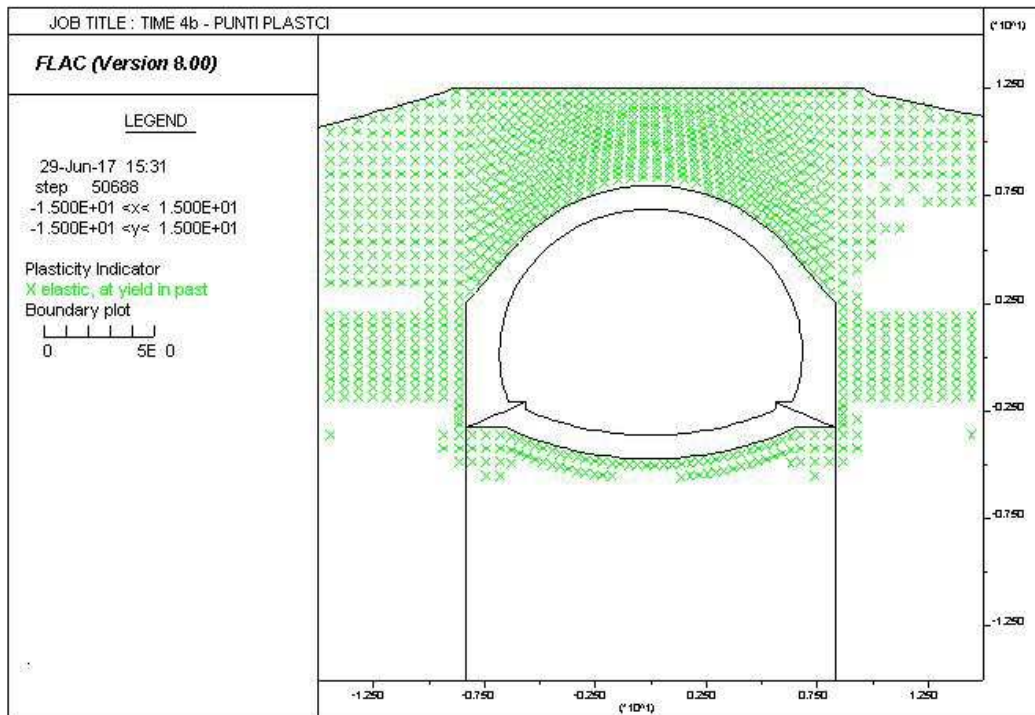
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



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

