

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

**TRATTA A.V. /A.C. TERZO VALICO DEI GIOVI PROGETTO ESECUTIVO**

**GALLERIA NATURALE DI VALICO  
GALLERIA A SINGOLO BINARIO  
Tratta 3 – WBS GN14K, GN14M, GN15K, GN15N  
Verifiche di resistenza al fuoco**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI	
Consorzio <b>Cociv</b> Ing. N. Meistro		

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I G 5 1	0 4	E	C V	R H	G N 0 0 0 0	0 0 3	A

Progettazione :								
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione	COCIV	25/05/2017	A.DiSalvo	25/05/2017	A. Mancarella	25/05/2017	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:	File: IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00
-----------	---------------------------------------



<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p><b>CODIV</b> Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	
	<p>IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00</p>	<p>Foglio 3 di 62</p>

## INDICE

INDICE.....		3
1. INTRODUZIONE.....		5
2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....		5
3. MATERIALI IMPIEGATI.....		5
3.1. Gallerie naturali.....		5
4. VERIFICHE AL FUOCO .....		6
4.1. Analisi accoppiata termo-meccanica .....		9
4.2. Proprietà meccaniche a caldo .....		9
4.3. Proprietà termiche.....		13
4.4. Modello di trasmissione del calore.....		18
4.5. Fasi di calcolo .....		18
5. SINTESI DEI RISULTATI.....		19
5.1. Sezione 1 – Copertura 500 m Sezione tipo B0/1sb .....		20
5.1.1. Distribuzione di temperatura .....		20
5.1.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo .....		23
5.1.3. Stati tensionali e deformativi .....		28
5.1.4. Verifiche tensionali.....		33
5.2. Sezione 2 – Copertura 500 m Sezione tipo C4sb.....		37
5.2.1. Distribuzione di temperatura .....		37
5.2.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo .....		40
5.2.3. Stati tensionali e deformativi .....		45
5.2.4. Andamento delle azioni interne nella struttura.....		50
6. VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO.....		53
6.1. Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©) .....		53
6.2. Procedura di calcolo e verifica .....		53
6.3. Caratteristiche termiche dei materiali .....		54
6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno.....		58
6.5. Risultati e verifiche .....		61
7. CONCLUSIONI .....		62

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00

Foglio  
4 di 62

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00
	Foglio 5 di 62

## 1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è lo studio del comportamento al fuoco del rivestimento definitivo della galleria naturale di Valico a singolo binario e la verifica di resistenza in tali condizioni per la tratta in esame (Tratta 3). È stato in particolare verificato il comportamento delle sezioni maggiormente applicate relative agli estremi delle condizioni geomeccaniche possibili (Ap\_Gr1-Gr3), considerando coperture rappresentative della maggior parte della tratta.

Per quanto riguarda il dimensionamento dell'opera in oggetto in assenza delle azioni dovute all'incendio, l'inquadramento geologico/geotecnico e a quanto non contenuto nel seguito si rimanda alla relativa Relazione di calcolo".

## 2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI

I principali riferimenti normativi adottati sono:

- Decreto Interministeriale 28/10/2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie"
- Decisione della Commissione Europea 2008/163/CE "relativa alla specifica tecnica di interoperabilità concernente la sicurezza nelle gallerie ferroviarie nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità"
- Decreto Ministero lavori Pubblici 9/01/1996: Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- Decreto Ministero Lavori Pubblici 16/01/1996: Norme tecniche relative ai "Carichi generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi".
- UNI EN 1992:2005 – Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo

## 3. MATERIALI IMPIEGATI

### 3.1. Gallerie naturali

#### Rivestimenti definitivi

Acciaio per armatura:	B450 C
Calcestruzzo strutturale:	C25/30

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00
	Foglio 6 di 62

#### 4. VERIFICHE AL FUOCO

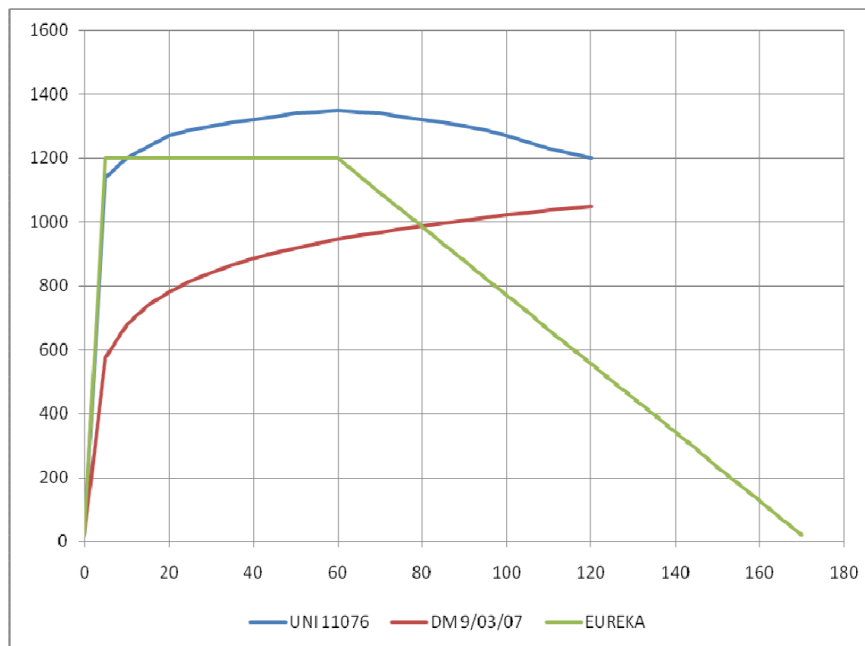
Le verifiche al fuoco sono state condotte in modo da tenere in conto dell'effetto delle coazioni interne agenti sui rivestimenti definitivi della galleria in oggetto in caso di incendio (sollecitazioni "a caldo") e della resistenza "a caldo" dei materiali impiegati. Per poter cogliere il corretto stato sollecitativo si è ricorso all'ausilio del software di calcolo FLAC 7.0, prodotto da Itasca Consulting, mentre per le successive verifiche sezionali "a caldo" è stato utilizzato il software RAF 10.0 sviluppato dalla Aztec Informatica ©.

Il lavoro è stato articolato in due fasi nel seguito descritte.

##### FASE 1 – Sviluppo delle modellazioni numeriche in caso di incendio

Le analisi sono state condotte partendo dalle condizione di carico "a freddo" presentate nella Relazione di Calcolo relativa alla tratta in esame. Nel dettaglio, sono state sviluppate simulazioni numeriche alle differenze finite al fine di cogliere lo stato di sollecitazione agente sui rivestimenti definitivi in accordo con due differenti curve di incendio: "EUREKA" ed "RWS". Quasi tutti i paesi che utilizzano la curva RWS, compresa l'Italia, hanno deciso di limitare il programma termico a due ore, in quanto si presume che dopo tale tempo i soccorritori siano in grado di avvicinarsi alla fonte di fuoco e cominciare la loro opera di spegnimento. I recenti casi di incendi di grandi dimensioni, ed in particolare quello del Monte Bianco, hanno dimostrato che le temperature all'interno delle gallerie sono troppo alte per consentire un intervento di soccorso anche dopo molte ore e quindi alcune nazioni hanno pensato di estendere la curva RWS fino a 180 minuti (Austria e Svizzera).

Nel seguito si riporta la rappresentazione grafica delle due curve sopra descritte in comparazione alla curva relativa all'incendio standard (ISO 834), dalla quale si deduce la maggior severità delle azioni adottate per la verifica.



**Figura 1 Comparazione tra le curve d'incendio**

La prima curva d'incendio considerata, così come indicato nelle normative S.T.I. (direttiva 2008/163/CE), è quella definita "curva Eureka". Tale funzione presenta un primo tratto fino al tempo  $T=5$  minuti in cui la temperatura cresce linearmente fino a raggiungere i  $1200^{\circ}\text{C}$ , seguito da una seconda fase a temperatura costante fino al tempo  $T=60$  minuti ed infine da un terzo tratto discendente che raggiunge i  $20^{\circ}\text{C}$  a 170 minuti. Visto l'andamento descritto i modelli terranno conto di tre condizioni di carico termico relative ai seguenti step temporali: 5, 60 e 120 minuti.

Il secondo approccio, relativo al D.M. 28/ottobre/2005 "Sicurezza in Galleria", fa riferimento invece alla 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". La curva è stata definita 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. La curva è caratterizzata da un rapido incremento delle temperature fino ai  $1200^{\circ}\text{C}$  a 10 minuti, un massimo di  $1350^{\circ}\text{C}$  a 60 minuti e un ritorno a  $1200^{\circ}\text{C}$  a 120 minuti. In questo caso il carico di incendio utilizzato è relativo unicamente alla condizione dei 120minuti, condizione valutata come la più critica negli studi effettuati.

Curva temperatura/tempo per tunnel

Tempo min	Curva tunnel °C
0	20
5	1 140
10	1 200
15	1 235
20	1 270
25	1 290
30	1 300
35	1 312
40	1 320
45	1 330
50	1 340
55	1 345
60	1 350
65	1 345
70	1 340
75	1 330
80	1 320
85	1 312
90	1 300
95	1 290
100	1 270
105	1 250
110	1 230
115	1 215
120	1 200

Figura 2 Valori della temperatura in funzione del tempo secondo la curva RWS

FASE2 – Verifiche sezionali “a caldo”

I risultati delle analisi precedenti vengono verificati mediante il programma RAF 10.0 prodotto dalla Aztec Informatica © 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 in calcestruzzo. La diffusione del calore all'interno del materiale è valutata attraverso una analisi non lineare agli elementi finiti considerando i fenomeni di conduzione, convezione ed irraggiamento. 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. Il programma permette lo sviluppo della modellazione con entrambe le curve precedentemente presentate, le quali vengono inserite per via tabellare.



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00
	Foglio 9 di 62

#### 4.1. Analisi accoppiata termo-meccanica

La valutazione delle sollecitazioni che nascono nel rivestimento definitivo della galleria soggetta all'azione termica di un incendio è stata affrontata per mezzo di uno specifico approccio che ha visto l'uso accoppiato di un'analisi termica e un'analisi meccanica. Tale procedimento è stato sviluppato per mezzo del codice di calcolo FLAC 7.0, il quale ha permesso di determinare lo stato tensionale e deformativo della galleria non solo per la presenza dei carichi statici corrispondenti alle tensioni litostatiche ed alle forze derivanti dallo scavo, ma anche per lo sviluppo delle dilatazioni termiche e del decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali causate dalla variazione della temperatura all'interno della struttura stessa.

La rappresentazione del comportamento meccanico del calcestruzzo è stata basata su un modello avente rottura alla Tresca, imponendo al materiale un angolo di attrito nullo ed una coesione pari a metà della resistenza ultima dello stesso ad una data temperatura. La scelta è stata effettuata in modo che all'aumentare della temperatura, laddove localmente l'incremento di sollecitazione non fosse compatibile con la resistenza del materiale "a caldo", gli sforzi possano redistribuirsi all'interno della sezione fino ad assumere una configurazione accettabile ai fini della stabilità dell'opera. In tale modo è possibile evitare a priori quello che potrebbe avvenire impiegando un modello perfettamente lineare, ovvero che durante l'evoluzione del fenomeno in talune parti della struttura ad un dato intervallo temporale si arrivi ad un superamento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Si consideri inoltre che il modello numerico è stato impostato in maniera tale che i parametri meccanici, una volta decaduti, non si ristabiliscano una volta diminuita la temperatura. Il raggiungimento di una configurazione finale nel calcolo con deformazioni ritenute accettabili garantisce quindi in maniera implicita che durante l'arco temporale oggetto di analisi la struttura sia in grado di resistere alla sollecitazione di incendio.

Per quanto riguarda il legame sforzi deformazioni si è considerato un andamento lineare impiegando il modulo elastico secante del calcestruzzo  $E_c$ . Tale grandezza risulta variabile nel tempo e nello spazio (lungo la sezione in direzione radiale) a causa dell'evoluzione della temperatura nel rivestimento stesso. La legge di decadimento di tale parametro meccanico, impostata nel codice di calcolo FLAC, verrà descritta in dettaglio nel seguito.

Infine, per ciò che concerne la modellazione dell'azione termica, è stata assegnata una specifica condizione al contorno per la parte di struttura esposta al fuoco. Sulla superficie interna della galleria (intradosso) è stata assegnata la curva d'incendio considerata agente esclusivamente sulle zone di galleria direttamente esposte al fuoco. Nella zona di estradosso del rivestimento e laddove l'incendio non può lambire direttamente la struttura (come in arco rovescio, a causa della presenza del riempimento), la temperatura è assegnata al valore costante di  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2. Proprietà meccaniche a caldo

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche a caldo dei materiali, si fa riferimento ai paragrafi 3.2.2 e 3.2.3 dell'UNI EN 1992-1-2 (2005). Nelle tabelle e figure sottostanti sono riportati i valori dei più importanti parametri meccanici del calcestruzzo compresso e dell'acciaio, in funzione della variazione della temperatura del materiale stesso.

- **Calcestruzzo (aggregati silicei)**

Per quanto concerne le proprietà meccaniche del calcestruzzo, è stato fatto riferimento alla tipologia a peso normale con aggregati di tipo silicei.

Concrete	Aggregati silicei		
	temp.θ	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
	[°C]	[-]	[-]
	1	2	3
	20	1.00	0.0025
	100	1.00	0.0040
	200	0.95	0.0055
	300	0.85	0.0070
	400	0.75	0.0100
	500	0.60	0.0150
	600	0.45	0.0250
	700	0.30	0.0250
	800	0.15	0.0250
	900	0.08	0.0250
	1000	0.04	0.0250
	1100	0.01	0.0250
	1200	0.00	-

**Tabella 1- Caratteristiche del calcestruzzo in funzione della temperatura**

Calcestruzzo  $R_{ck}=30$  MPa;  $f_{ck}=24.9$  MPa:

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{c,\theta}$ [MPa]	24.9	23.655	21.165	18.675	14.94	11.205	7.47	3.74	1.992	0.996	0.249	0

**Tabella 2- Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura ( $R_{ck} = 30$  MPa)**

Per ciò che concerne la valutazione del modulo elastico del calcestruzzo  $E_{c,\theta}$ , anch'esso variabile in funzione della temperatura, si è fatto riferimento al legame costitutivo presentato nella stessa normativa e illustrato nella figura seguente:

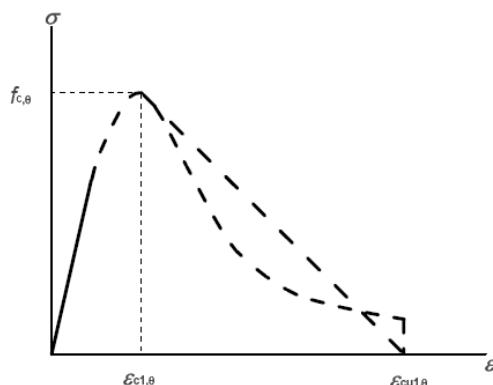


Figura 3 – Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

Nelle analisi “a caldo”, illustrate nel seguito, è stato considerato il modulo elastico “secante” determinato, con riferimento al legame costitutivo illustrato precedentemente, come il rapporto tra la resistenza di picco e la deformazione associata, per un assegnato valore della temperatura:

$$E_{c,\theta} = f_{c,\theta} / \epsilon_{c1,\theta}$$

Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei moduli elastici secanti in funzione della temperatura per un calcestruzzo con  $f_{ck}$  24.9 MPa:

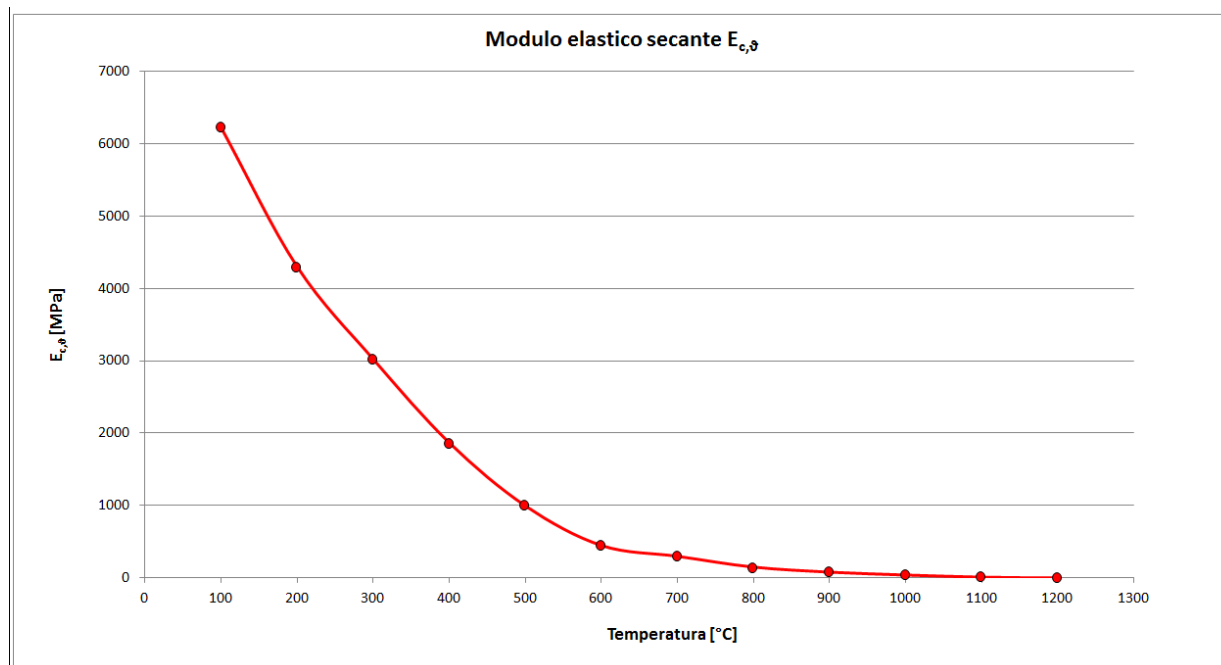


Figura 4 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura ( $R_{ck} = 30$  MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$E_{c,\theta}$ [MPa]	6225	4301	3024	1868	996	448	299	149	80	40	10	0

Tabella 3- Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura ( $R_{ck} = 30$  MPa)

Si riporta infine la coesione impiegata nel modello di calcolo secondo il modello di rottura alla Tresca del materiale: a favore di sicurezza si è impiegata una coesione pari a

$$c'_{,\theta} = f_{cd,\theta} / 2 = 0.85 \times f_{c,\theta} / 2$$

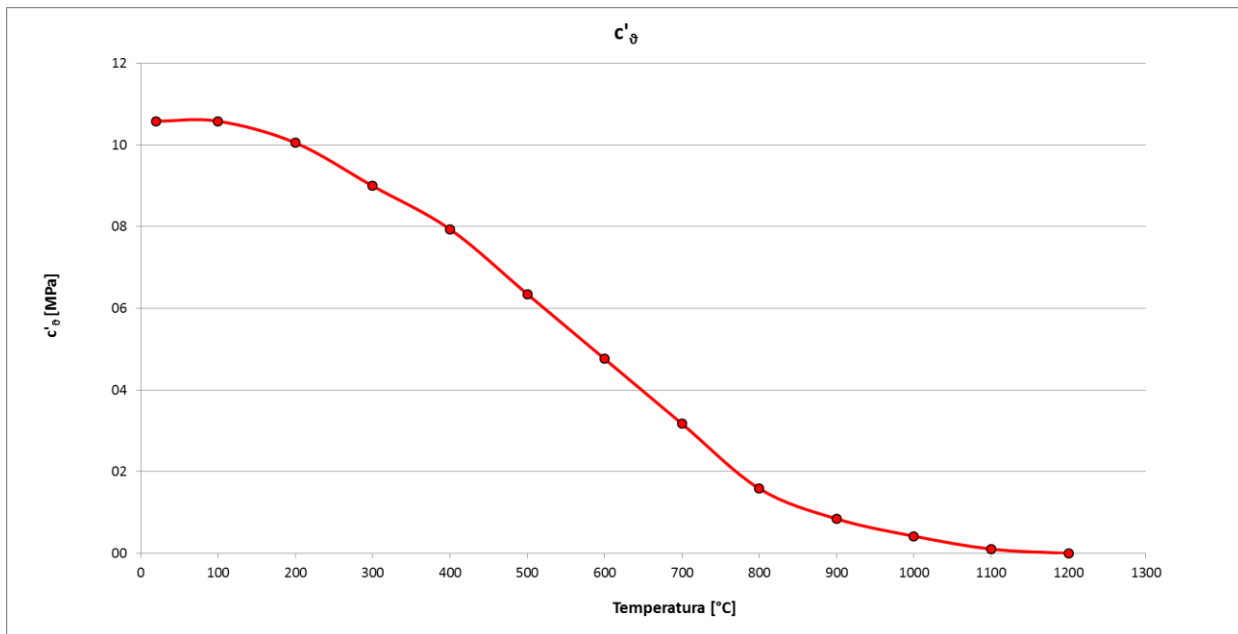


Figura 5 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura ( $R_{ck} = 30$  MPa)

T [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
c'_{,\theta} [MPa]	10.6	10.6	10.1	9.0	7.9	6.3	4.8	3.2	1.6	0.8	0.4	0.1	0.0

Tabella 4- Variazione della coesione c' in funzione della temperatura ( $R_{ck} = 30$  MPa)

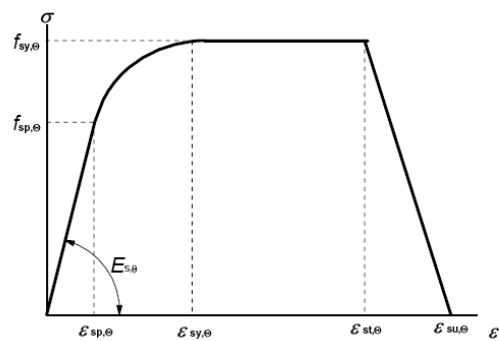
Si consideri che il decadimento dei parametri meccanici è stato modellato con riferimento alla temperatura massima raggiunta fino all'istante temporale considerato. In tale maniera si garantisce che, laddove si verifichi una diminuzione di temperatura per il materiale durante l'evoluzione della curva di incendio, non si verifichi contestualmente un ripristino delle caratteristiche meccaniche.

- **Acciaio per armatura**

La variazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio in funzione della temperatura dipendono dal tipo di acciaio e dal tipo di lavorazione. Facendo riferimento al paragrafo 3.2.3 dell'EN 1992-1-2 e considerando un acciaio di tipo N laminato a caldo, nella figura seguente è illustrato il legame costitutivo del materiale mentre i rapporti riduttivi del modulo di elasticità, del limite di proporzionalità e della resistenza massima sono presentati nella seguente tabella:

Steel Temperature $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 5 – Caratteristiche dell'acciaio in funzione della temperatura



Range	Stress $\sigma(\theta)$	Tangent modulus
$\epsilon \leq \epsilon_{sp,\theta}$	$\epsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\epsilon_{sp,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)}{a[a^2 - (\epsilon - \epsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\epsilon_{sy,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\epsilon_{st,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\epsilon - \epsilon_{st,\theta}) / (\epsilon_{su,\theta} - \epsilon_{st,\theta})]$	-
$\epsilon = \epsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parameter <sup>1)</sup>	$\epsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\epsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\epsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,20$ Class A reinforcement: $\epsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Functions	$a^2 = (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

Figura 6 – Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

### 4.3. Proprietà termiche

Sia per l'esecuzione dell'analisi termo-meccanica che per la verifica sezionale a caldo, si è reso necessario definire le proprietà meccaniche e termiche che governano la propagazione del calore

all'interno della sezione. La presenza delle armature ordinarie all'interno della sezione in c.a. della galleria è stata trascurata ai fini della valutazione della mappatura termica.

Di seguito, quindi, sono riportate le leggi di variazione in funzione della temperatura della "conducibilità termica", "calore specifico", "densità" e "coefficiente di espansione termica", relative al solo calcestruzzo con aggregati silicei con riferimento al paragrafo 3.3 dell'UNI EN 1992-1-2 (2005):

- **Conducibilità termica**

La curva di variazione della conducibilità termica è stata definita nel rispetto delle indicazioni della normativa, la quale prevede una curva limite superiore ed una curva limite inferiore, così come riportato nella figura seguente.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta / 100) + 0,0107 (\theta / 100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta / 100) + 0,0057 (\theta / 100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

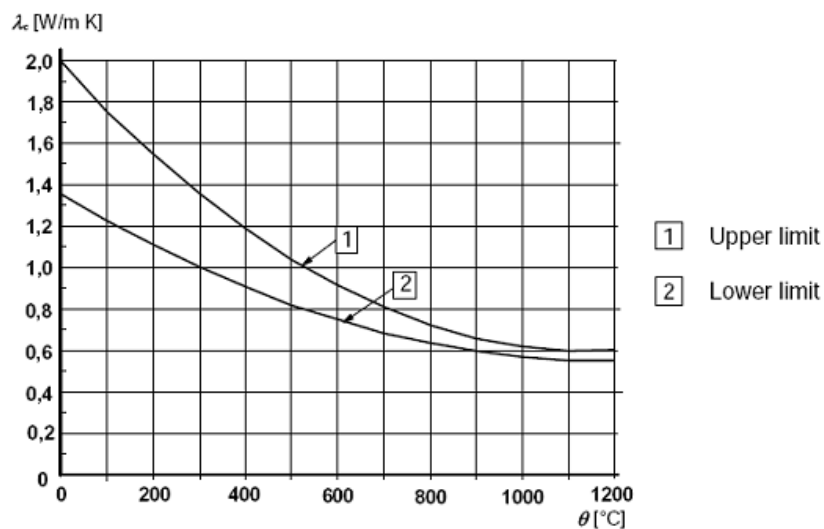


Figura 7 – Legge di variazione della conducibilità termica secondo normativa

T [°C]	0	200	400	600	800	1000	1200
$\lambda_c$ [W/mK]	1.61	1.29	1.04	0.84	0.69	0.61	0.57

Tabella 6 – Valori della conducibilità termica di progetto

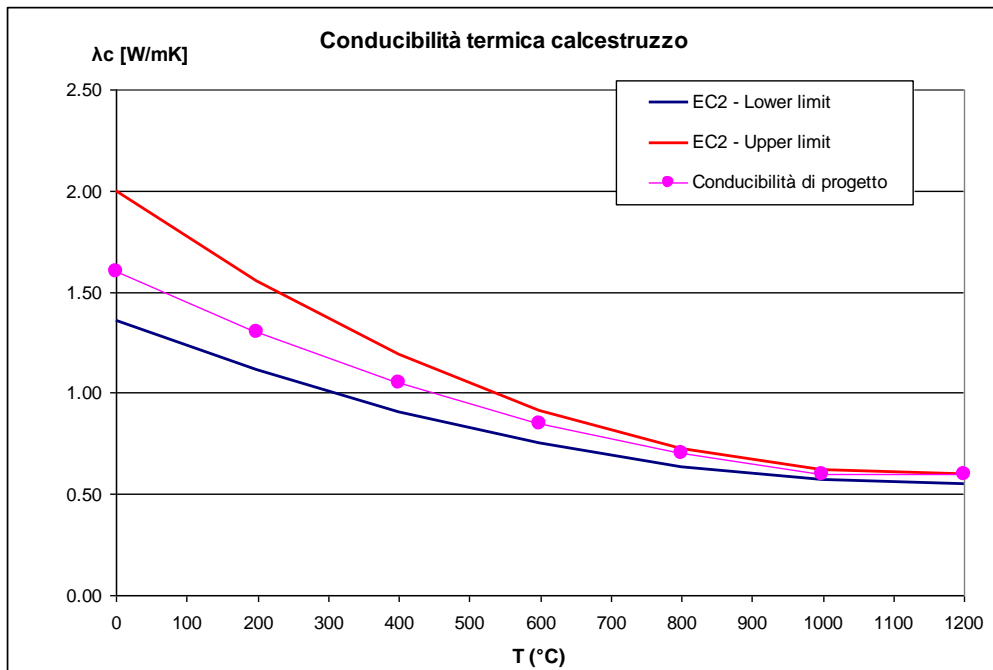


Figura 8 – Conducibilità termica di progetto

- **Calore specifico**

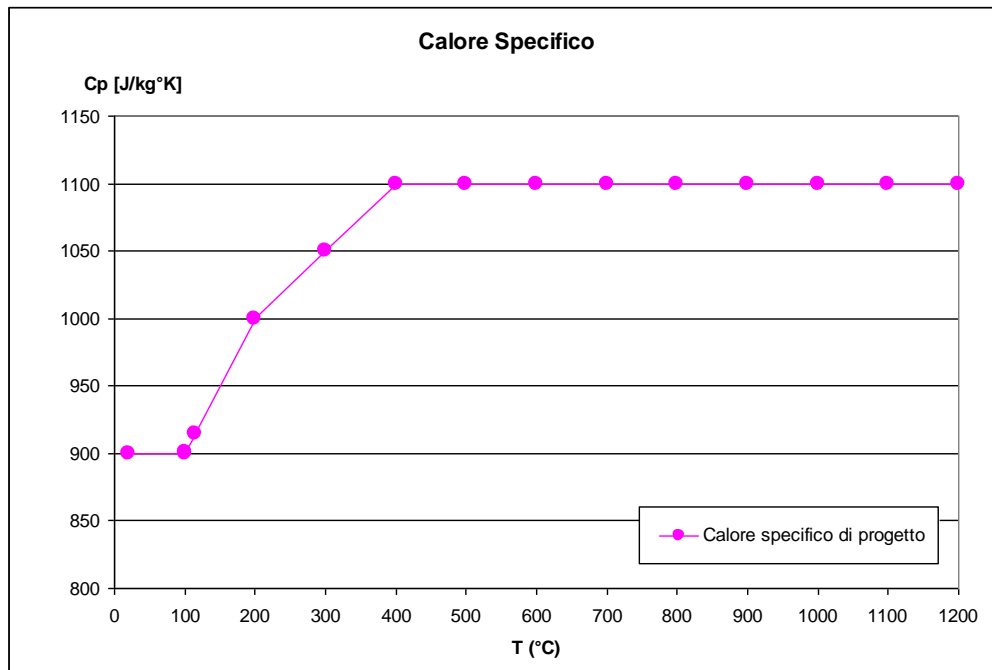
La legge di variazione del calore specifico in funzione della temperatura è riportata nella figura seguente. Secondo la normativa, tale grandezza risulta crescente all'aumentare della temperatura.

$$\begin{aligned}
 c_p(\theta) &= 900 \text{ (J/kg K)} & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)} & \text{for } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg K)} & \text{for } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1100 \text{ (J/kg K)} & \text{for } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Figura 9 – Legge di variazione del calore specifico secondo normativa

T [°C]	20	100	101	115	200	300	1200
$c_p$ [J/kg K]	900	900	901	915	1000	1050	1100

Tabella 7 – Valori del calore specifico di progetto



**Figura 10 – Calore specifico di progetto**

- Densità**

La densità del calcestruzzo subisce una diminuzione all'aumentare della temperatura e di seguito è riportata la relativa legge di variazione fornita dalla normativa:

$$\begin{aligned}
 \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) && \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \\
 \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\theta - 115)/85) && \text{for } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\
 \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) && \text{for } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\
 \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) && \text{for } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

**Figura 11 – Legge di variazione della densità secondo normativa**

- Coefficiente di espansione termica**

La legge di variazione del coefficiente di espansione termica dipende dal tipo di aggregati che costituiscono il calcestruzzo. La normativa fornisce la variabilità, rispetto alla temperatura, della deformazione termica  $\varepsilon_{c(T)}$  con riferimento ad una lunghezza iniziale a 20°C. Da tale grandezza è possibile risalire al coefficiente di espansione termica come:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{\varepsilon_c(T)}{\Delta T}$$



Siliceous aggregates:

$$\epsilon_c(\theta) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}\theta + 2,3 \times 10^{-11}\theta^3 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3} \quad \text{for } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

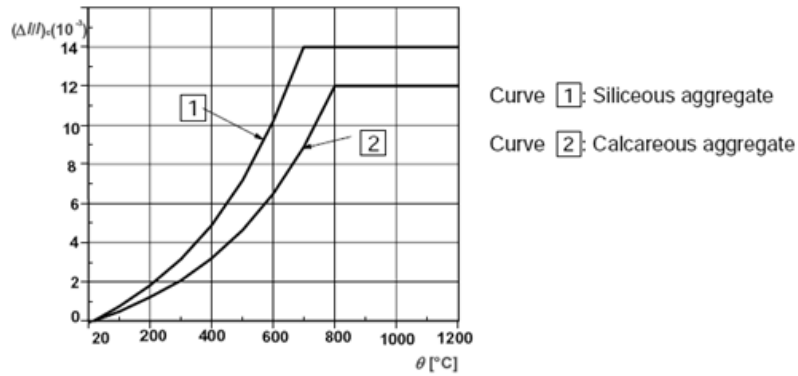


Figura 12 – Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa

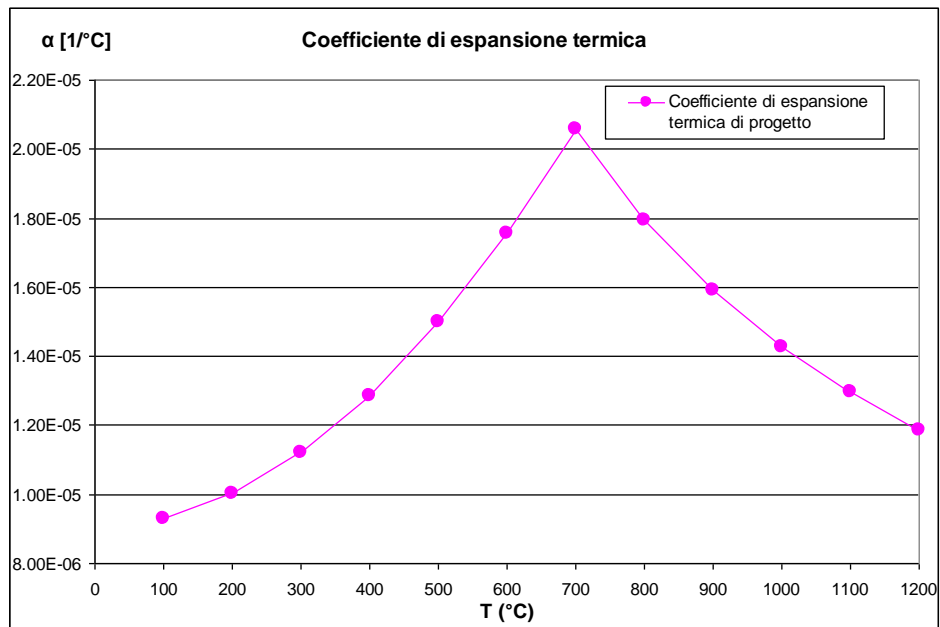


Figura 13 – Coefficiente di espansione termica di progetto

T [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
ε <sub>c</sub>	1,09	7,43	1,80	3,14	4,89	7,20	1,02	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
	E-06	E-04	E-03	E-03	E-03	E-03	E-02	E-02	E-02	E-02	E-02	E-02	E-02
α [1/°C]	1,09	9,29	1,00	1,12	1,29	1,50	1,76	2,06	1,79	1,59	1,43	1,30	1,19
	E-05	E-06	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05	E-05

Tabella 8 – Valori della deformazione termica e del coefficiente alfa per calcestruzzi silicei

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00	Foglio 18 di 62

#### 4.4. Modello di trasmissione del calore

La propagazione del calore all'interno della sezione strutturale è del tipo conduttivo e matematicamente tale fenomeno è governato dall'equazione di Fourier, che definisce la variazione nello spazio e nel tempo della temperatura (incognita del problema). Assumendo una generazione di calore all'interno del volume finito pari a zero e considerando il problema in due sole dimensioni, si ha:

$$\lambda_c \cdot \left( \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t}$$

dove:

T è la temperatura, t è il tempo,  $\lambda_c$  è la conducibilità termica,  $\rho$  è la massa volumica e  $c_p$  è il calore specifico (come già descritto precedentemente, quest'ultimi parametri termici risultano variabili anch'essi nel tempo, in funzione della temperatura raggiunta).

Con la condizione spaziale:

$$T(x, y, t=0) = T_0 = 20 \text{ °C}$$

Con la condizione temporale:

$$\text{div}(\lambda_c \cdot \text{grad}T)_n = h_{\text{net}}$$

Il flusso di calore netto  $h_{\text{net}}$  trasmesso per convezione e irraggiamento su una superficie a contatto con il gas è dato dalla relazione:

$$h_{\text{net}} = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[ (T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4 \right]$$

dove:

$\alpha_c$  è il coefficiente di scambio di calore per convezione assunto pari 25 W/(m<sup>2</sup>°C),  $T_m$  è la temperatura del gas mentre  $T_g$  è la temperatura della superficie esposta,  $\Phi$  è il fattore di configurazione assunto pari a 1,0,  $\varepsilon$  è il coefficiente di remissività risultante assunto pari a 0,8 e  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann pari a 5,7x10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>°C<sup>4</sup>).

Nelle analisi numeriche effettuate la temperatura della superficie interna del rivestimento della galleria è stata assunta pari a quella della curva di incendio assegnata.

#### 4.5. Fasi di calcolo

L'analisi termo-meccanica, viene effettuata partendo dalle condizioni tenso-deformative ottenute al termine dell'analisi "a freddo" (tempo t=0) e presentate nella relazione di calcolo della galleria relativa alla tratta in oggetto. Nel dettaglio viene effettuato il calcolo accoppiato in funzione del tempo della distribuzione delle temperature e dello stato tenso-deformativo nel rivestimento e nel terreno. Il calcolo del transitorio termo-meccanico è stato effettuato mediante un algoritmo di integrazione nel tempo, di tipo totalmente esplicito, delle equazioni che governano il problema

meccanico e il problema di propagazione termica. L'accoppiamento termo-meccanico è governato dalle funzioni che esprimono la dipendenza della densità del calcestruzzo, del modulo elastico, del coefficiente di espansione termica  $\alpha$ , della variazione della conduttività termica e del calore specifico del calcestruzzo in funzione della temperatura.

Nel corso dell'analisi termo-meccanica, sviluppata per due sezioni significative e distintamente per le due curve d'incendio (EUREKA ed UNI11076) è stato eseguito il "salvataggio" completo dello stato del modello per i seguenti tempi: 5, 60 e 120 minuti per la curva EUREKA e 10, 60 e 120 minuti per la curva UNI11076.

## 5. SINTESI DEI RISULTATI

Nel seguito vengono riportati i risultati delle analisi termiche agenti sul rivestimento della prima canna scavata che nelle analisi condotte risulta essere la galleria in sinistra.

Nel dettaglio verranno mostrati i risultati degli output di calcolo con riferimento a  $t$  pari a 60 e 120 minuti mostrando l'andamento della temperatura, del modulo di deformabilità e della coesione nel calcestruzzo.

Come detto nei capitoli precedenti la simulazione parte dall'analisi "a freddo". La mesh di calcolo in corrispondenza è stata modellata adottando un "aspect-ratio" incrementato in corrispondenza dell'intradosso della galleria così da permettere una migliore diffusione termica e una migliore distribuzione delle tensioni in corrispondenza delle zone in cui viene applicato il carico termico, ovvero quella in cui la struttura è soggetta a delle forti variazioni di temperatura.

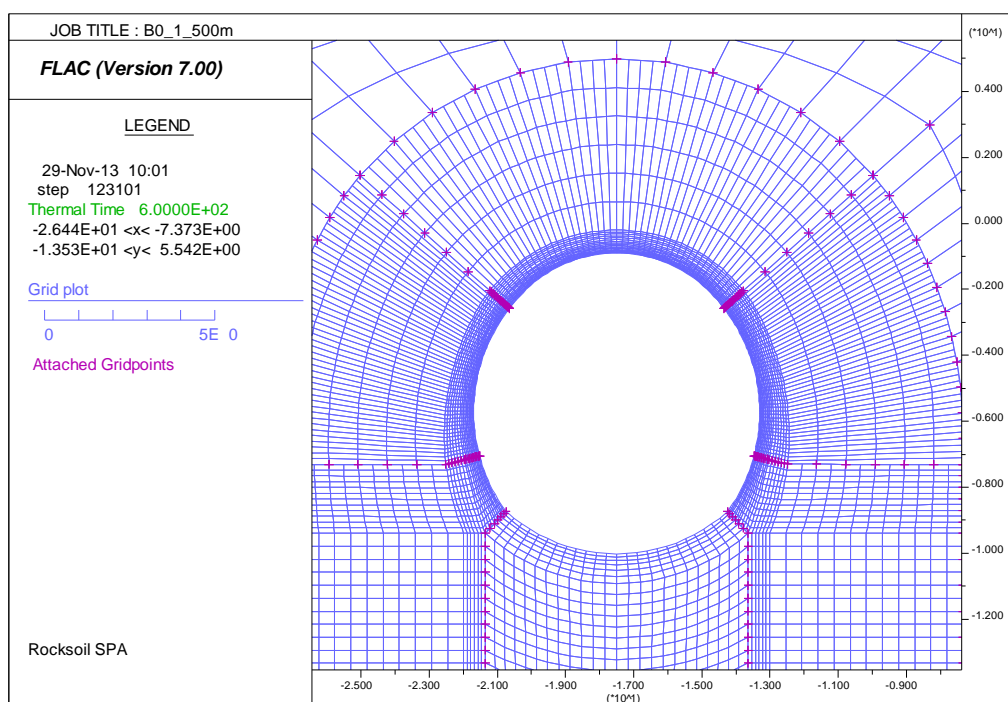
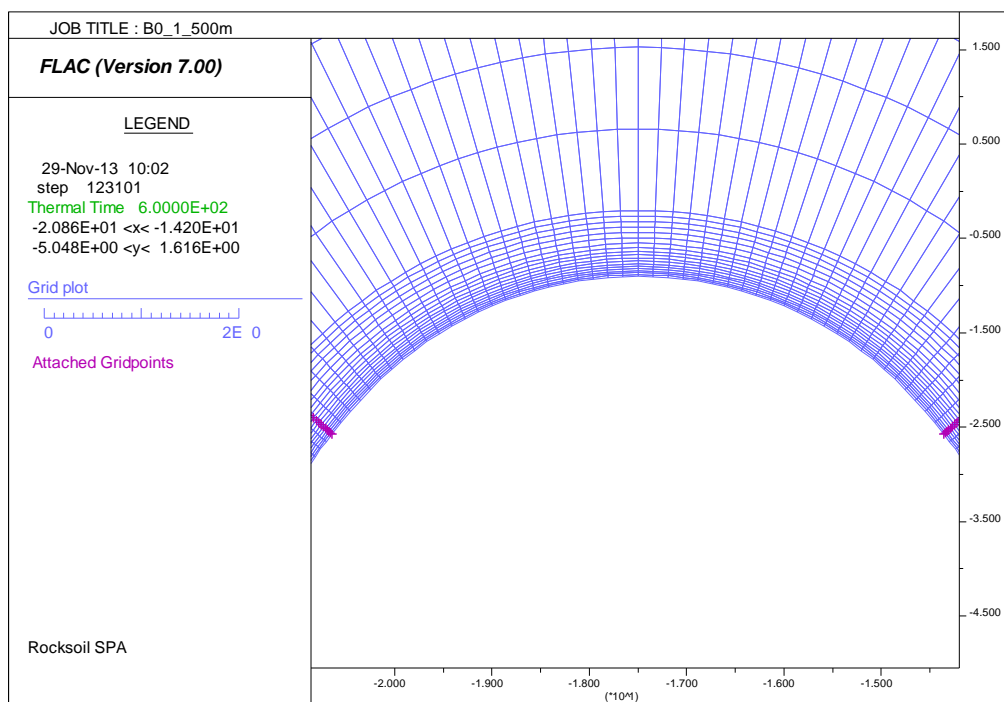


Figura 14 – Mesh di calcolo



**Figura 15 – Mesh di calcolo – Aspect ratio intradosso conci**

In accordo con la relazione strutturale della galleria si sono analizzate le due sezioni di calcolo più applicate lungo l'intera tratta in scavo.

## 5.1. Sezione 1 – Copertura 500 m Sezione tipo B0/1sb

La sezione tipo è rappresentativa del comportamento delle sezioni non armate.

### 5.1.1. Distribuzione di temperatura

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento della temperatura nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) ai tempi di 60 – 120 minuti, per entrambe le curve d'incendio.

Si noti come per entrambe le azioni termiche, nella zona di intradosso direttamente esposta al fuoco, la temperatura a 120 minuti risulta inferiore a quella che si raggiunge a 60 minuti, coerentemente con l'andamento delle curve d'incendio, le quali hanno, come mostrato nei capitoli precedenti, uno sviluppo decrescente superata la soglia dei 60 minuti (questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva EUREKA, in cui si nota un netto decadimento della temperatura nei nodi dell'intradosso). Tale fenomeno risulta limitato agli strati più esterni della sezione, mentre all'interno della sezione lo sviluppo del calore subisce una evoluzione crescente nel tempo anche superata la soglia dei 60 minuti: questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva UNI11076, avente un ramo discendente meno accentuato. Si osservi come solamente i primi 20cm circa in intradosso subiscano un incremento di temperatura, mentre nella restante parte della sezione non si avvertono variazioni di temperatura.

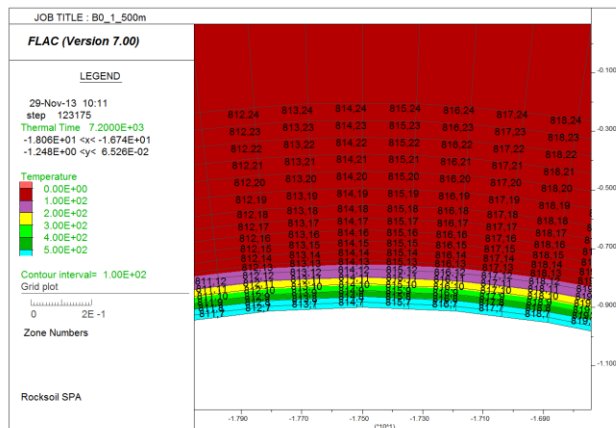
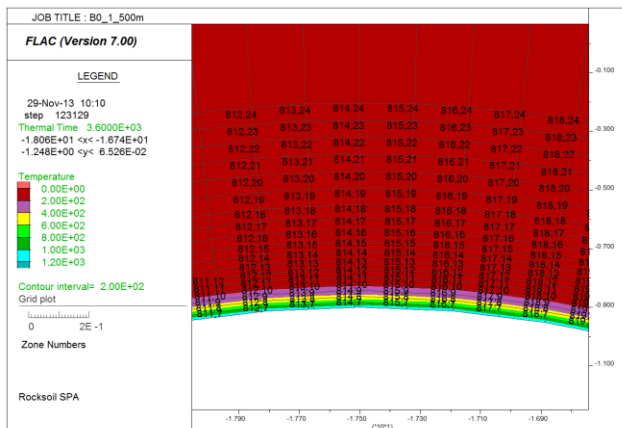


Figura 16 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA

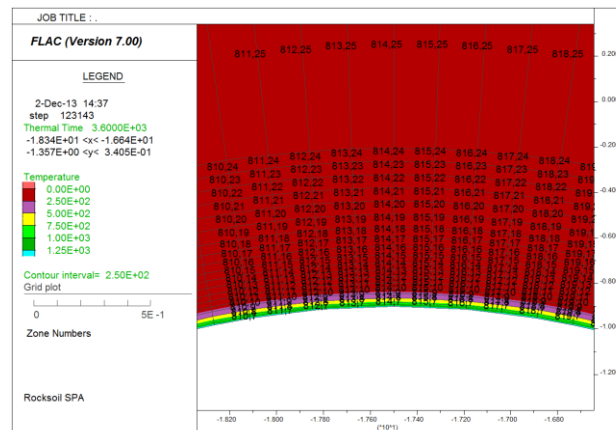
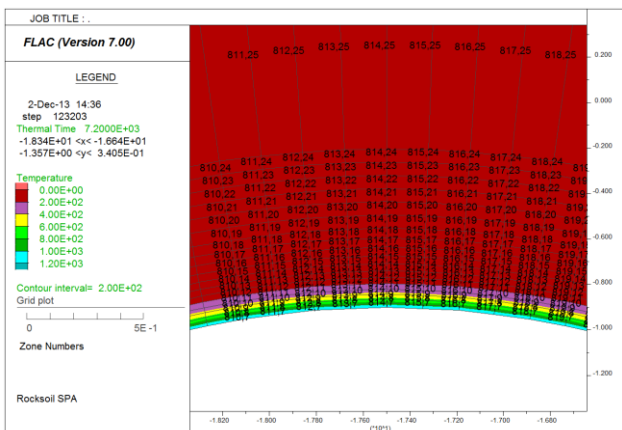
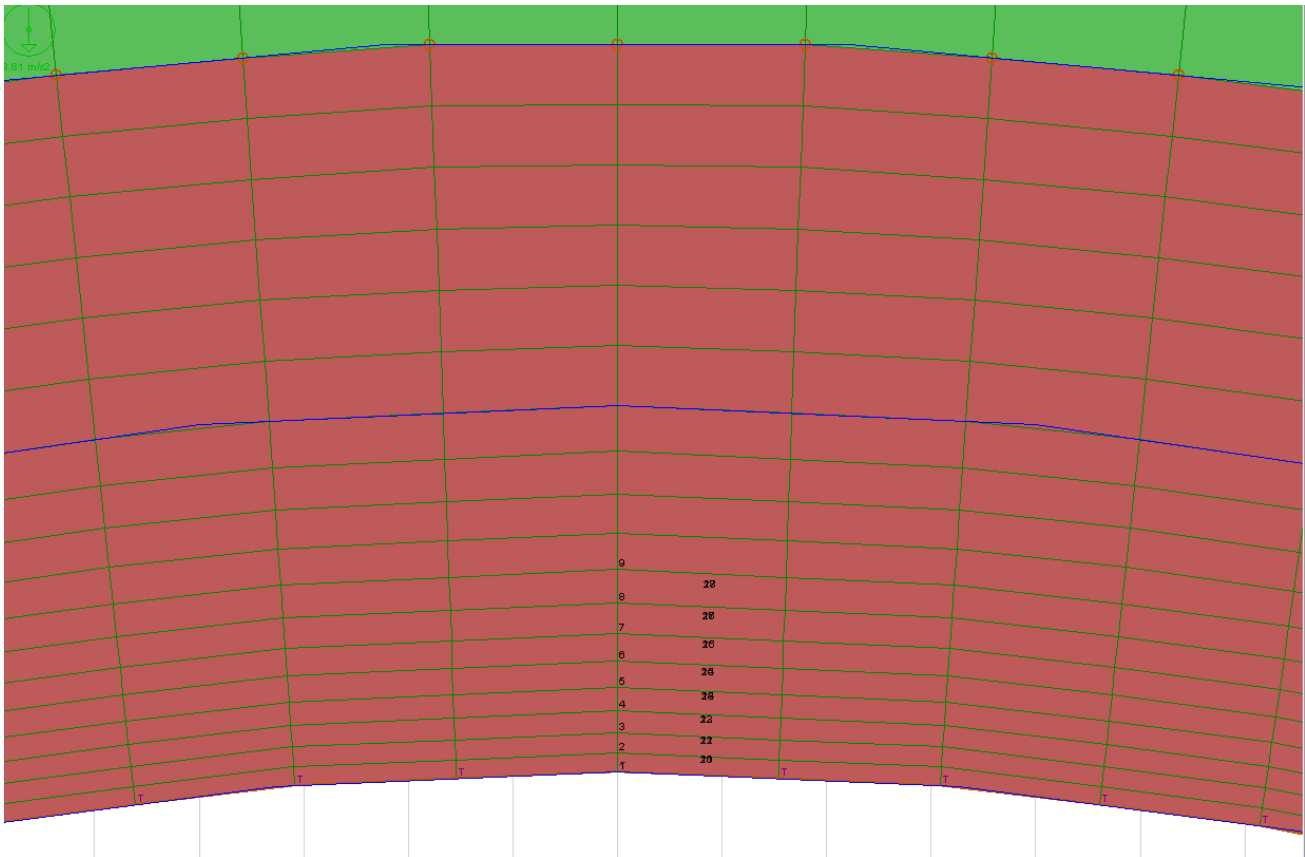


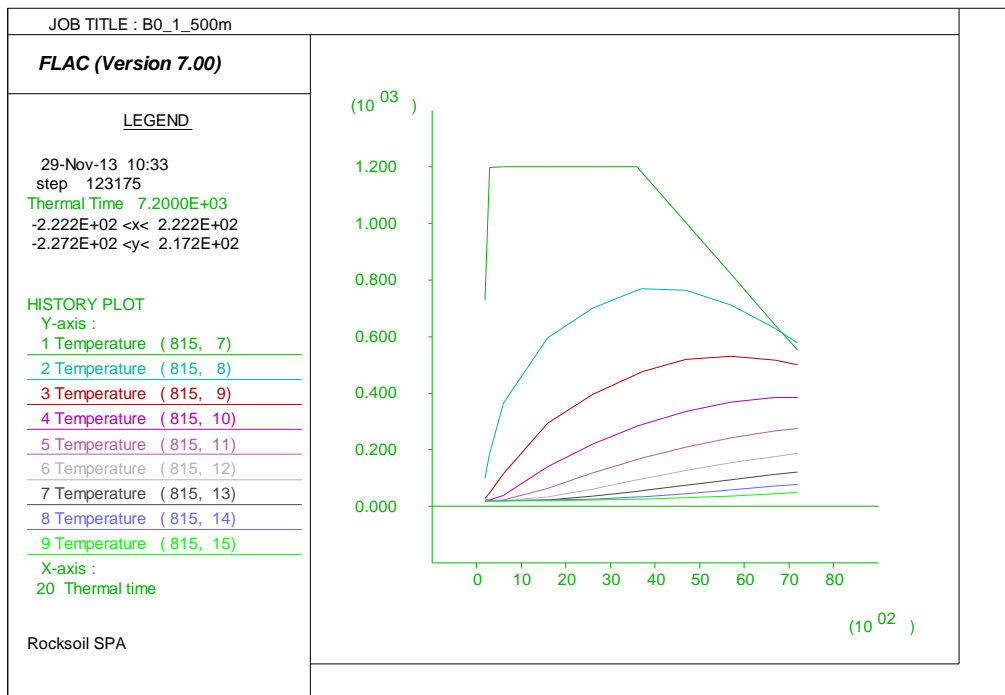
Figura 17 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva UNI11076

Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della temperatura nel rivestimento in funzione del tempo [sec] lungo i punti di controllo in chiave calotta: si veda l'immagine seguente per la posizione di ogni punto monitorato. Di seguito si indica la distanza dall'intradosso del punto monitorato.

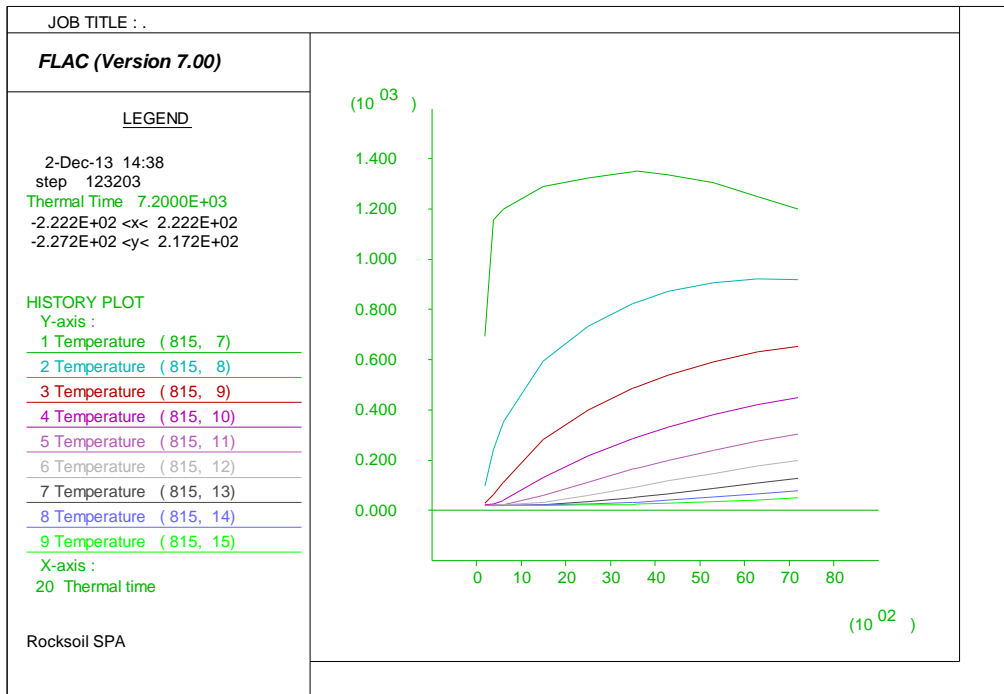
PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA
[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]
1	0	4	-5.78	7	-13.21
2	-1.77	5	-8.06	8	-16.13
3	-3.69	6	-10.53	9	-19.3



**Figura 18 – Punti di controllo per l'evoluzione della temperatura e delle proprietà meccaniche**



**Figura 19 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 20 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva UNI11076**

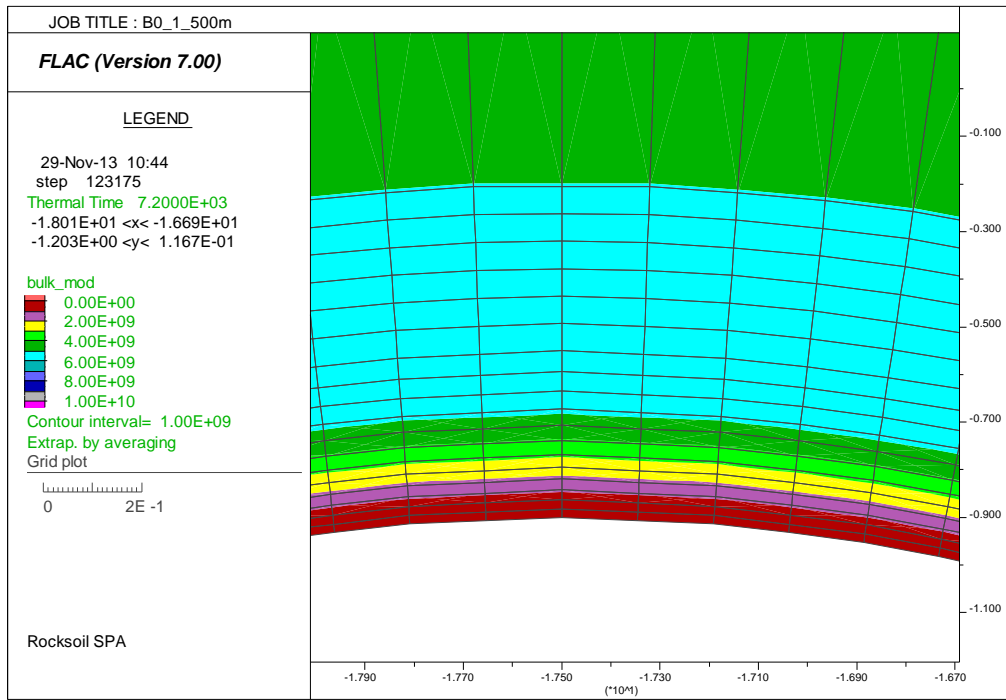
### 5.1.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo di compressibilità ("bulk") impiegato nel codice di calcolo FLAC. I moduli sono legati dalle seguente legge lineare al modulo elastico e quindi l'andamento con la temperatura risulta il medesimo di quest'ultimo.

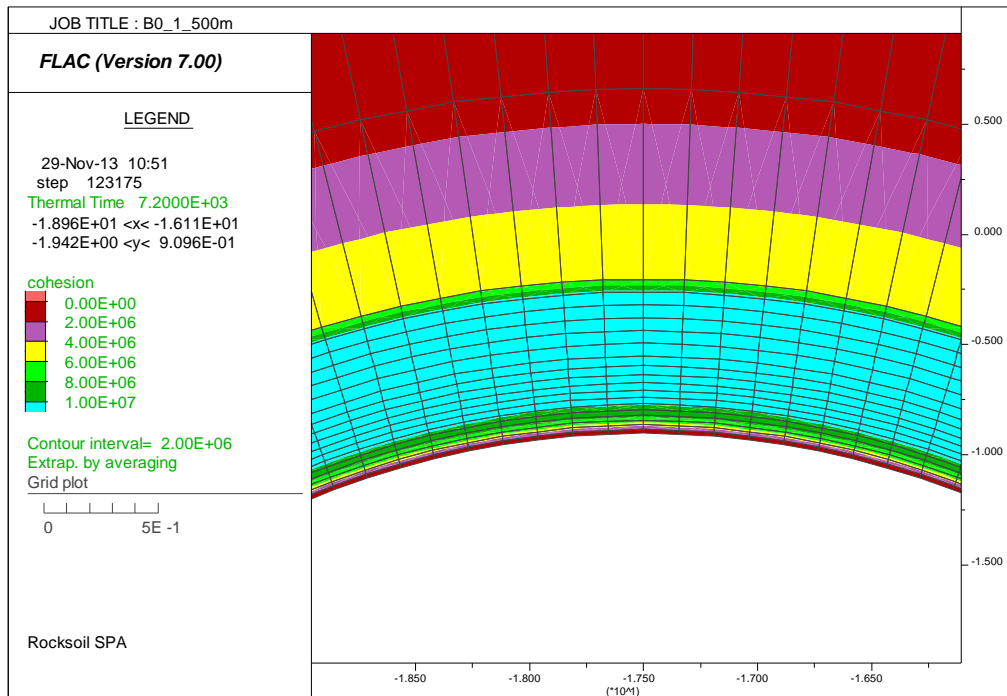
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo "bulk" e della coesione nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) al tempo di 120 minuti, per entrambe le curve d'incendio.

Dai risultati dell'analisi si può constatare la sua evoluzione all'interno della sezione, essendo questo funzione dell'andamento della temperatura. Il decadimento del modulo di bulk rispecchia la variazione della temperatura nella sezione nei diversi istanti temporali considerati: l'aumento della temperatura nel tempo comporta una diminuzione del modulo interessando, al tempo di 120 minuti, una fascia di calcestruzzo di circa 20-25 cm dall'intradosso.

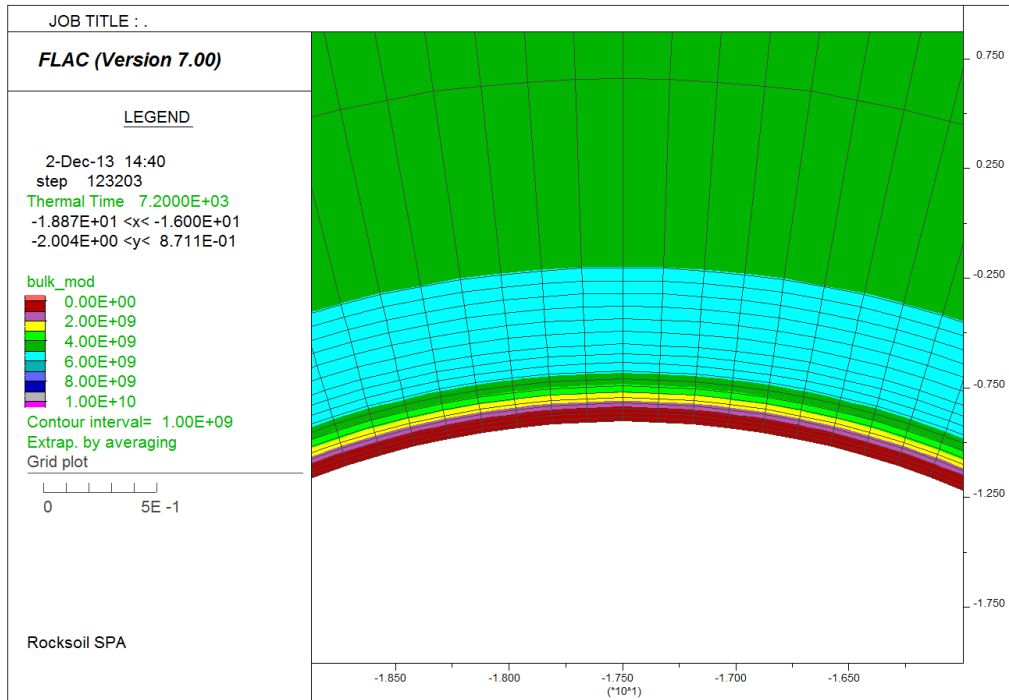


**Figura 21 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA (120min)**

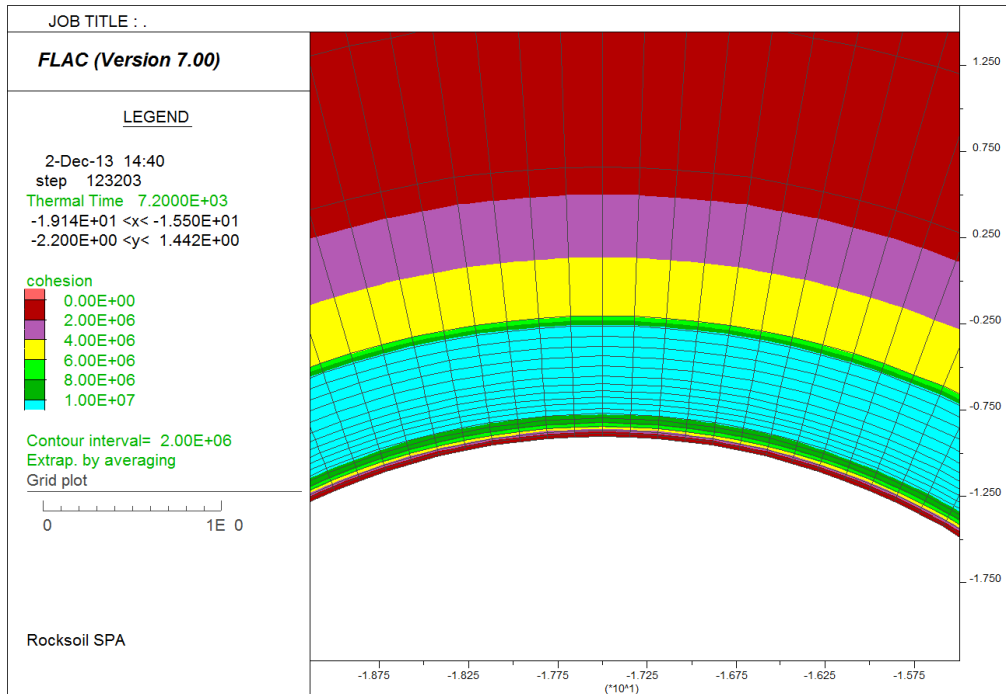


**Figura 22 – Evoluzione della coesione c' – Curva EUREKA (120min)**



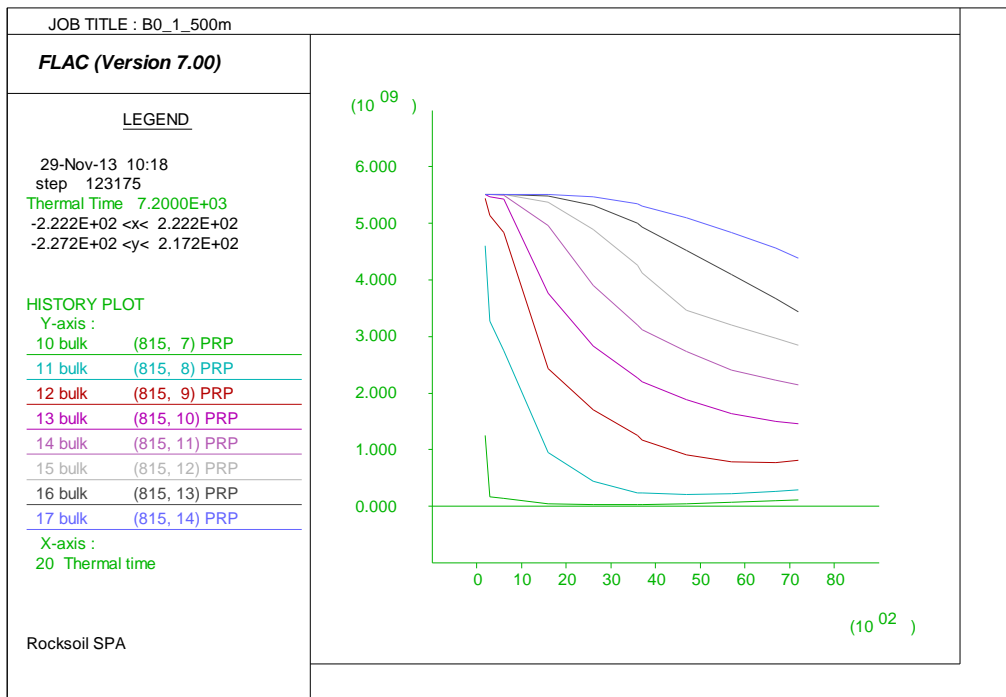


**Figura 23 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076 (120min)**

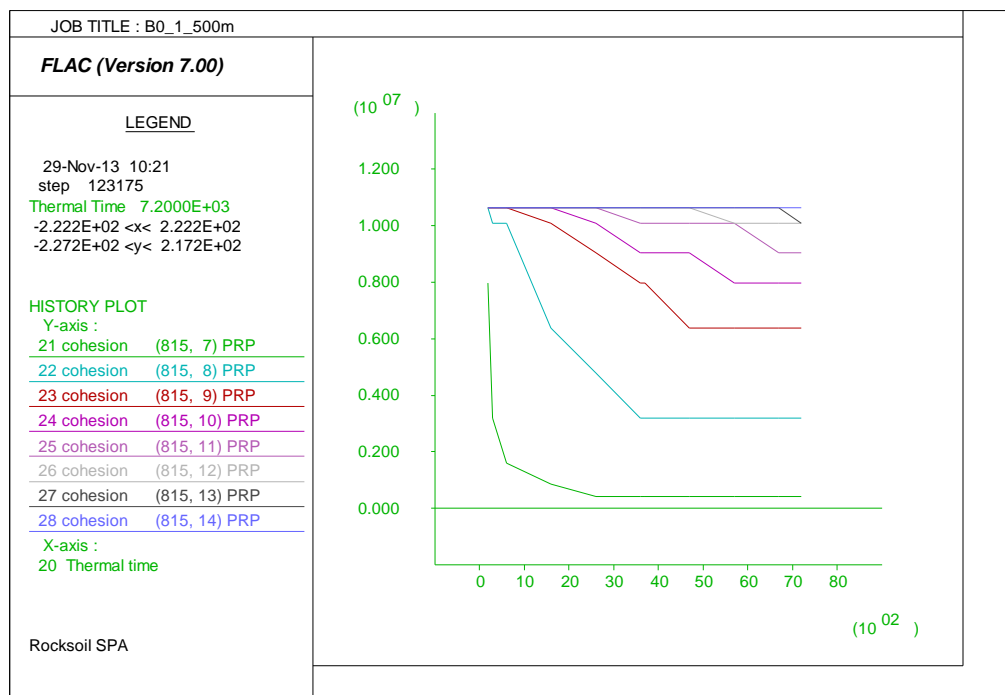


**Figura 24 – Evoluzione della coesione c' – Curva UNI11076 (120min)**

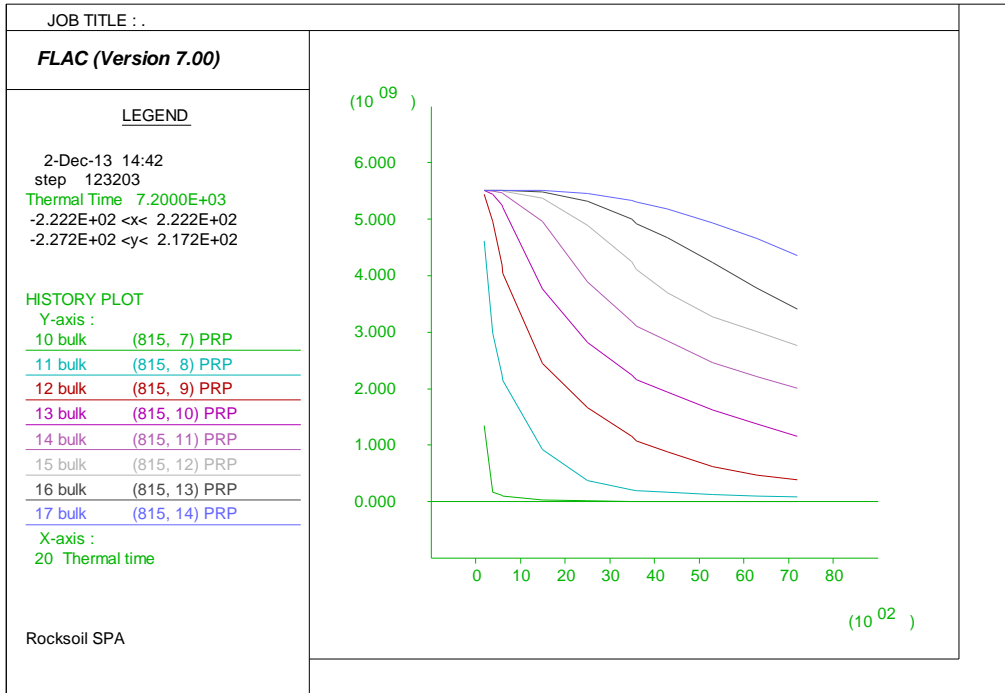
Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della del modulo "bulk" e della coesione nel rivestimento in funzione del tempo [sec]; nel dettaglio viene riportata la curva per ogni zona della mesh in corrispondenza della chiave calotta per i punti di controllo indicati in precedenza.



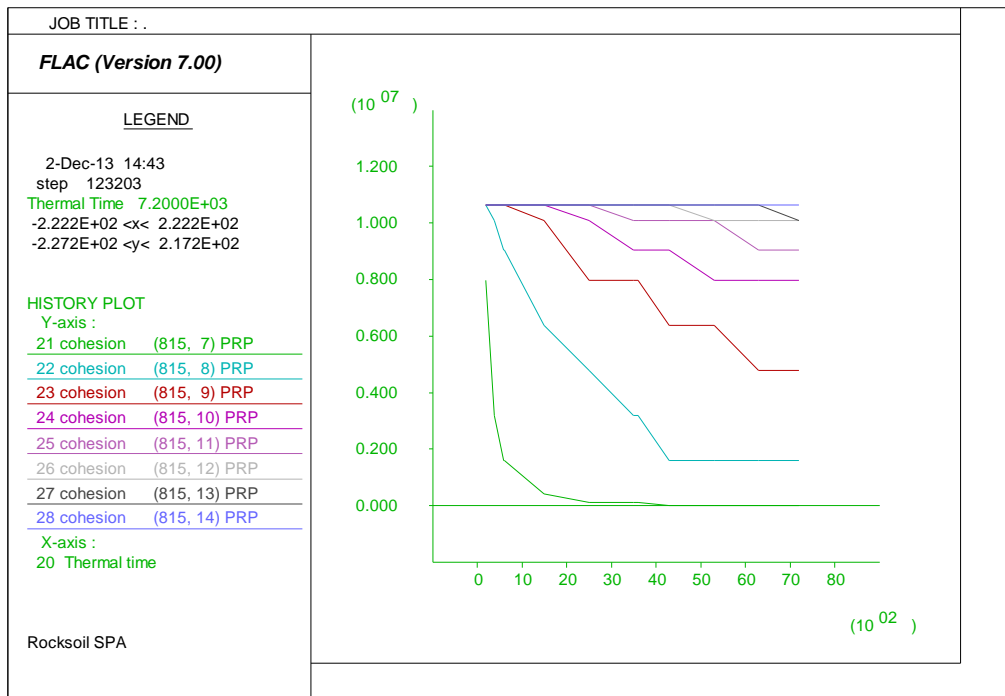
**Figura 25 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 26 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 27 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva UNI11076**



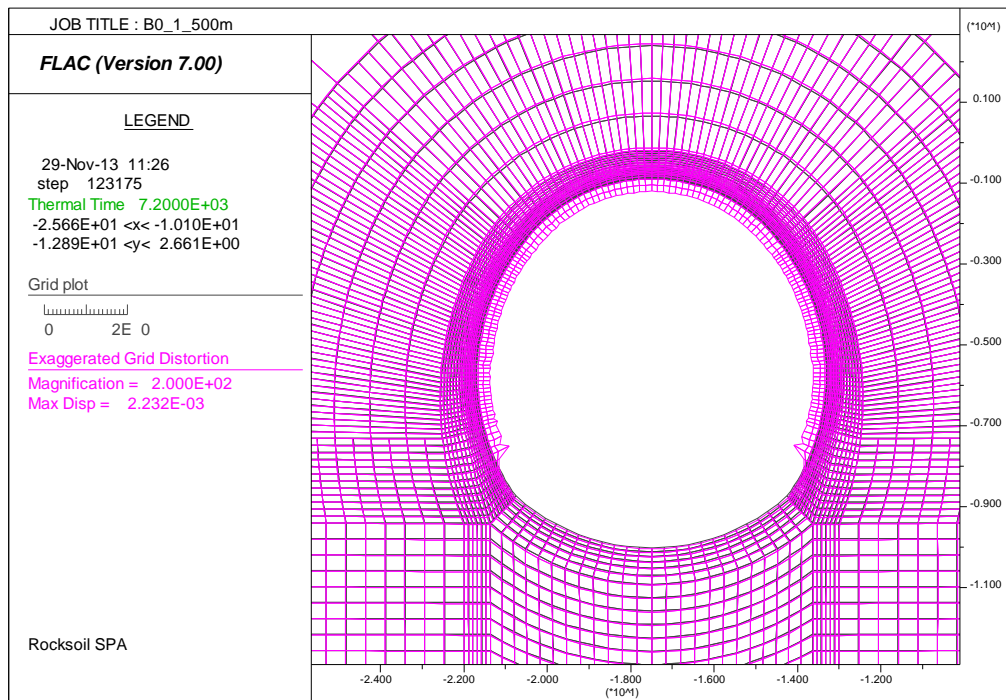
**Figura 28 – Evoluzione del valore di coesione c' nel rivestimento – Curva UNI11076**

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00
	Foglio 28 di 62

### 5.1.3. Stati tensionali e deformativi

Nelle seguenti figure sono presentati gli stati tensionali e deformativi del rivestimento in corrispondenza degli istanti di tempo di 60 e 120 minuti.

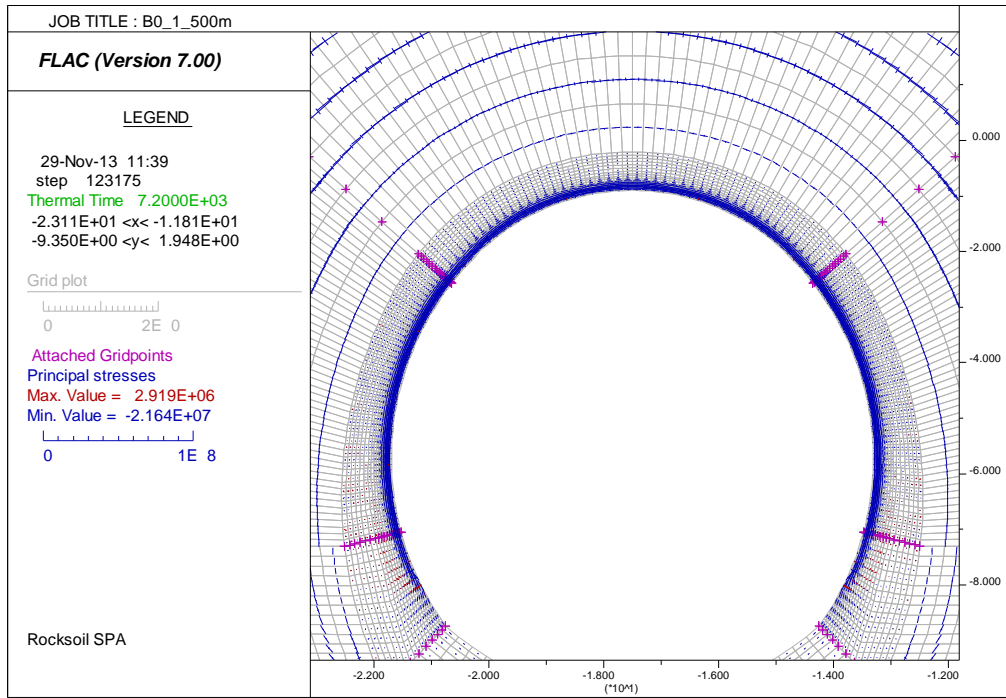
Sono riportati gli output grafici forniti dal codice di calcolo FLAC, in cui sono rappresentate le tensioni principali  $\sigma_1$  (di compressione e trazione), le quali hanno generalmente un andamento normale alla sezione trasversale del rivestimento. In tutte le sezioni di calcolo, l'azione termica comporta una sostanziale variazione dello stato tensionale rispetto alle condizioni a freddo d'esercizio. A causa delle deformazioni termiche e dell'evoluzione del modulo elastico nella sezione, per tutto il rivestimento esposto al fuoco si ottiene, nella zona di estradosso, una riduzione delle azioni di compressione. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica combinata alle azioni geostatiche dovute alle alte coperture della galleria che nei casi analizzati consentono di garantire quel necessario confinamento capace di limitare lo svilupparsi di tensioni di trazione in tale parte della sezione, cosa invece osservata generalmente nei modelli a basse coperture. Al contrario lo sviluppo del calore comporta generalmente una redistribuzione degli sforzi di compressione nei primi strati in intradosso, dovuti sia all'azione termica sia alla diminuzione delle caratteristiche meccaniche del materiale. Tale andamento del tensore degli sforzi si osserva lungo tutto l'arco del rivestimento esposto al fuoco mentre, nella zona dell'arco rovescio, dove è presente il riempimento e non è applicata direttamente la curva di incendio, lo stato tensionale rimane qualitativamente simile a quello della fase di pre incendio. Per ciò che concerne lo stato deformativo, dalla deformata presentata nel seguito si può cogliere l'effetto dell'azione termica sulla struttura: le deformazioni risultano generalmente di ordine millimetrico (si sono azzerati gli spostamenti al termine delle fasi statiche al fine di cogliere unicamente le deformazioni dovute al carico di incendio). Unicamente la curva "uni" ha indicato per il primo strato strato in intradosso (spessore 1.5cm circa) sollecitazioni tali da plasticizzare il materiale con conseguente perdita di resistenza degli stessi.



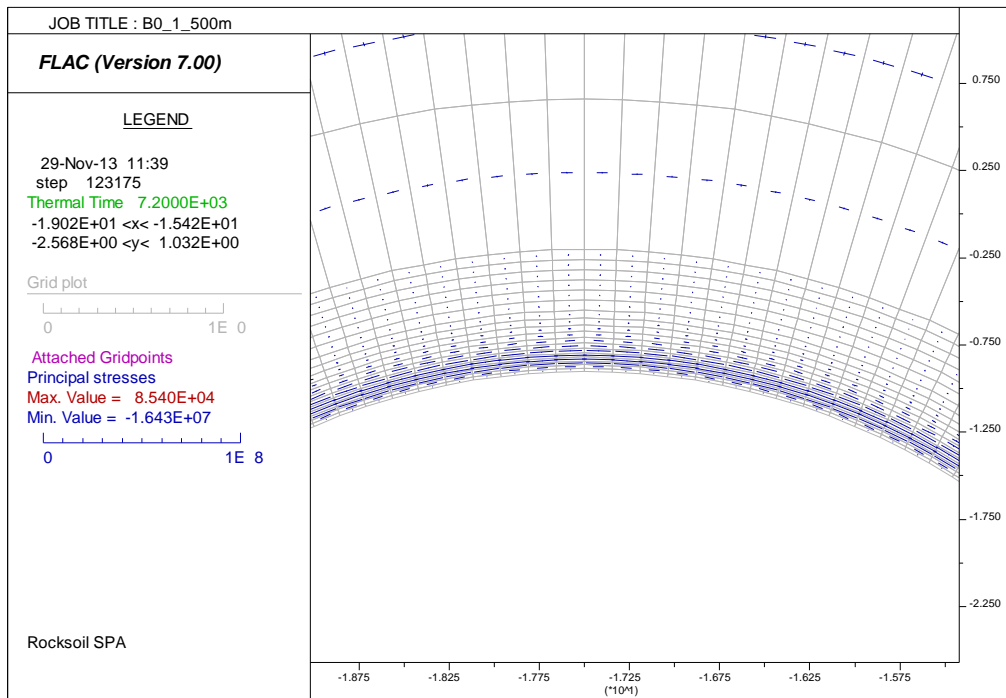
**Figura 29 – Deformata – Curva EUREKA – t = 120 min**

La convenzione utilizzata nel seguito per gli sforzi è la seguente:

- compressione: tensioni negative di colore blu
- trazione: tensioni positive di colore rosso



**Figura 30 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min**



**Figura 31 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min**

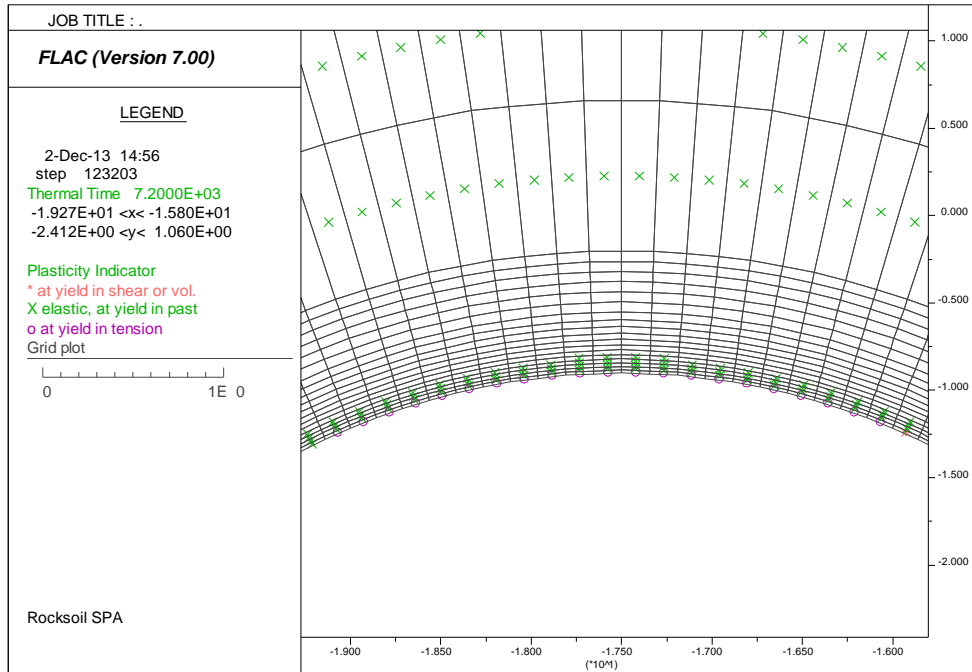


Figura 32 – Plasticizzazioni – Curva UNI11076 – t = 120 min

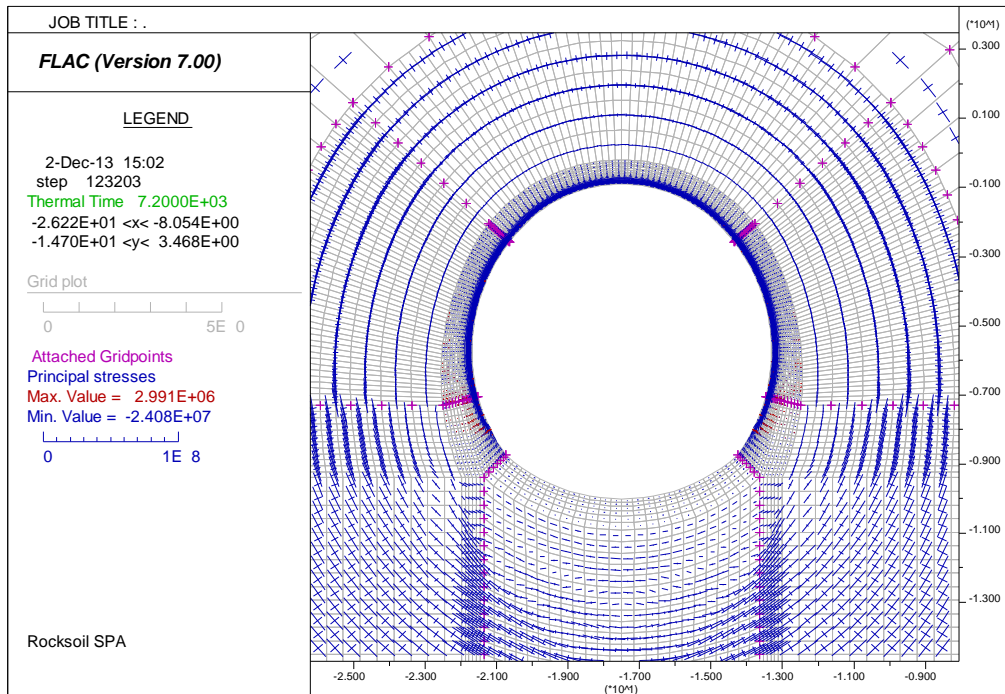


Figura 33 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

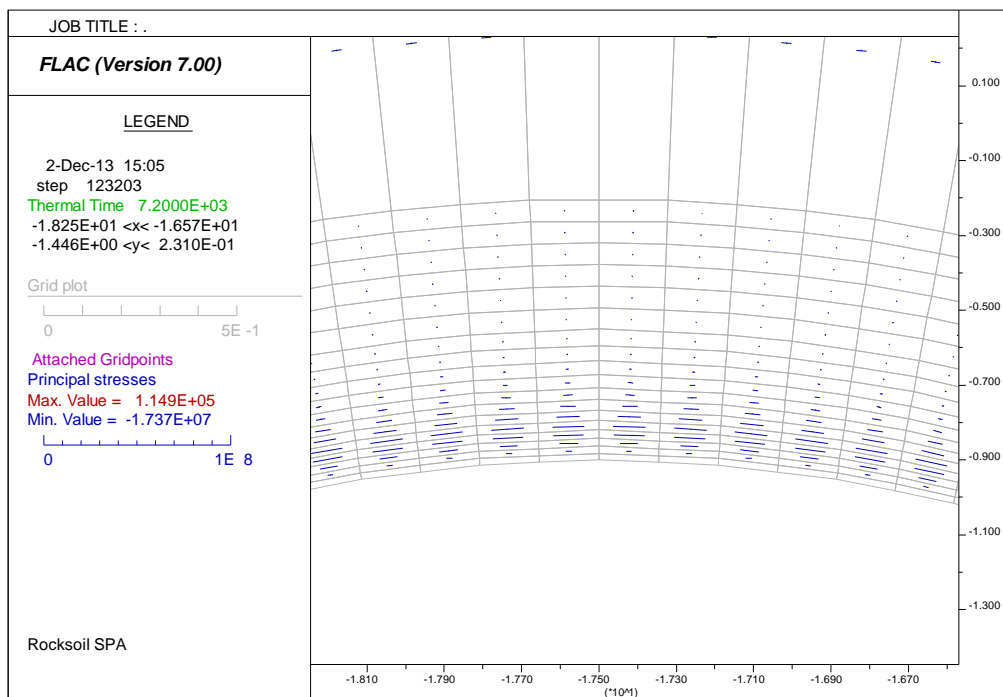


Figura 34 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

Nella seguente immagine viene fornito un confronto tra lo stato tensionale nella sezione dopo 60 minuti e dopo 120 minuti. Le sollecitazioni risultano pressochè costanti in tutta la zona soggetta all'azione diretta del fuoco. Si mostrano le azioni in chiave calotta, dove le tensioni risultano lievemente superiori e dove si presenta la condizione di minimo spessore del rivestimento definitivo rispetto ai piedritti. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a 120 minuti per entrambe le curve di temperatura considerate.

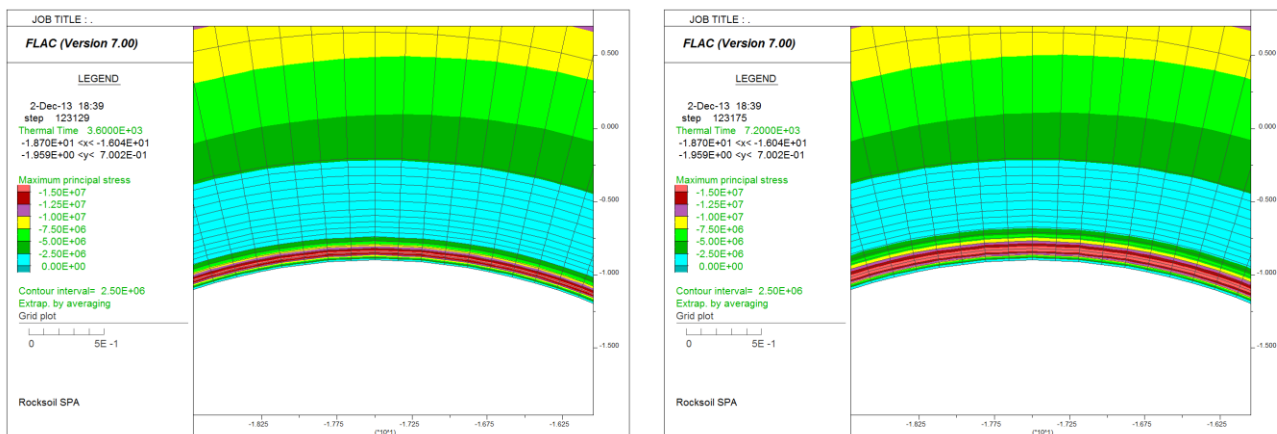


Figura 35 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 120 min



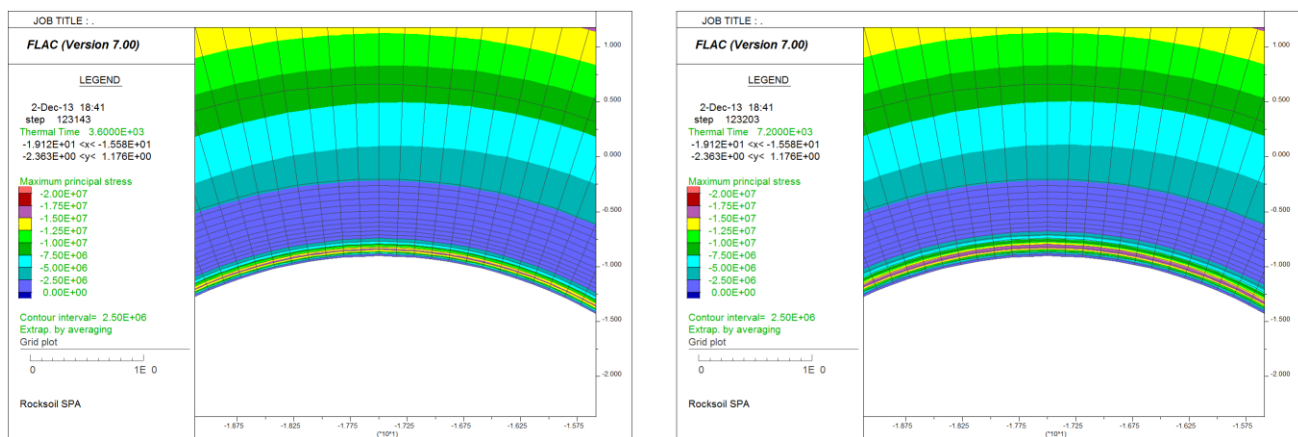


Figura 36 – Sigma 1 – Curva UNI11076 – t = 120 min

#### 5.1.4. Verifiche tensionali

A differenza di quanto fatto per i modelli di calcolo relativi alle sezioni armate e presentato nel seguito, essendo la struttura in esame non armata, le verifiche sono state svolte in termini di tensioni, ovvero verificando che la resistenza a trazione e a compressione del calcestruzzo non vengano superate. Nel paragrafo precedente sono riportate graficamente le sollecitazioni valutate in tutte le condizioni esaminate. Come si nota nelle immagini, in calotta e sui piedritti tutta la sezione risulta totalmente compressa sebbene la parte in intradosso abbia tensioni pressochè nulle, con una tensione massima prossima ai 0.5Mpa (curva EUR 120).

Come già precedentemente descritto, il modello elastoplastico adottato ha consentito di raggiungere una configurazione di equilibrio compatibile alla statica della struttura capace di sopportare le sollecitazioni termiche dovute all'incendio temporaneamente presenti, considerando implicitamente il decadimento delle caratteristiche meccaniche nel calcestruzzo. Pertanto la struttura risulta verificata in tutte le condizioni di calcolo esaminate.

Per dimostrare in maniera evidente quanto sopra esposto, si riportano nelle condizioni più gravose le tensioni ed i valori di coesione valutati dal modello numerico: la verifica risulta soddisfatta laddove i valori tensionali risultino in ogni punto inferiori al valore resistente (pari al doppio della coesione). Si noti come per la curva UNI l'ultimo punto presenta, coerentemente a quanto indicato in precedenza, una tensione nulla.

EUREKA - 120min

$f_{c,d}$	Unità		$\sigma$	unità
25.0	Mpa	>	0.43	Mpa
25.0	Mpa	>	0.44	Mpa
25.0	Mpa	>	0.45	Mpa
25.0	Mpa	>	0.46	Mpa
25.0	Mpa	>	0.48	Mpa

25.0	Mpa	>	0.51	Mpa
25.0	Mpa	>	0.6	Mpa
25.0	Mpa	>	0.85	Mpa
25.0	Mpa	>	1.48	Mpa
25.0	Mpa	>	2.77	Mpa
25.0	Mpa	>	4.99	Mpa
23.7	Mpa	>	8.1	Mpa
23.7	Mpa	>	11.95	Mpa
21.2	Mpa	>	16.38	Mpa
18.8	Mpa	>	16.35	Mpa
15.0	Mpa	>	12.8	Mpa
7.5	Mpa	>	5.48	Mpa
1.0	Mpa	>	0.41	Mpa

UNI - 120min				
$f_{c,d}$	Unità		$\sigma$	Unità
25.0	Mpa	>	0.43	Mpa
25.0	Mpa	>	0.44	Mpa
25.0	Mpa	>	0.45	Mpa
25.0	Mpa	>	0.46	Mpa
25.0	Mpa	>	0.48	Mpa
25.0	Mpa	>	0.51	Mpa
25.0	Mpa	>	0.6	Mpa
25.0	Mpa	>	0.85	Mpa
25.0	Mpa	>	1.49	Mpa
25.0	Mpa	>	2.83	Mpa
25.0	Mpa	>	5.12	Mpa
23.7	Mpa	>	8.36	Mpa
23.7	Mpa	>	12.47	Mpa
21.2	Mpa	>	17.34	Mpa
18.8	Mpa	>	16.33	Mpa
11.2	Mpa	>	9.77	Mpa
3.7	Mpa	>	3.1	Mpa
0.0	Mpa	>=	0	Mpa

A titolo comunque di uniformità con gli altri modelli presentati e per una maggiore comprensione dei risultati ottenuti si riportano di seguito i valori sollecitanti derivati dall'integrazione degli sforzi lungo tutte le sezioni considerate.

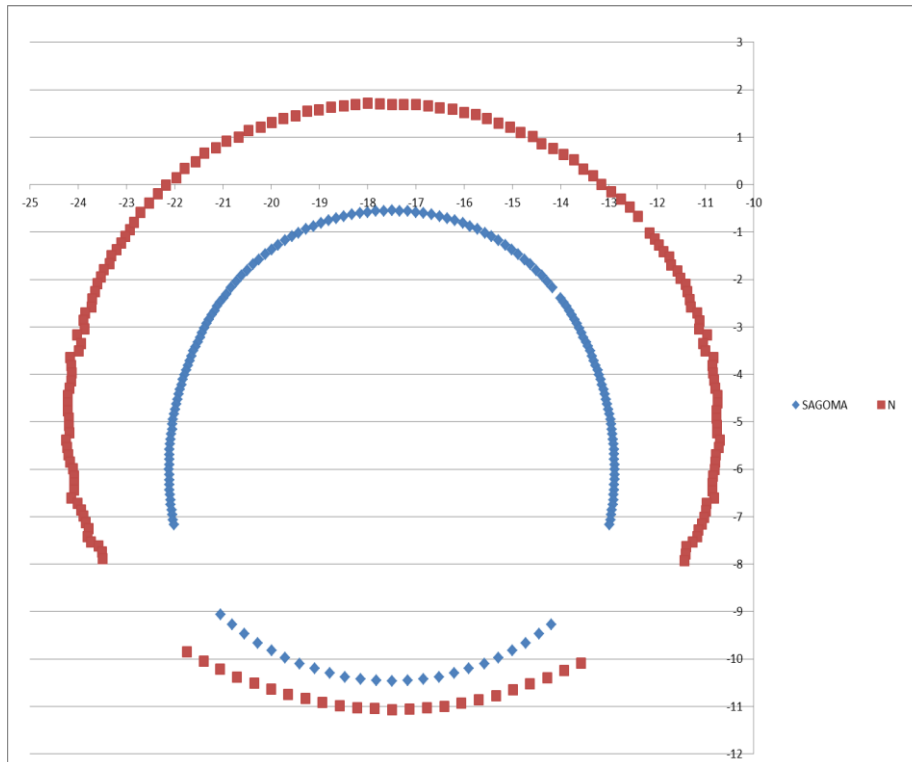


Figura 37 – Azione assiale – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=1000KN)

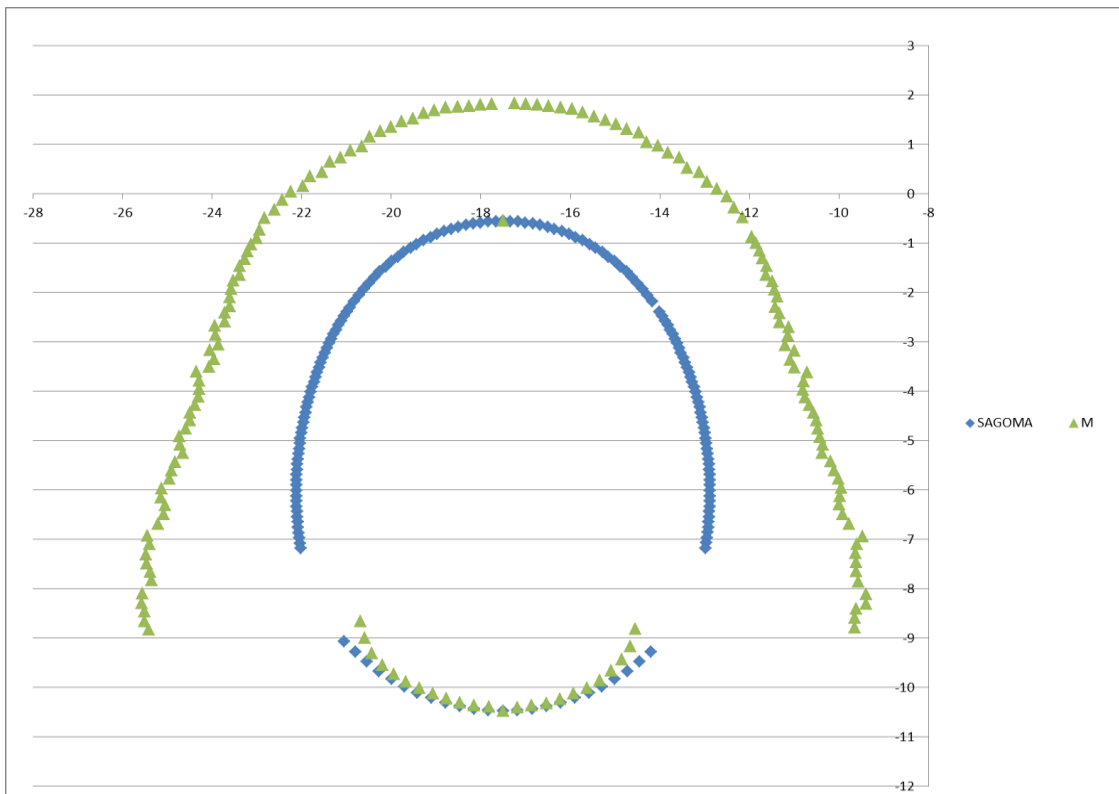


Figura 38 – Azione flettente – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=200KNm)

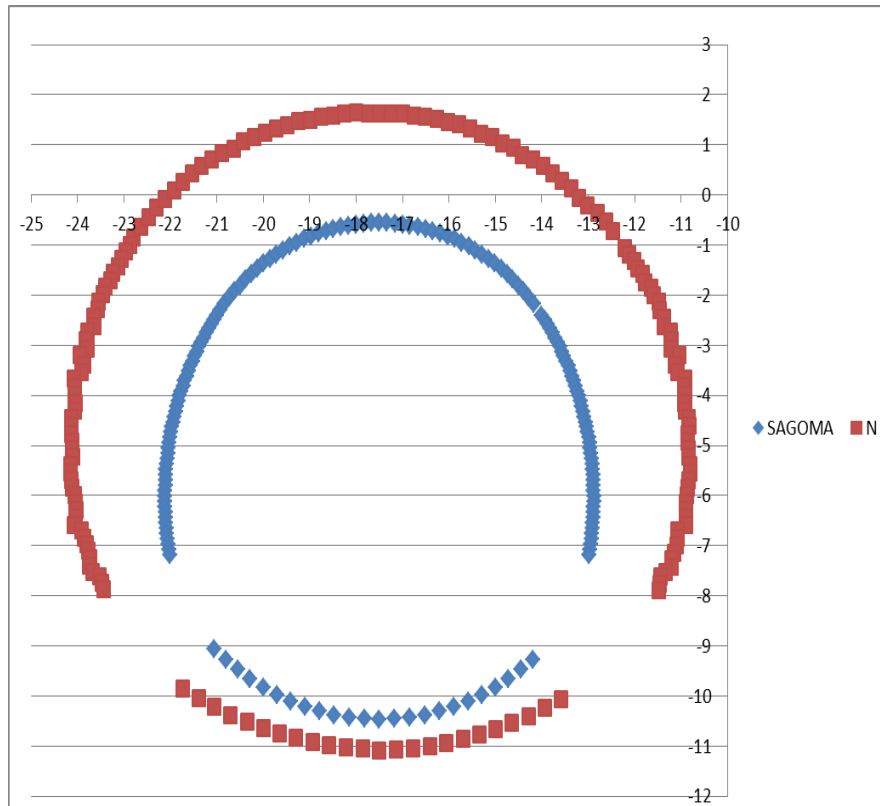


Figura 39 – Azione assiale – Curva UNI – t = 120 min (Scala 1m=1000KN)

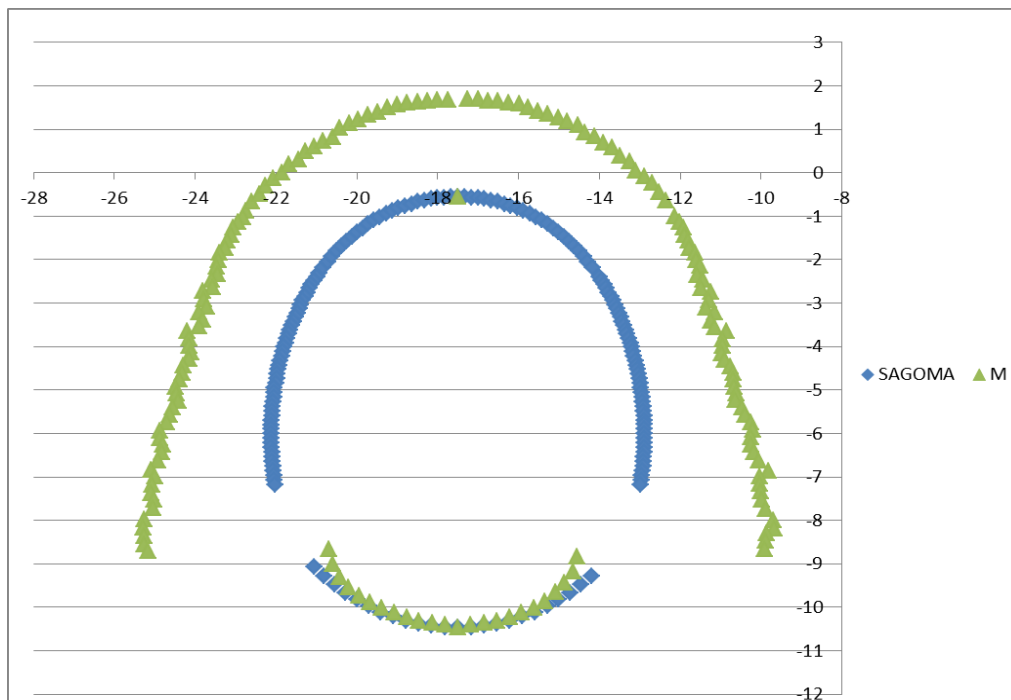


Figura 40 – Azione flettente – Curva UNI – t = 120 min (Scala 1m=200KNm)

## 5.2. Sezione 2 – Copertura 500 m Sezione tipo C4sb

La sezione tipo è rappresentativa del comportamento delle armate previste lungo la tratta in esame.

### 5.2.1. Distribuzione di temperatura

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento della temperatura nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) ai tempi di 60 – 120 minuti, per entrambe le curve d'incendio.

Si noti come per entrambe le azioni termiche, nella zona di intradosso direttamente esposta al fuoco, la temperatura a 120 minuti risulta inferiore a quella che si raggiunge a 60 minuti, coerentemente con l'andamento delle curve d'incendio, le quali hanno, come mostrato nei capitoli precedenti, uno sviluppo decrescente superata la soglia dei 60 minuti (questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva EUREKA, in cui si nota un netto decadimento della temperatura nei nodi dell'intradosso). Tale fenomeno risulta limitato agli strati più esterni della sezione, mentre all'interno della sezione lo sviluppo del calore subisce una evoluzione crescente nel tempo anche superata la soglia dei 60 minuti: questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva UNI11076, avente un ramo discendente meno accentuato. Si osservi come solamente i primi 20cm circa in intradosso subiscano un incremento di temperatura, mentre nella restante parte della sezione non si avvertono variazioni di temperatura.

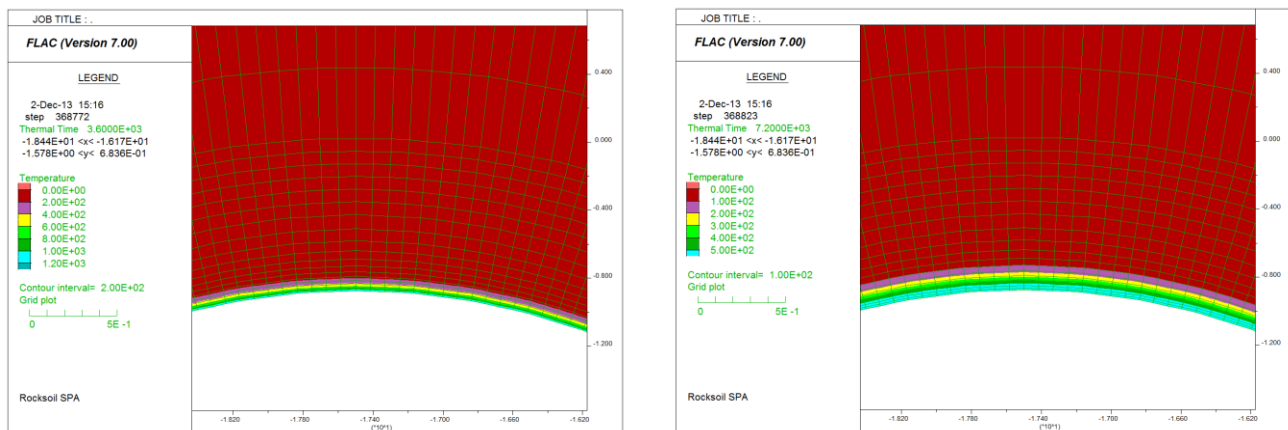
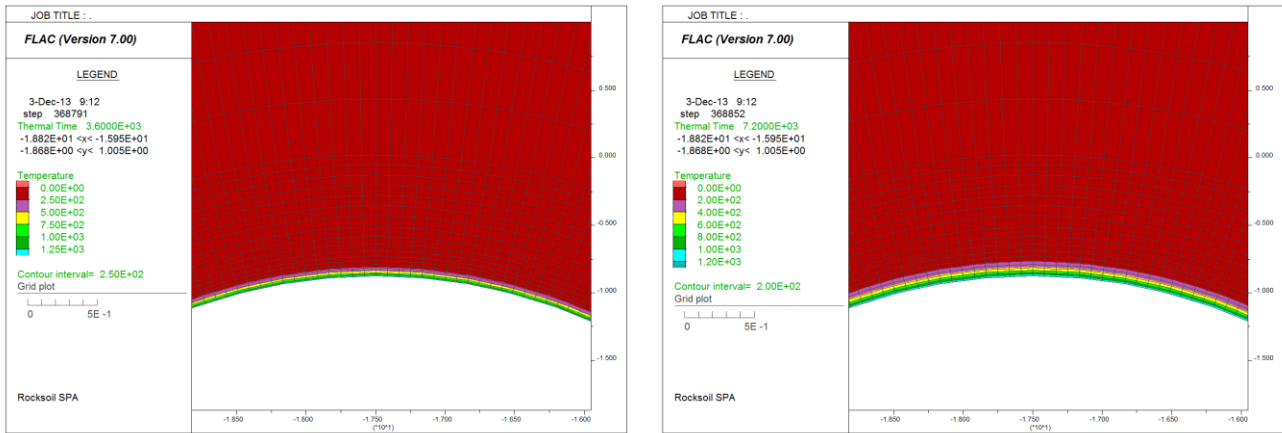


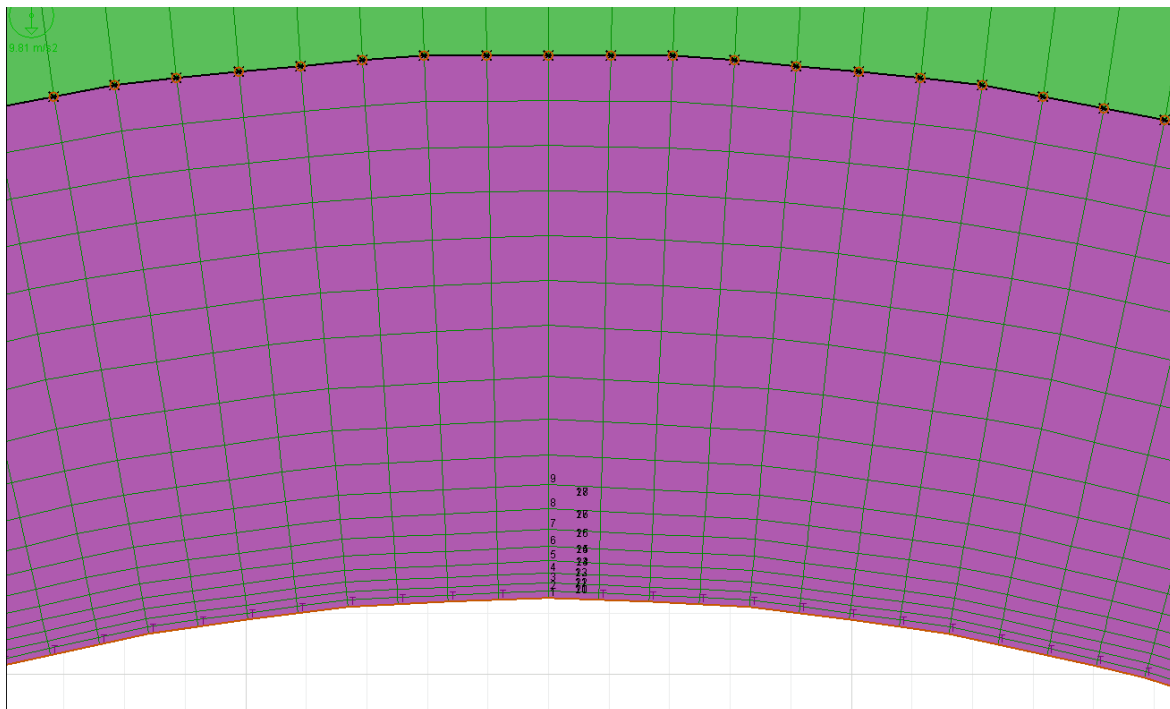
Figura 41 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA



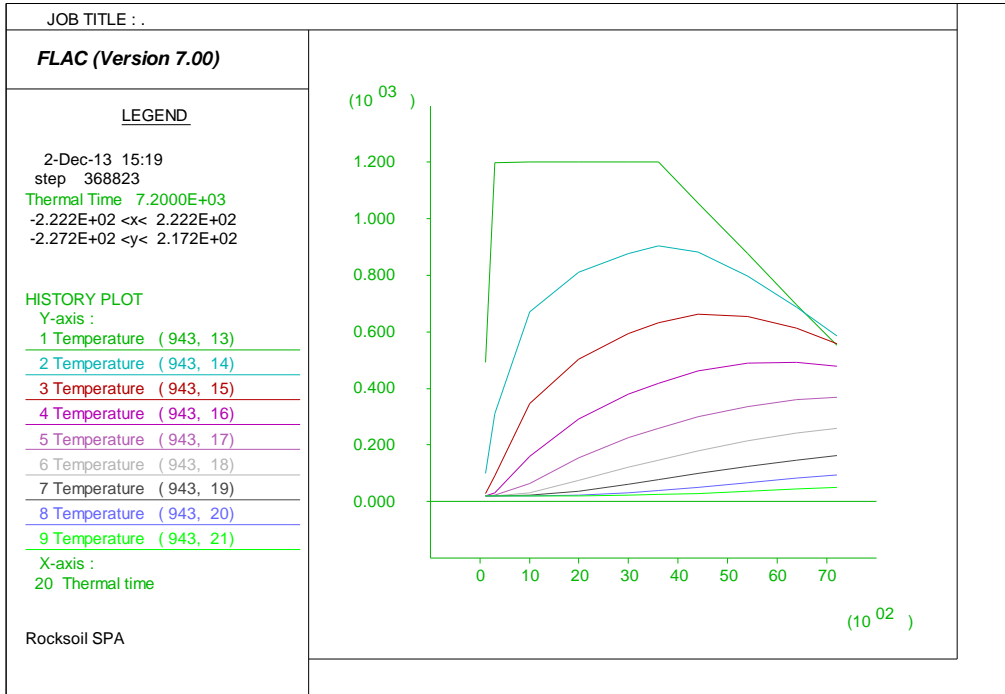
**Figura 42 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva UNI11076**

Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della temperatura nel rivestimento in funzione del tempo [sec] lungo i punti di controllo in chiave calotta: si veda l'immagine seguente per la posizione di ogni punto monitorato. Si riporta inoltre la distanza dall'intradosso di tali punti.

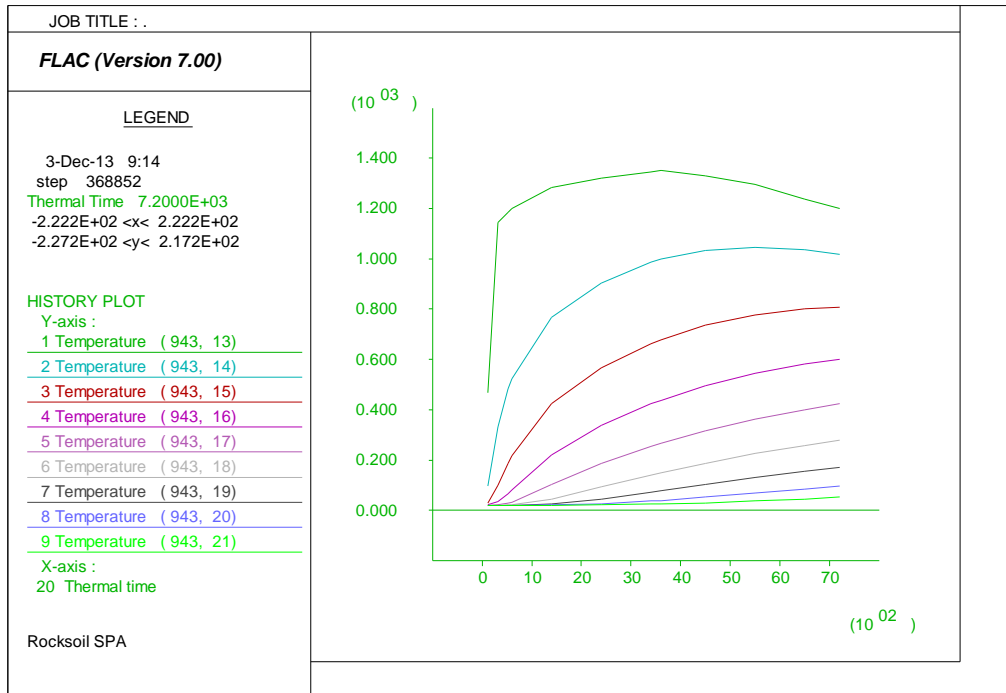
PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA
[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]
1	0	4	-4.14	7	-11.29
2	-1.14	5	-6.11	8	-14.69
3	-2.5	6	-8.46	9	-18.76



**Figura 43 – Punti di controllo per l'evoluzione della temperatura e delle proprietà meccaniche**



**Figura 44 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 45 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva UNI11076**

### 5.2.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo di compressibilità ("bulk") impiegato nel codice di calcolo FLAC. I moduli sono legati dalle seguente legge lineare al modulo elastico e quindi l'andamento con la temperatura risulta il medesimo di quest'ultimo.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo "bulk" e della coesione nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) al tempo di 120 minuti, per entrambe le curve d'incendio.

Dai risultati dell'analisi si può constatare la sua evoluzione all'interno della sezione, essendo questo funzione dell'andamento della temperatura. Il decadimento del modulo di bulk rispecchia la variazione della temperatura nella sezione nei diversi istanti temporali considerati: l'aumento della temperatura nel tempo comporta una diminuzione del modulo interessando, al tempo di 120 minuti, una fascia di calcestruzzo di circa 20-25 cm dall'intradosso.

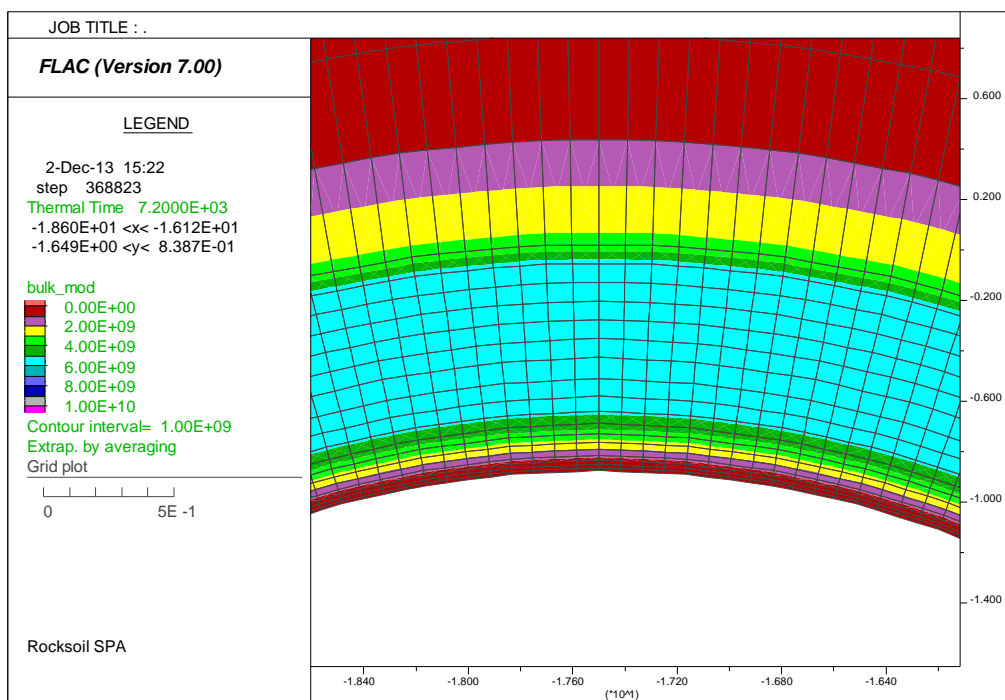


Figura 46 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA (120min)



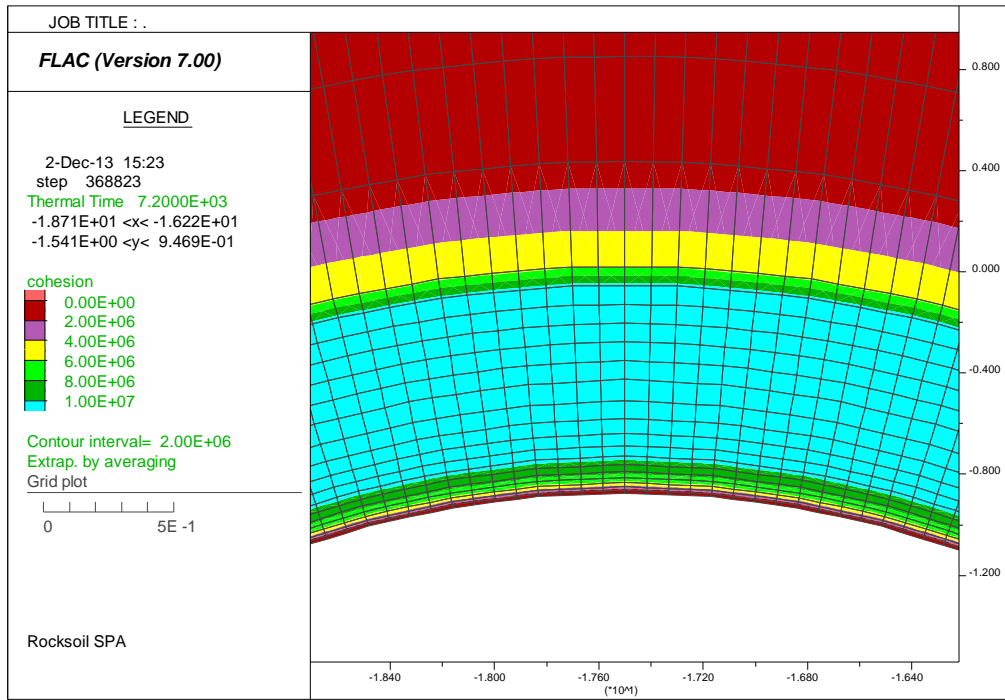


Figura 47 – Evoluzione della coesione  $c'$  – Curva EUREKA (120min)

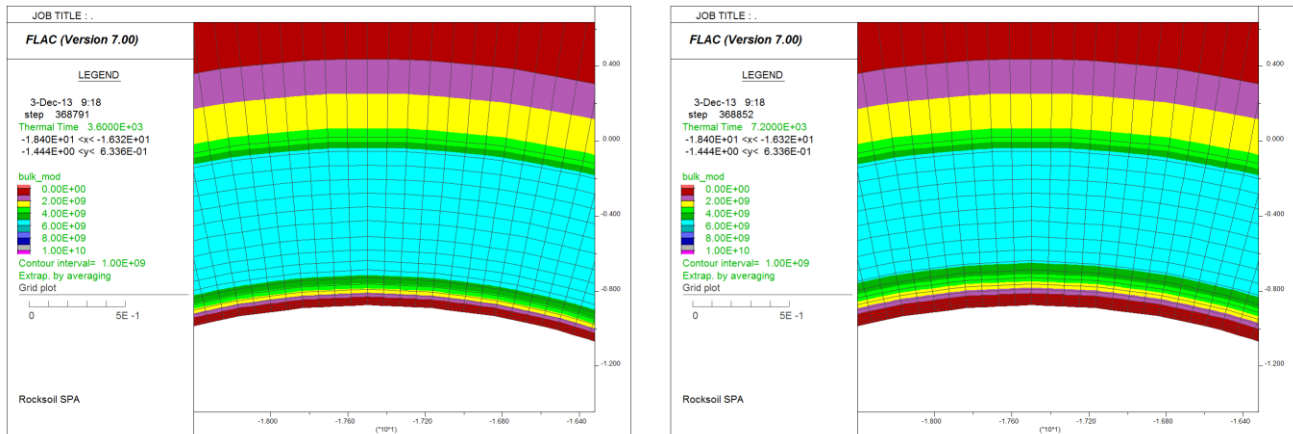
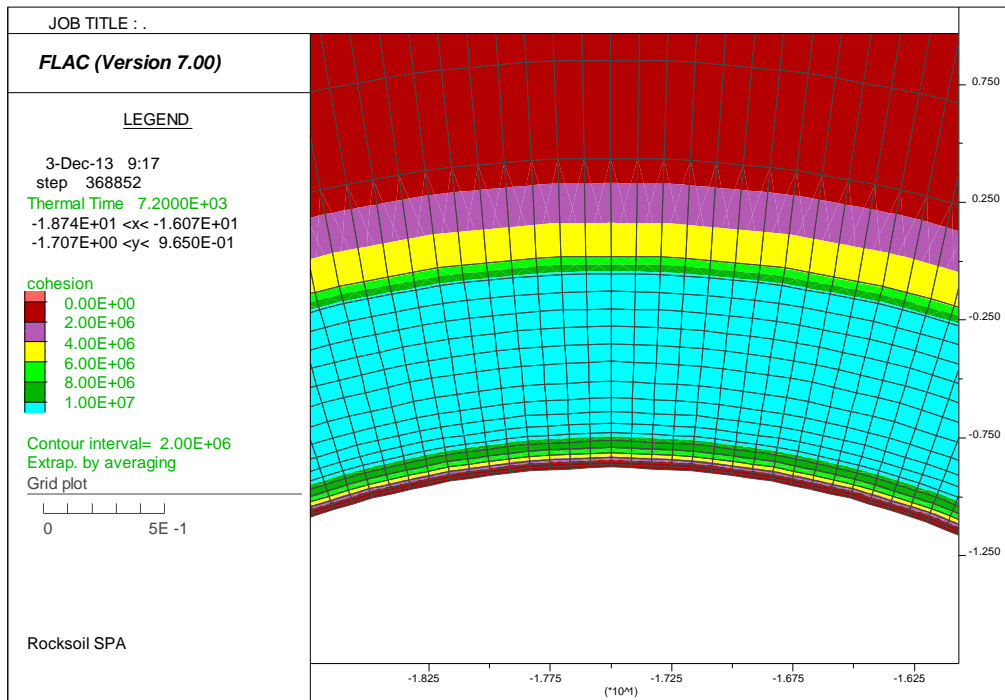
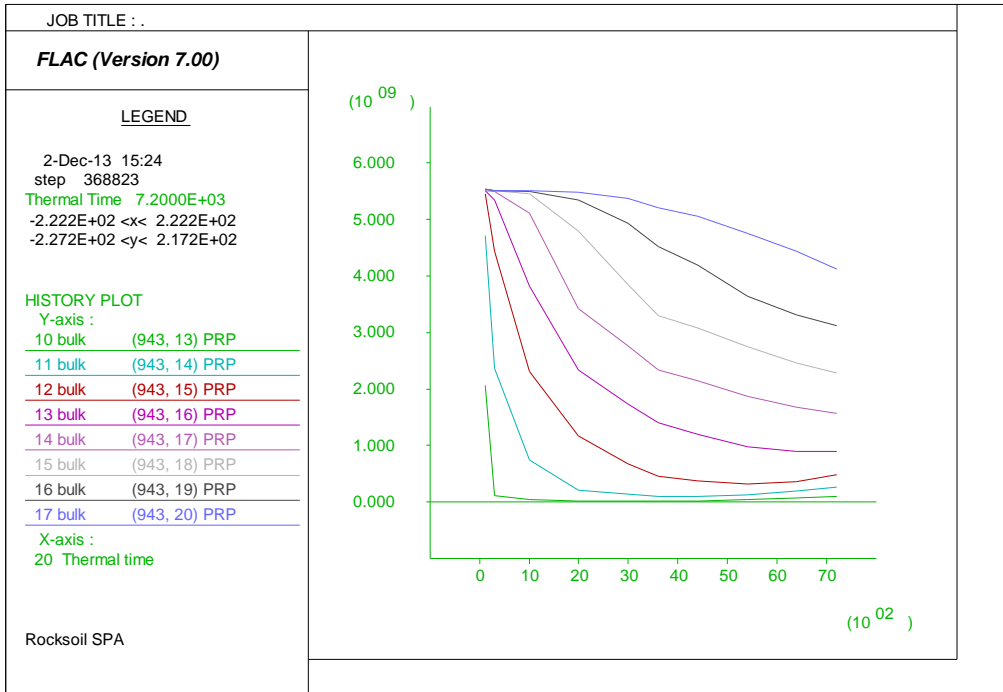


Figura 48 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076 (120min)

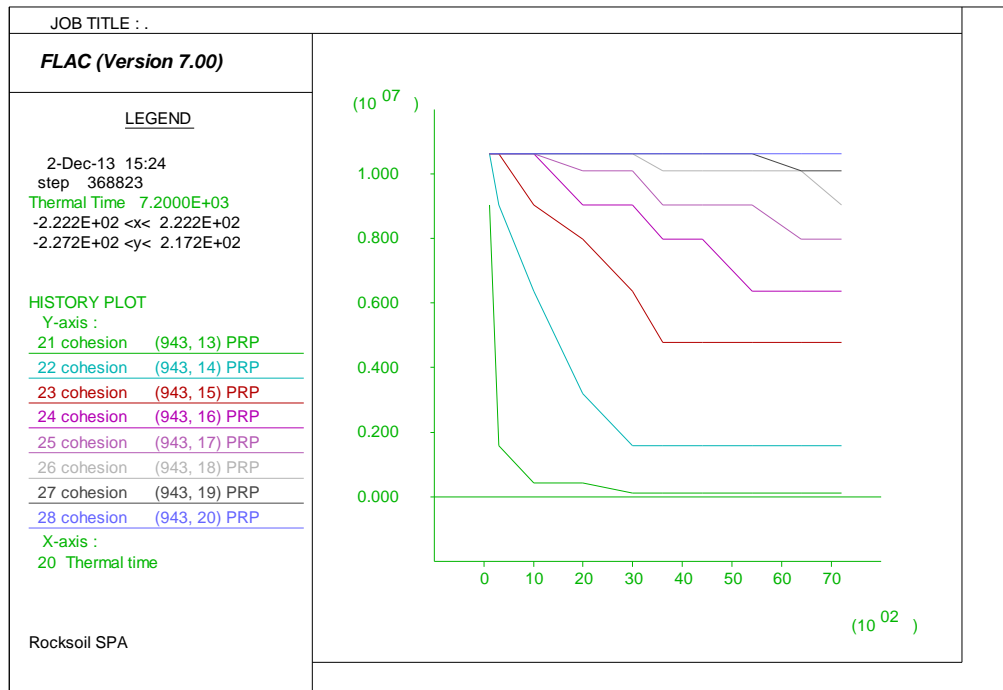


**Figura 49 – Evoluzione della coesione  $c'$  – Curva UNI11076 (120min)**

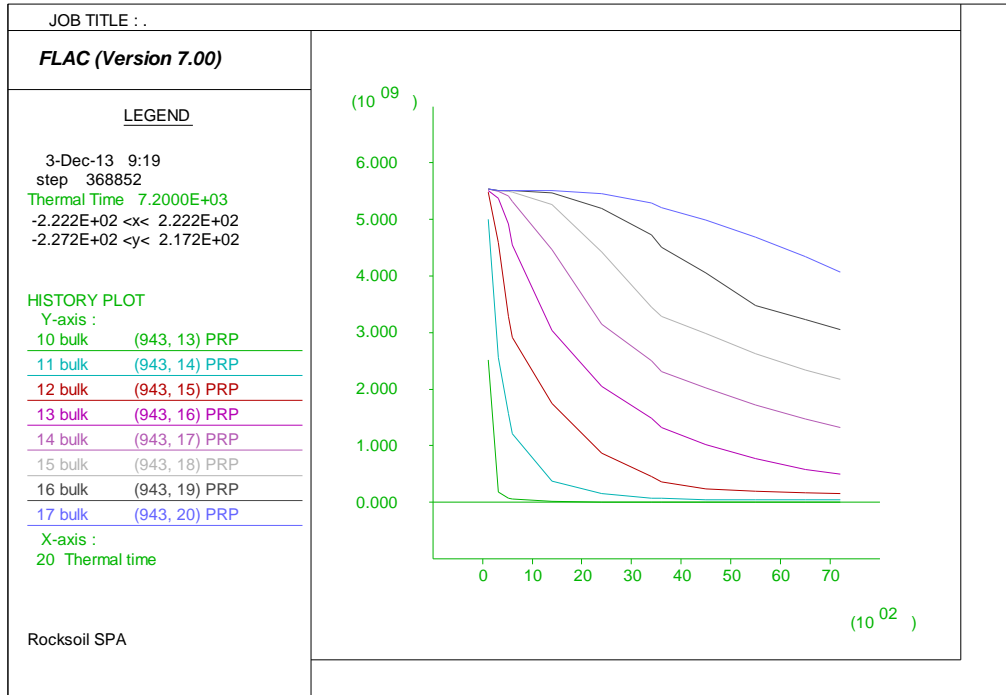
Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della del modulo "bulk" e della coesione nel rivestimento in funzione del tempo [sec]; nel dettaglio viene riportata la curva per ogni zona della mesh in corrispondenza della chiave calotta per punti di controllo indicati in precedenza.



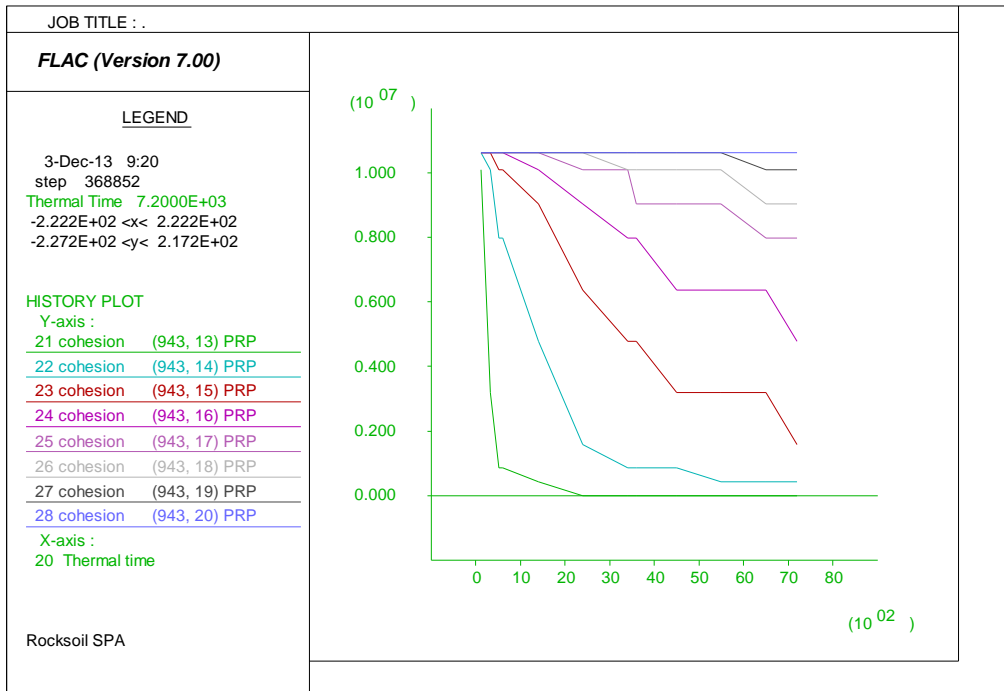
**Figura 50 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 51 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva EUREKA**



**Figura 52 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva UNI11076**



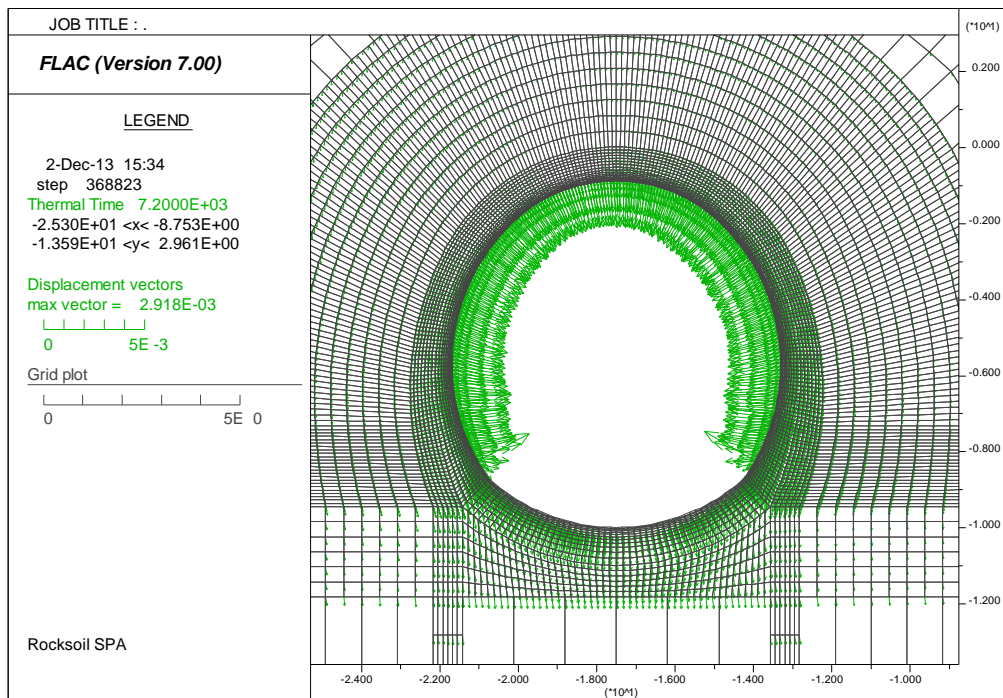
**Figura 53 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva UNI11076**

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00 <div style="float: right;">Foglio 45 di 62</div>

### 5.2.3. Stati tensionali e deformativi

Nelle seguenti figure sono presentati gli stati tensionali e deformativi del rivestimento in corrispondenza degli istanti di tempo di 60 e 120 minuti.

Sono riportati gli output grafici forniti dal codice di calcolo FLAC, in cui sono rappresentate le tensioni principali  $\sigma_1$  (di compressione e trazione), le quali hanno generalmente un andamento normale alla sezione trasversale del rivestimento. In tutte le sezioni di calcolo, l'azione termica comporta una sostanziale variazione dello stato tensionale rispetto alle condizioni a freddo d'esercizio. A causa delle deformazioni termiche e dell'evoluzione del modulo elastico nella sezione, per tutto il rivestimento esposto al fuoco si ottiene, nella zona di estradosso, una riduzione delle azioni di compressione. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica combinata alle azioni geostatiche dovute alle alte coperture della galleria che nei casi analizzati consentono di garantire quel necessario confinamento capace di limitare lo svilupparsi di tensioni di trazione in tale parte della sezione. Al contrario lo sviluppo del calore comporta generalmente una redistribuzione degli sforzi di compressione nei primi strati in intradosso, dovuti sia all'azione termica sia alla diminuzione delle caratteristiche meccaniche del materiale. Tale andamento del tensore degli sforzi si osserva lungo tutto l'arco del rivestimento esposto al fuoco mentre, nella zona dell'arco rovescio, dove è presente il riempimento e non è applicata direttamente la curva di incendio, lo stato tensionale rimane qualitativamente simile a quello della fase di pre incendio. Per ciò che concerne lo stato deformativo, dalla deformata presentata nel seguito si può cogliere l'effetto dell'azione termica sulla struttura: le deformazioni risultano generalmente di ordine millimetrico (si sono azzerati gli spostamenti al termine delle fasi statiche al fine di cogliere unicamente le deformazioni dovute al carico di incendio). Unicamente la curva "UNI" ha indicato per il primo strato strato in intradosso (spessore 1.5cm circa) sollecitazioni tali da plasticizzare il materiale con conseguente perdita di resistenza degli stessi: il programma di calcolo è stato impostato in modo tale che le tensioni siano annullate.



**Figura 54 – Deformata – Curva EUREKA – t = 120 min**

La convenzione utilizzata nel seguito per gli sforzi è la seguente:

- compressione: tensioni negative di colore blu
- trazione: tensioni positive di colore rosso

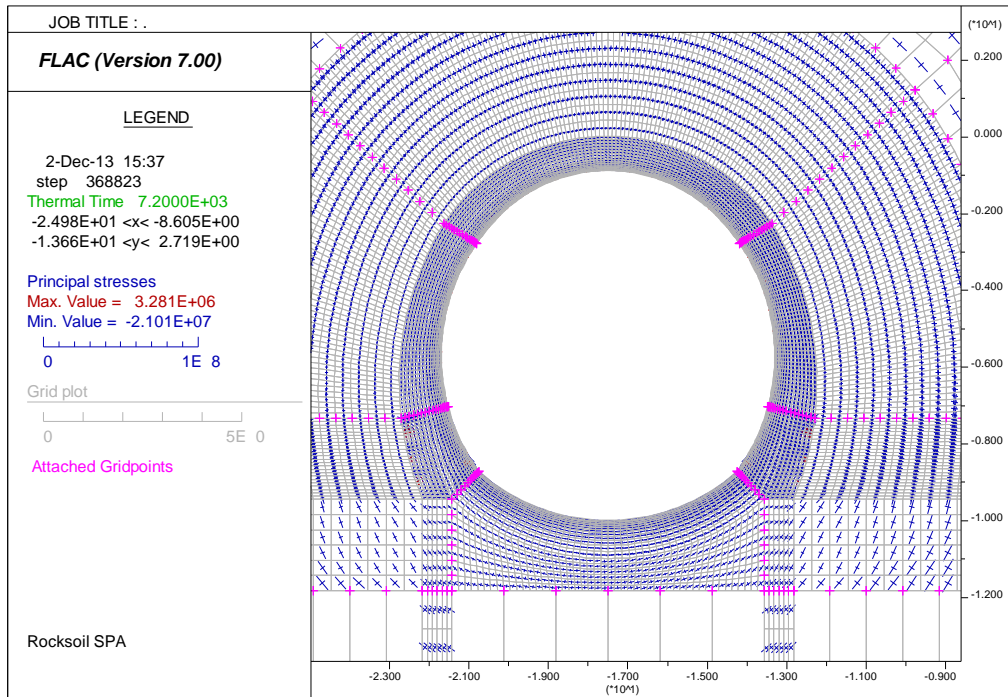


Figura 55 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

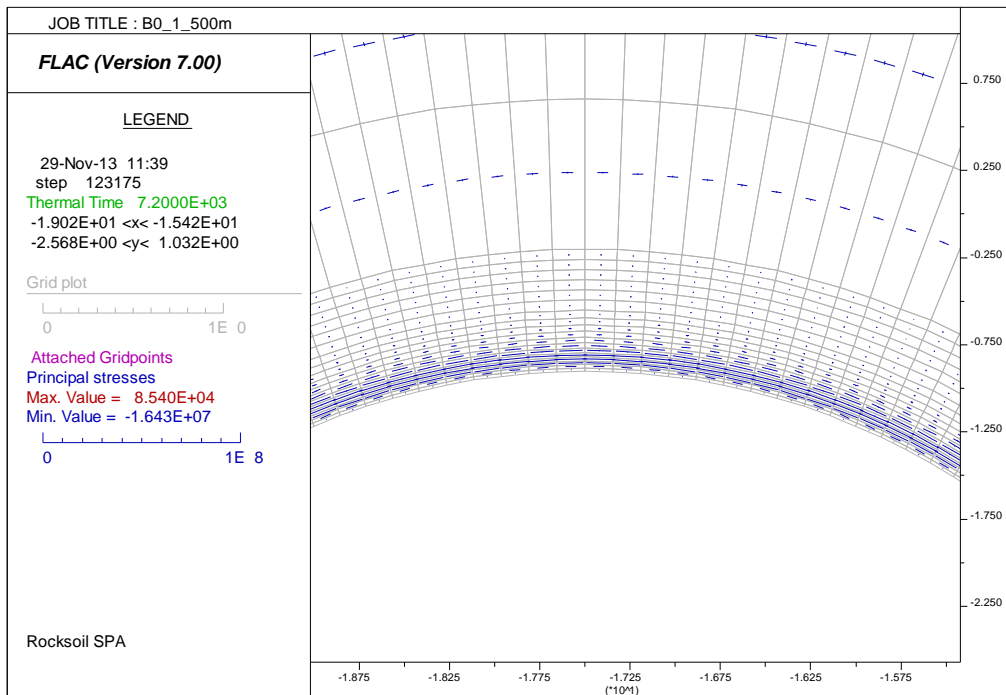


Figura 56 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

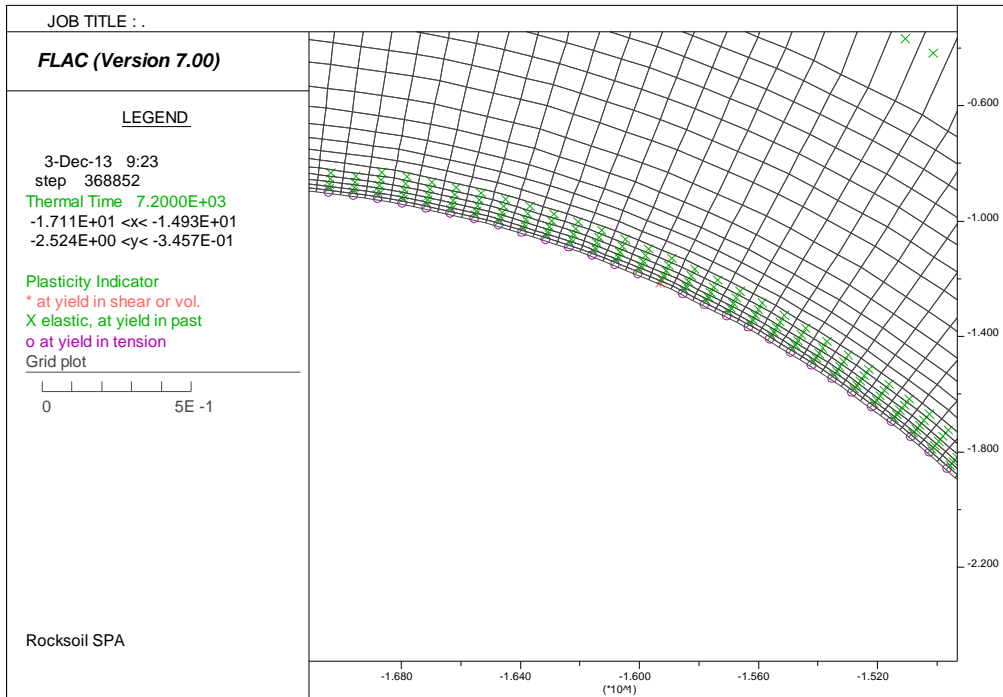


Figura 57 – Plasticizzazioni – Curva UNI11076 – t = 120 min

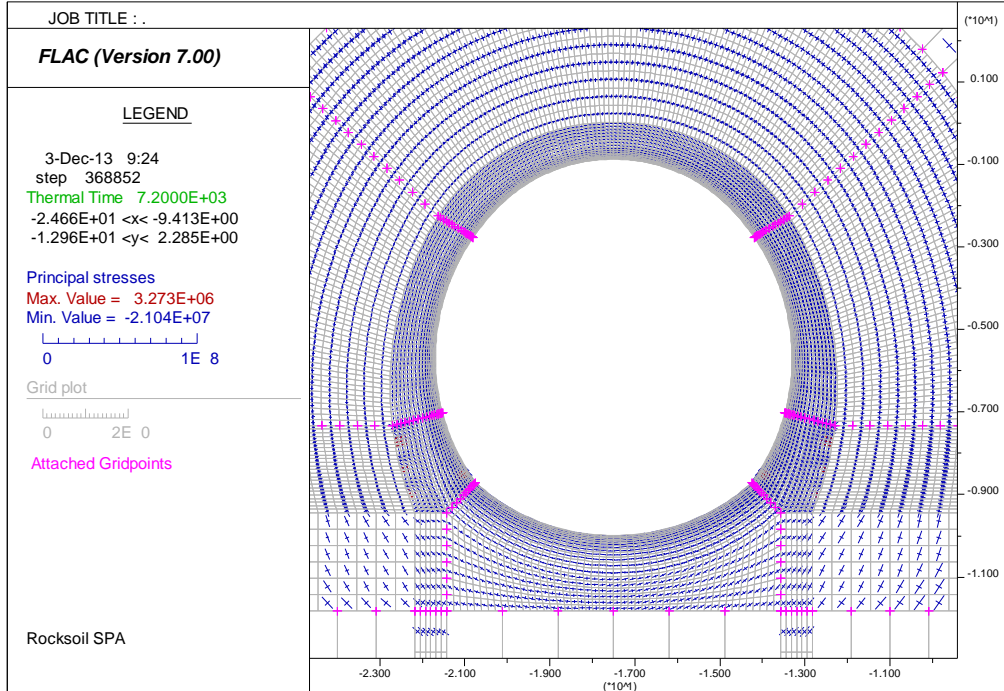


Figura 58 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min



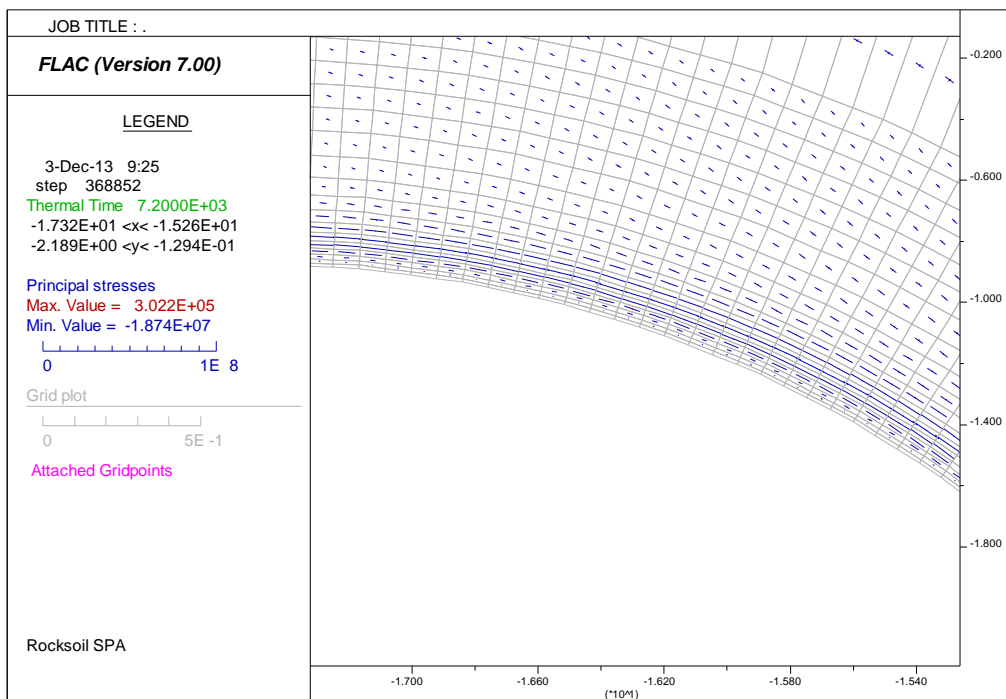


Figura 59 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

Nella seguente immagine viene fornito un confronto tra lo stato tensionale nella sezione dopo 60 minuti e dopo 120 minuti. La zona più sollecitata risulta quella posta nella parte destra della galleria (all'interno verso la seconda canna) all'altezza della zona di contatto tra piedritti e calotta. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a 120 minuti per entrambe le curve analizzate.

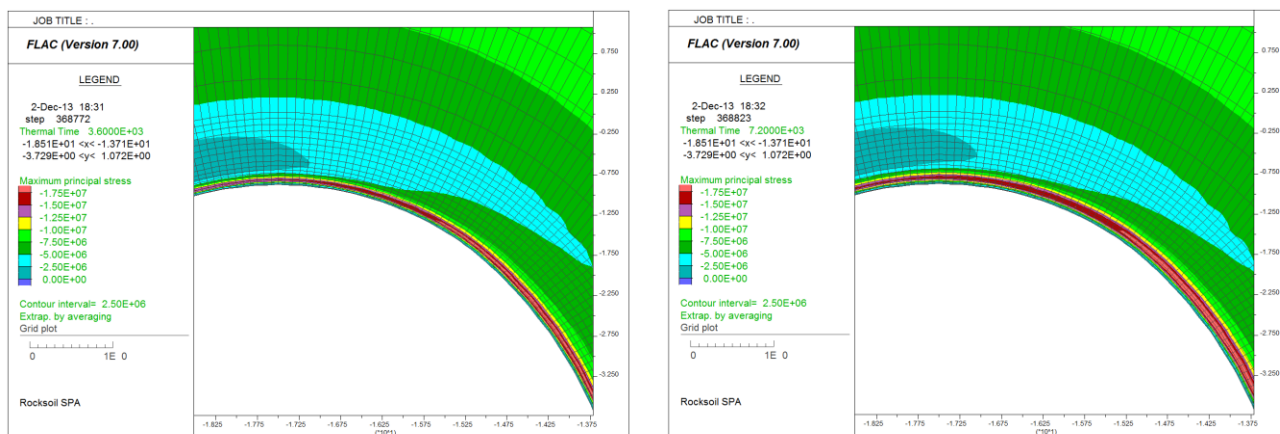


Figura 60 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 120 min

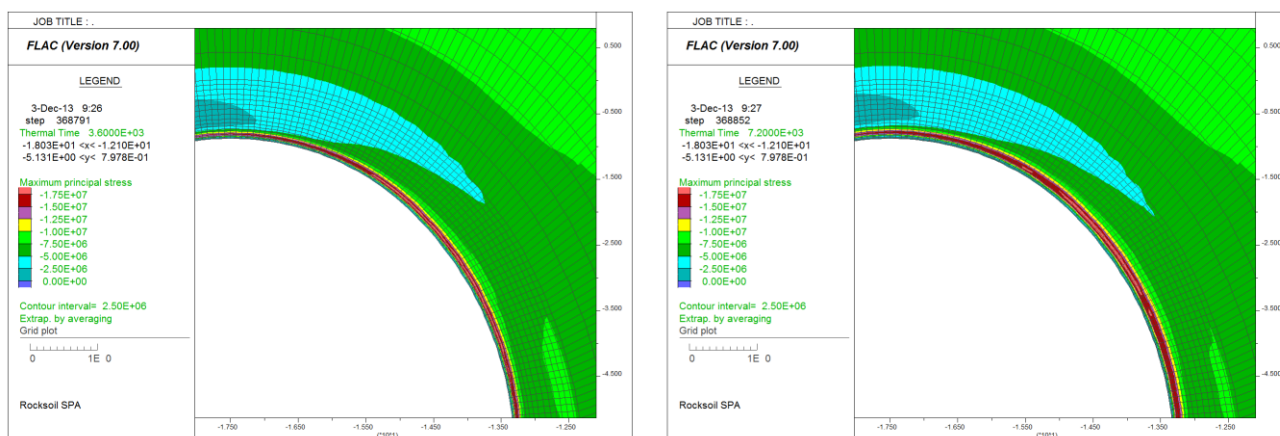


Figura 61 – Sigma 1 – Curva UNI1076 – t = 120 min

#### 5.2.4. Andamento delle azioni interne nella struttura

Nel caso di sezioni armate si è proceduto ad integrare i valori tensionali all'interno dei rivestimenti definitivi al fine di giungere alle azioni sollecitanti M ed N in condizioni d'incendio. Tali valori verranno verificati nel capitolo seguente effettuando verifiche "a caldo", ovvero tenendo in conto delle caratteristiche resistenti dei materiali al variare della temperatura.

Si noti come l'applicazione del carico termico abbia comportato un'inversione di segno dei momenti, che risultano tendere l'estradosso della struttura in tutte le zone soggette all'azione diretta data dalle curve di incendio. Si applicherà nei segni la seguente convenzione:

- Azioni assiali di compressione: negative
- Momenti flettenti che tendono l'estradosso: positivi

Per la curva Eureka a T=120min si raggiungono azioni assiali superiori a 8000 KN, mentre in prossimità dell'attacco delle murette si registrano i momenti massimi superiori a 1200 KNm: in tale settore la sezione risulta avere uno spessore pari a circa 1.2m.

I valori registrati mediante l'applicazione della curva "UNI" risultano assolutamente comparabili, come si può notare dai grafici sotto riportati (si è impiegata la medesima scala ai fini di consentire il confronto grafico).

In entrambi i casi, considerando l'analisi M/N, la sezione maggiormente critica risulta quella in prossimità di attacco tra i piedritti e la calotta con i seguenti valori sollecitanti.

Curva	H	N	M
[-]	[m]	[kN]	[kNm]
EUREKA	0.97	-7258	756
UNI	0.97	-7173	696

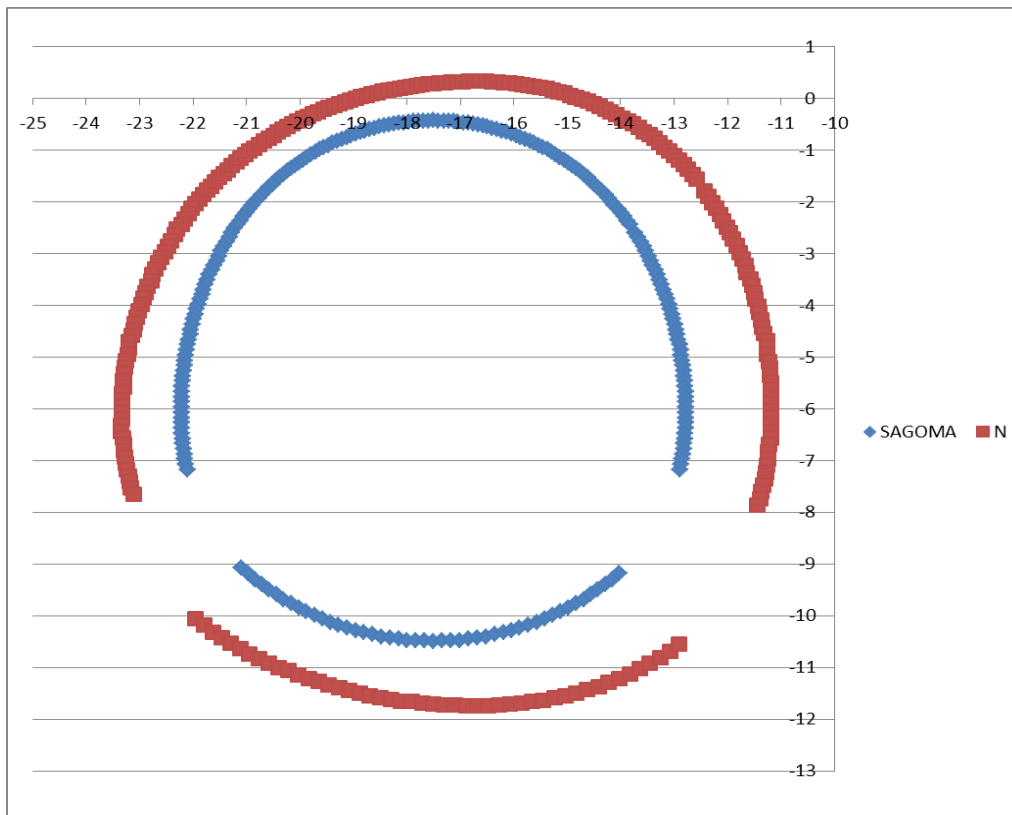


Figura 62 – Azione assiale – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=5000KN)

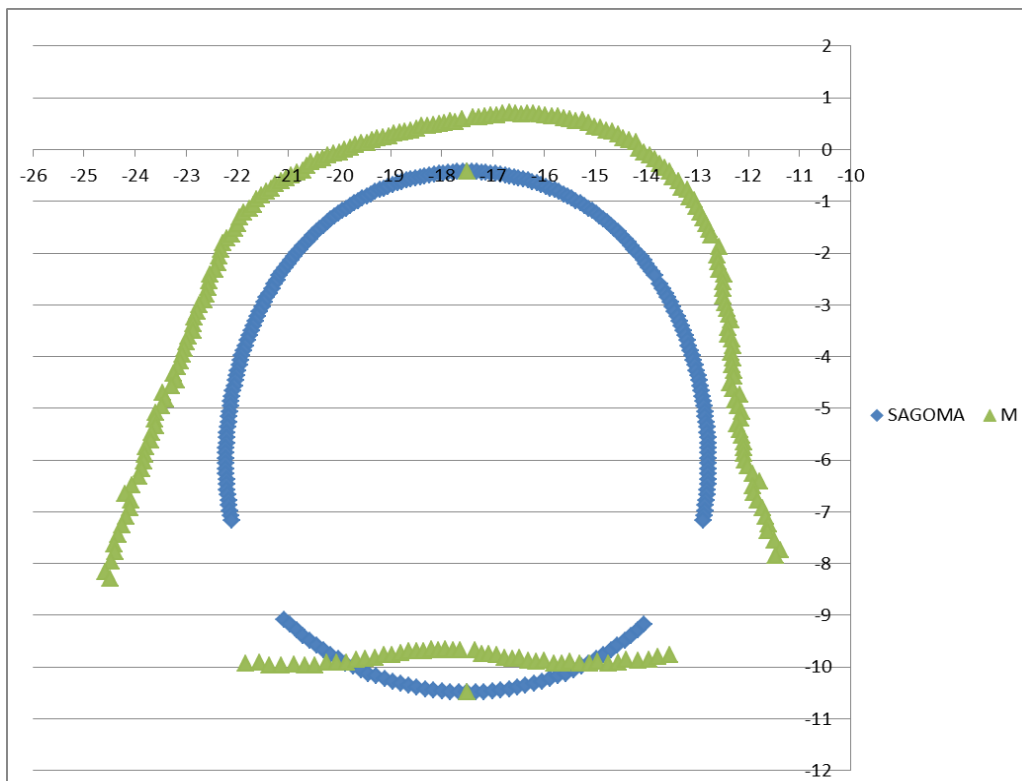


Figura 63 – Azione flettente – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=500KNm)

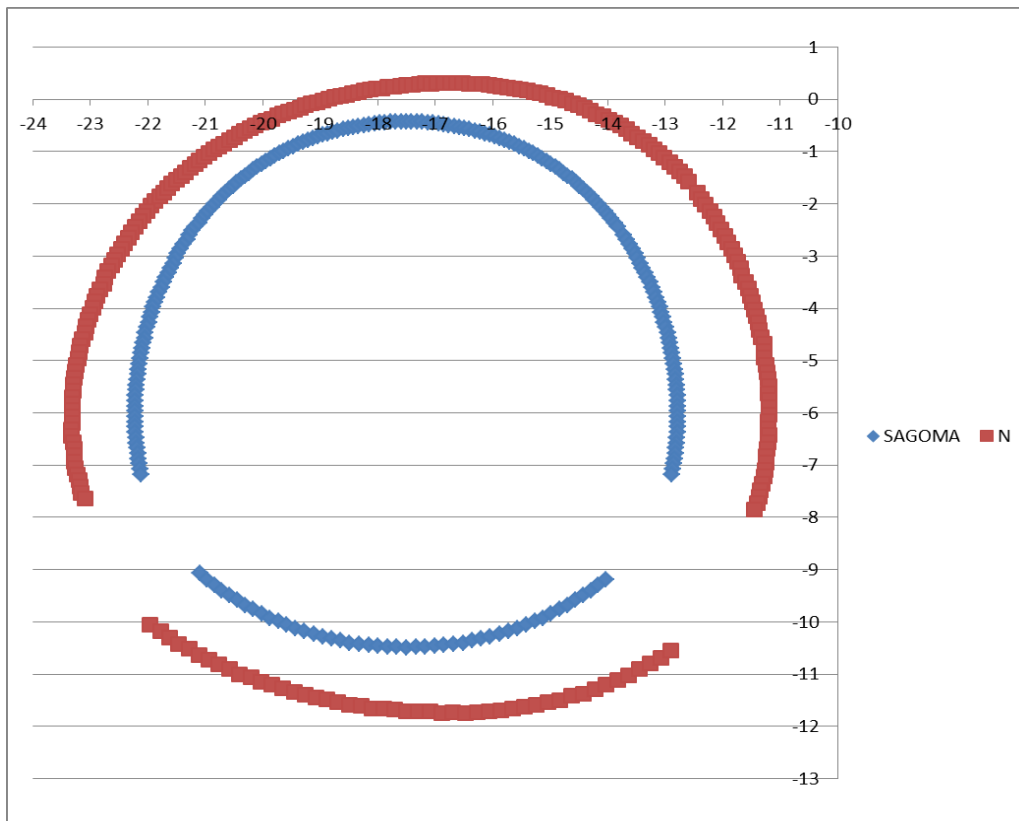


Figura 64 – Azione assiale – UNI11076– t = 120 min (Scala 1m=5000KN)

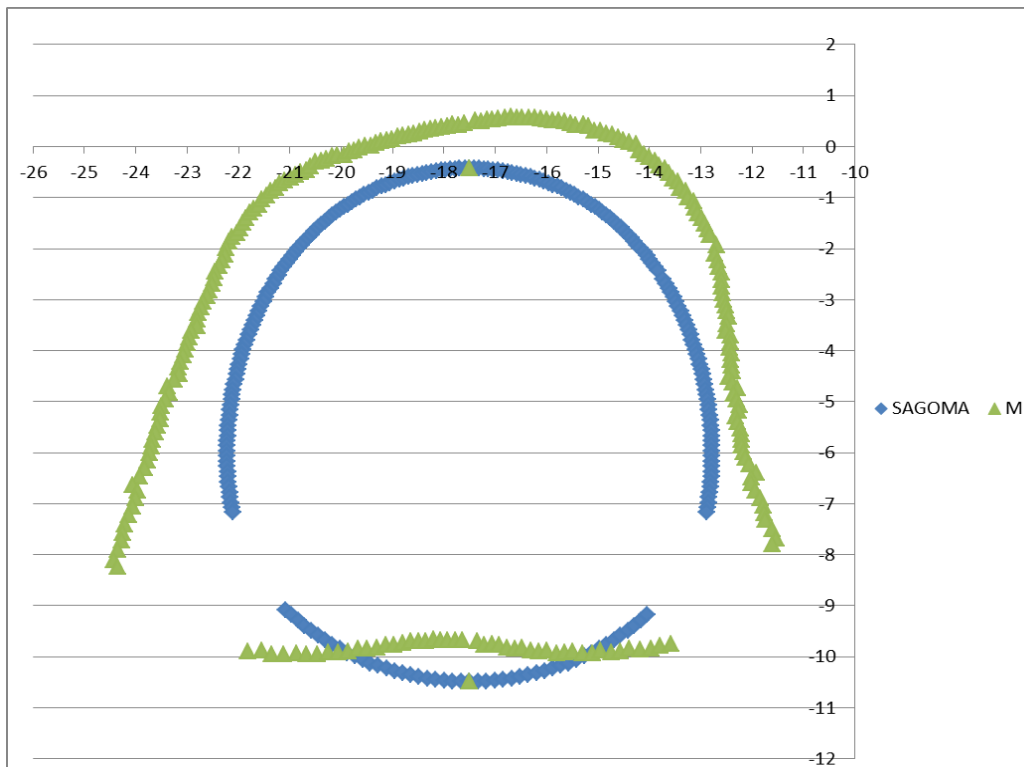


Figura 65 – Azione flettente – UNI11076– t = 120 min (Scala 1m=500KNm)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00 <span style="float: right;">Foglio 53 di 62</span>

## 6. VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO

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.

### 6.1. Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA®)

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 una analisi non lineare agli elementi finiti considerando i fenomeni di conduzione, convezione ed irraggiamento. 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 valutando il fattore di sicurezza rispetto alle azioni di calcolo imposte per la sezione di calcolo.

### 6.2. Procedura di calcolo e verifica

L'analisi numerica con FLAC, in condizioni di incendio, ha permesso di ricavare lo stato tensionale presente per tale condizione eccezionale. Tali risultati, in termini di  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$ , sono stati integrati al fine di ottenere le sollecitazioni elementari da inserire nel dominio a caldo.

Con tali valori è stato in seguito possibile l'utilizzo di RAF e il calcolo dei coefficienti di sicurezza per ciascuna condizione di incendio, definita da curve e tempi di esposizione differenti.

### 6.3. Caratteristiche termiche dei materiali

Nelle successive figure verranno riportate le caratteristiche termiche e i fattori di riduzione delle proprietà meccaniche utilizzati nelle analisi condotte.

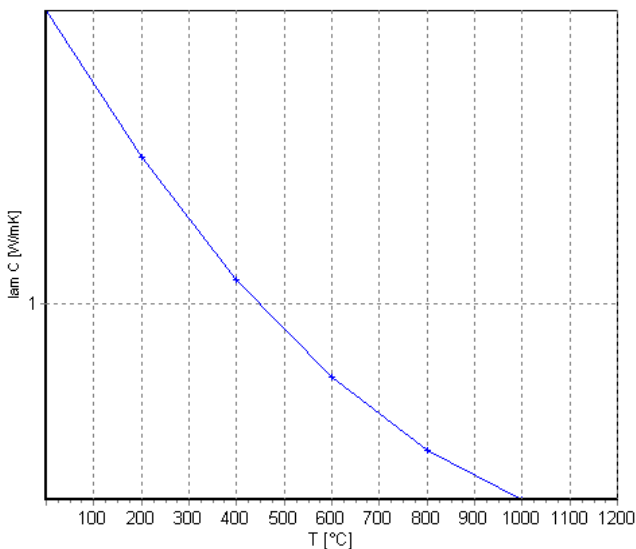


Figure 1: Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

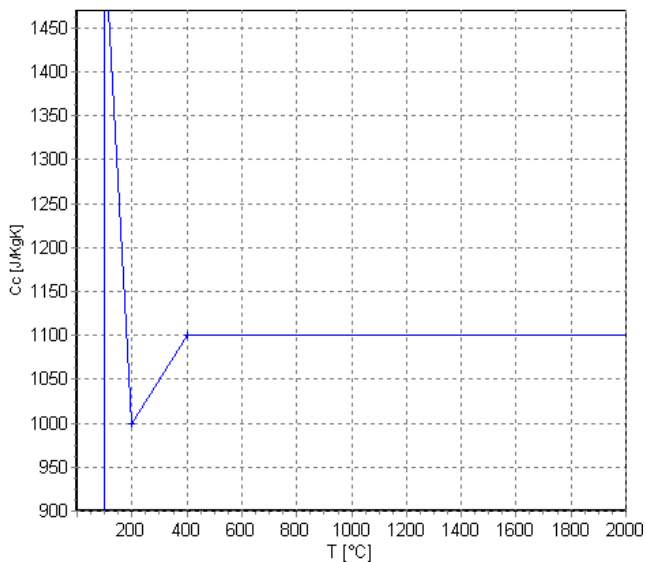


Figure 2: Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

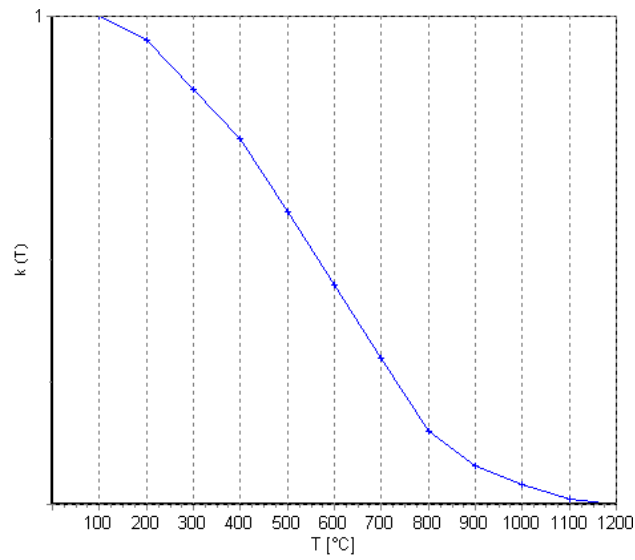


Figure 3: Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{ck}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

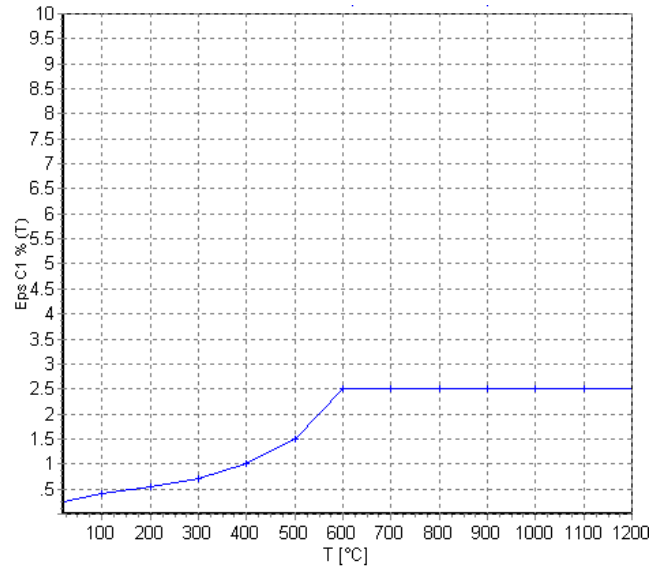


Figure 4: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{c1}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

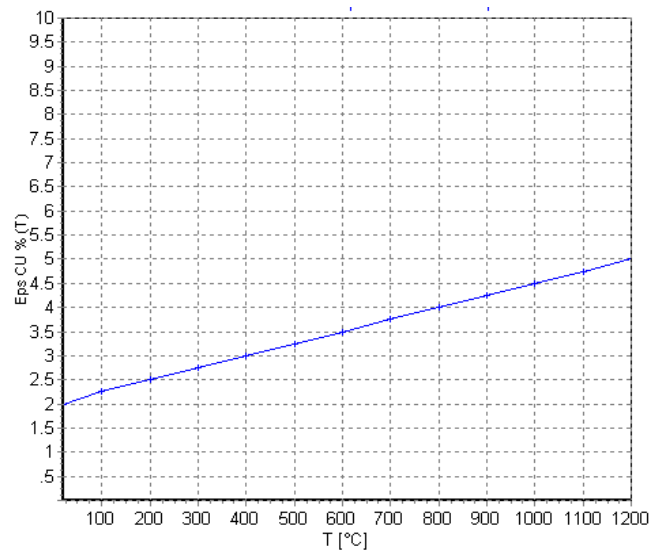


Figure 5: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{cu}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

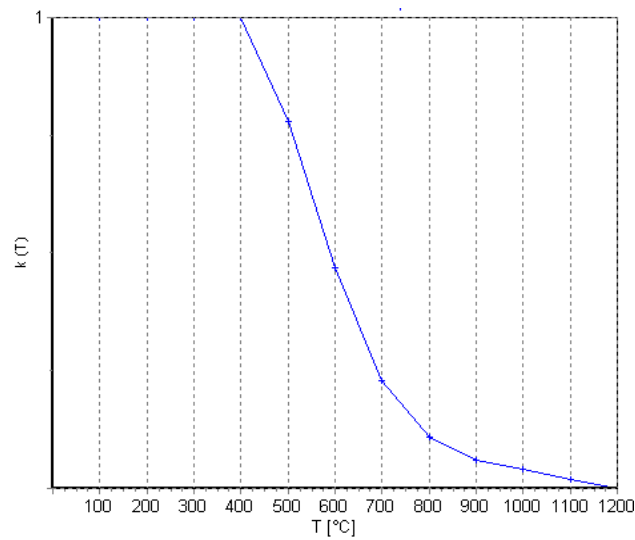
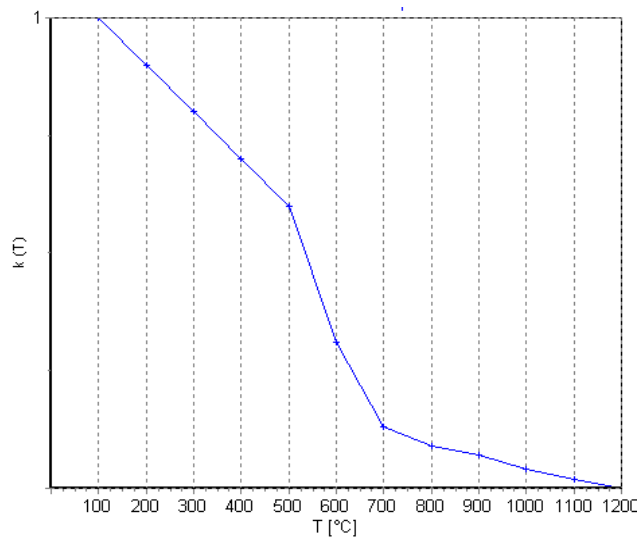


Figure 6: Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{yk}$  per per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)





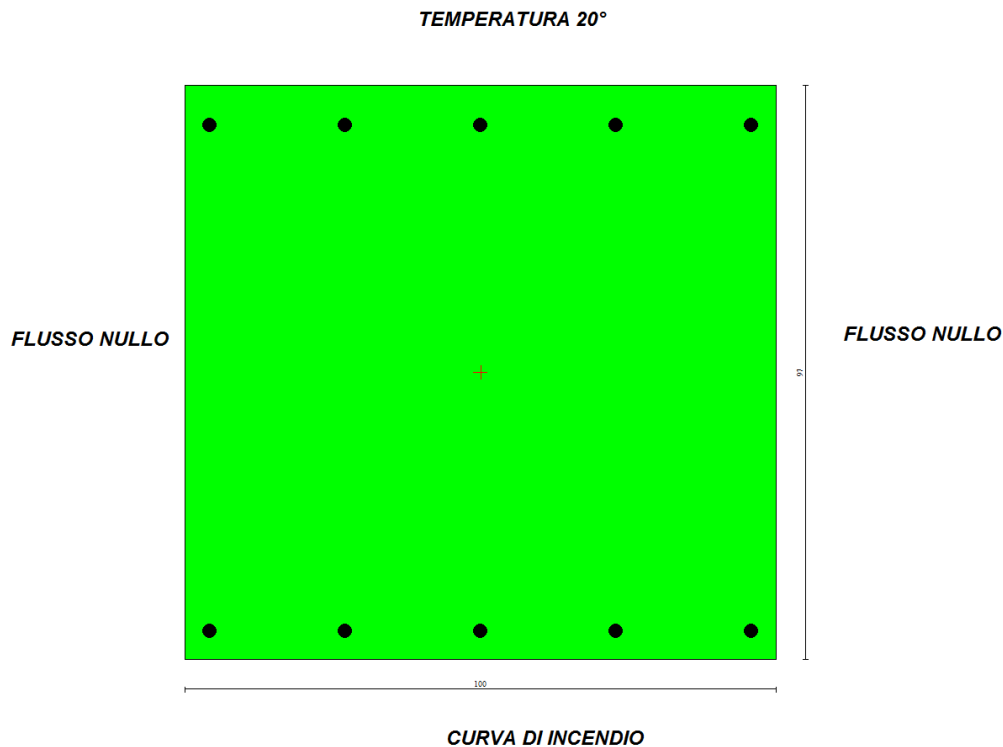
**Figure 7: Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)**

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00 <span style="float: right;">Foglio 58 di 62</span>

#### 6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno

La sezione di calcestruzzo è stata modellata utilizzando elementi finiti triangolari a sei nodi. La condizione più gravosa si è verificata sul lato destro (verso la canna adiacente) in prossimità dell'attacco tra piedritti e calotta, dove i rivestimenti hanno spessore di circa 1m. La sezione tipica di verifica ha base 100 cm ed altezza pari a 97cm (si sono infatti eliminati 3cm in intradosso a favore di sicurezza per tenere in conto dei fenomeni di espulsione di calcestruzzo). L'armatura su entrambi i lati è costituita da  $\Phi 24$  passo 20, con copriferro netto pari a 4 cm in estradosso e 2cm in intradosso.

Si è supposto inoltre che l'incendio agisse sul lato inferiore della sezione, mentre il lembo superiore è stato considerato a contatto con il terreno; per ricondurre il problema ad un'analisi su una sezione piana, inoltre, si è considerato nullo il flusso di calore in direzione longitudinale alla galleria.



**Figure 8: Schematizzazione della sezione e condizioni al contorno**

Per simulare attraverso il programma ad elementi finiti tale situazione si sono imposte quindi le seguenti condizioni al contorno:

- Lato inferiore: scambio, convezione e irraggiamento considerando agente la curva d'incendio (RWS o EUREKA a seconda delle analisi)
- Lato destro: Nessun flusso di calore lungo tale lato
- Lato sinistro: Nessun flusso di calore lungo tale lato

- Lato Superiore: Scambio termico considerando un ambiente di contatto a temperatura uniforme pari a 20°.

I risultati, oltre che per via tabellare, vengono forniti in maniera grafica da RAF 10.0. Per entrambe le curve di incendio si osserva come la distribuzione delle temperature nel momento più sfavorevole risulti stratificata in maniera uniforme (in quanto il flusso di calore è nullo attraverso i lati verticali) con valori di temperatura piuttosto elevati unicamente nella zona superiore della sezione per una altezza di circa 15-20 cm, mentre a partire da tale quota i valori rimangono pressoché costanti.

In accordo alle analisi numeriche svolte, si è osservato che le condizioni più critiche per la verifica delle sezioni analizzate si hanno dopo 120 minuti di esposizione all'incendio, sia per la curva d'incendio RWS sia per la curva EUREKA. Nel seguito si riportano le isoterme nella sezione oggetto di analisi per la curva RWS ed EUREKA a tale istante. Si noti come i risultati ottenuti risultino comparabili a quelli ottenuti dalle analisi mediante il programma di calcolo Flac; ai fini del confronto si è indicato il punto a cui la temperatura scende sotto i 50°C, con indicata la distanza Y dall'intradosso.

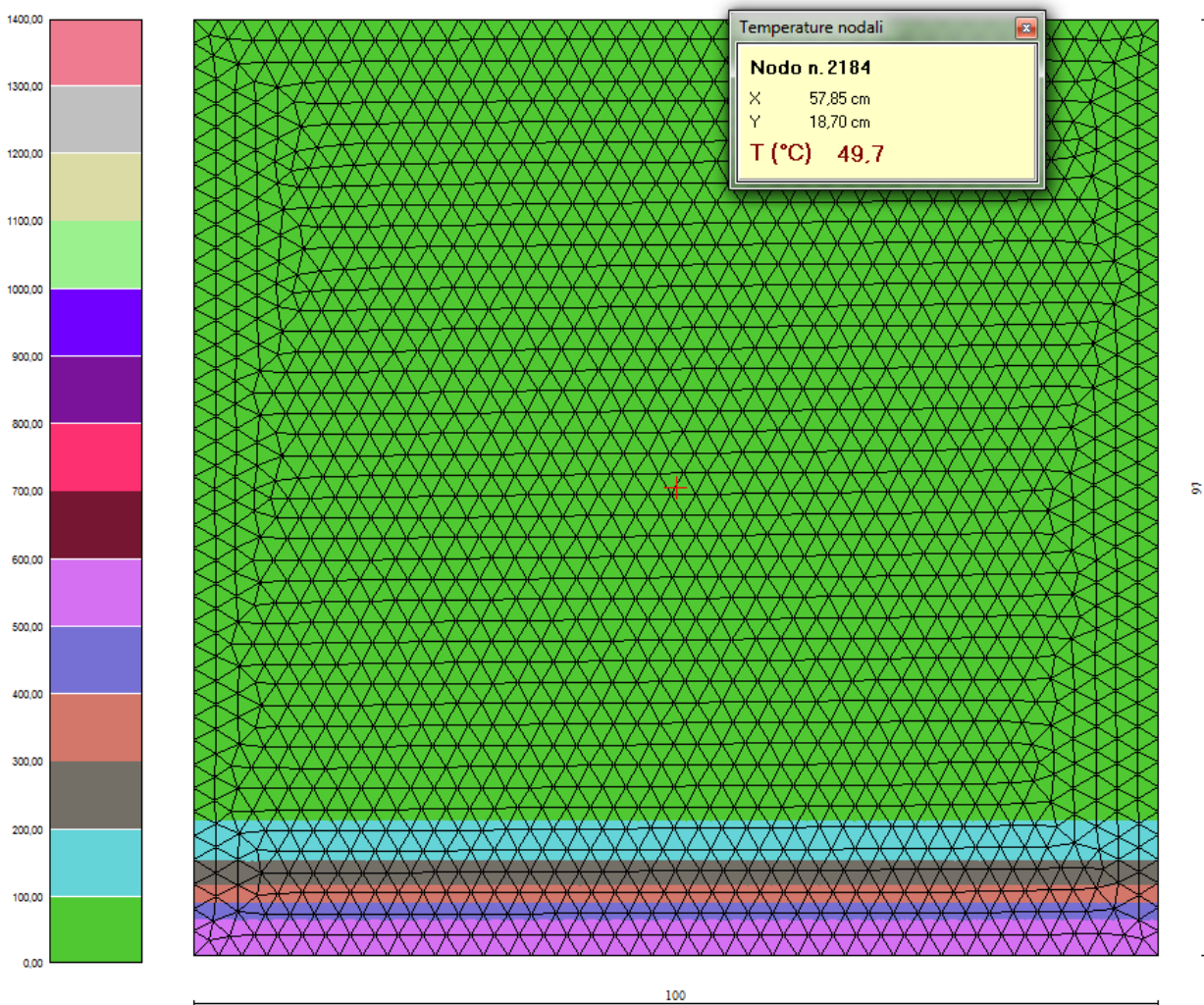
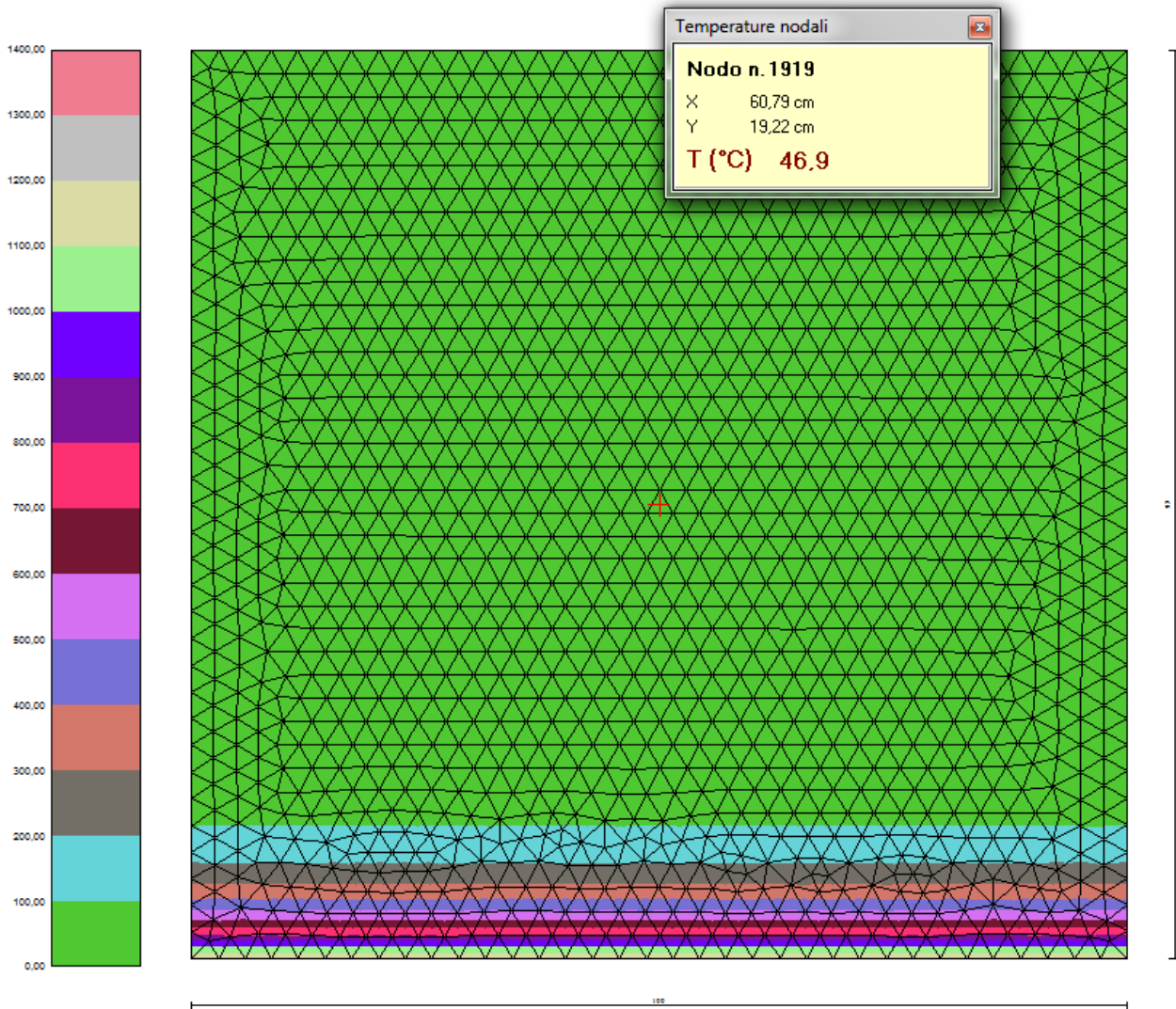


Figure 9: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (T=120 min curva EUREKA)



**Figure 10: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (t = 120 min curva UNI)**

## 6.5. Risultati e verifiche

Per il modelli di calcolo redatto, sono state verificate tramite RAF le condizioni di incendio, in termini di coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo per le sezioni maggiormente sollecitate.

Le analisi RAF sono state eseguite per le condizioni considerate come più critiche e dimensionanti per ciascuna curva di esposizione all'incendio. Le condizioni critiche, sia per la curva di incedido RWS sia per la curva EUREKA, si hanno al tempo 120 minuti.

Nel seguito si riporta la tabella che riassume tali coefficienti di sicurezza minimi raggiunti durante le analisi: in allegato sono riportati tutti i valori valutati dal programma di calcolo.

Curva	H	N	M	Armatura	FS
[-]	[m]	[kN]	[kNm]	[mm]	[-]
EUREKA	0.97	-7258	756	Φ24/200	3.81
UNI	0.97	-7173	696	Φ24/200	4.02

**Tabella 9 Verifiche al fuoco considerando le due diverse curve d'incendio**

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-003-A00</p>	<p>Foglio 62 di 62</p>

## 7. CONCLUSIONI

Oggetto del presente elaborato è l'analisi del comportamento in condizioni di incendio della galleria naturale di Valico a singolo Binario – Tratta 3. Sono state condotte le verifiche al fuoco considerando due diverse curve di incendio, ovvero la curva RWS e la curva Eureka, con riferimento alle condizioni critiche rappresentative presenti lungo lo sviluppo della galleria. Tali verifiche sono state condotte in conformità a quanto indicato nell'Eurocodice 2 (UNI EN 1992:2005).