

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 6 – WBS GN15X
Verifiche di resistenza al fuoco**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI
Consorzio Cociv 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 1	A

Progettazione :								
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione	COCIV	25/05/2017	Di Salvo	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-GN00-00-001-A00
-----------	---------------------------------------

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	
	<p>IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 3 di 72</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		10
4.3. Proprietà termiche.....		15
4.4. Modello di trasmissione del calore.....		19
4.5. Fasi di calcolo		19
5. SINTESI DEI RISULTATI.....		21
5.1. Sezione 1 –Sezione tipo B2sb-r - Basse coperture		24
5.1.1. Distribuzione di temperatura		24
5.1.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo		28
5.1.3. Stati tensionali e deformativi		33
5.1.4. Andamento delle azioni interne nella struttura		39
5.2. Sezione 2 –Sezione tipo C2sb-r - Basse coperture		43
5.2.1. Distribuzione di temperatura		43
5.2.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo		47
5.2.3. Stati tensionali e deformativi		52
5.2.4. Andamento delle azioni interne nella struttura		58
6. VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO.....		62
6.1. Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©)		62
6.2. Procedura di calcolo e verifica		62
6.3. Caratteristiche termiche dei materiali		63
6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno.....		67
6.5. RISULTATI E VERIFICHE		70
7. CONCLUSIONI		71
ALLEGATI DI CALCOLO.....		72

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00

Foglio
4 di 72

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00 Foglio 5 di 72

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 6). Si precisa che in corrispondenza della tratta in esame il binario pari verrà invece realizzato attraverso scavo in meccanizzato. 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 al relativo elaborato "Galleria Naturale di Valico – Galleria a Singolo Binario - Tratta 6 - WBS GN15X - 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 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00 Foglio 6 di 72

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" di lungo termine presentate nell'elaborato "Galleria Naturale di Valico – Galleria a Singolo Binario - Tratta 6 - WBS GN15X - Relazione di calcolo". Si rimanda quindi a tale elaborato per maggiori informazioni sulle geometrie e le assunzioni fatte nel corso della modellazione, oltre alla descrizione dei risultati ottenuti in assenza del carico termico. A partire dall'ultima "Time" di calcolo si sono 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.

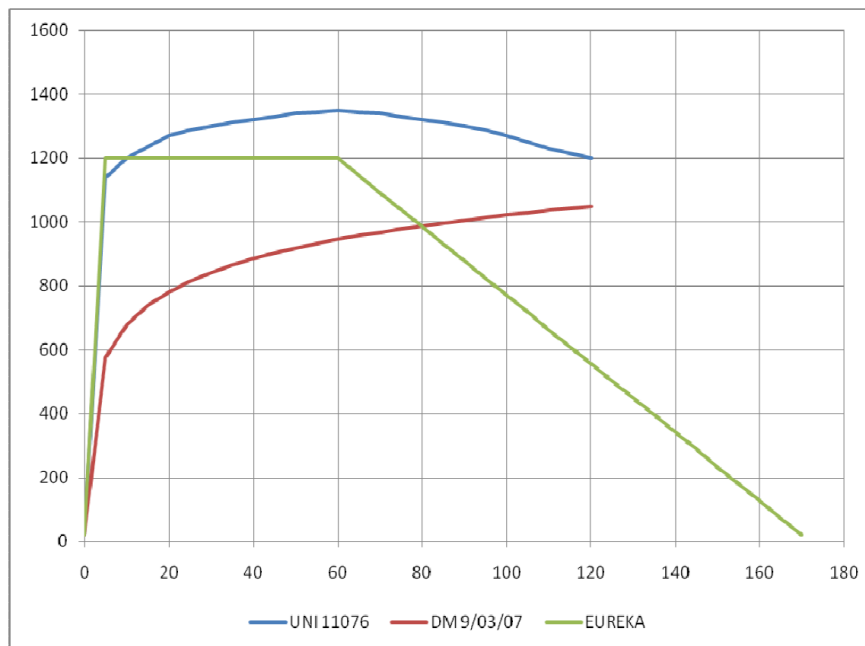


Figura 1 Comparazione tra le curve d'incendio

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°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°C a 170 minuti. Visto l'andamento descritto i modelli verranno impostati imponendo dei salvataggi agli istanti temporali ritenuti più significativi, ovvero 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°C a 10 minuti, un massimo di 1350°C a 60 minuti e un ritorno a 1200°C a 120 minuti. In questo caso i modelli numerici si ritengono maggiormente significativi gli istanti 10, 60 e 120 minuti, in corrispondenza dei quali verranno impostati i salvataggi nei modelli numerici.

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-GN00-00-001-A00
	Foglio 9 di 72

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. In particolare si sono aggiunte due differenti branch di calcolo relativi ai due differenti scenari di incendio simulati ("curva EUREKA" e "CURVA UNI") a seguire la fase di lungo termine impiegata per il dimensionamento statico (cfr. IG51-00-E-CV-CL-GN00-00-006-A00).

La rappresentazione del comportamento meccanico del calcestruzzo è stata basata su un modello avente criterio di 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 e ad un dato intervallo temporale si arrivi al un superamento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Si consideri inoltre che il modello numerico è stato impostato in maniera tale che i soli 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 di per sé 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	$f_{c,\vartheta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\vartheta}$	$\epsilon_{cu1,\vartheta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
20	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.0055	0.0250
300	0.85	0.0070	0.0275
400	0.75	0.0100	0.0300
500	0.60	0.0150	0.0325
600	0.45	0.0250	0.0350
700	0.30	0.0250	0.0375
800	0.15	0.0250	0.0400
900	0.08	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.0250	0.0475
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
$f_{c,\vartheta}$ [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 $E_{c,\vartheta}$, anch'esso variabile in funzione della temperatura, si è fatto riferimento al legame costitutivo presentato nella stessa normativa e illustrato nella figura seguente:

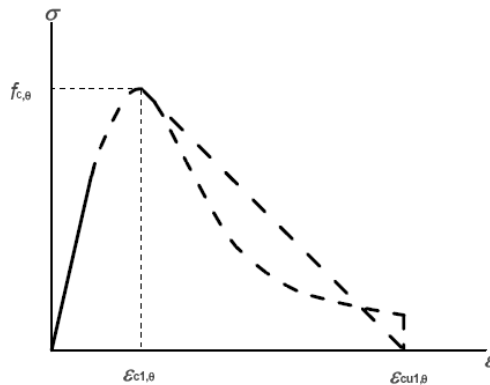


Figura 3 – Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

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:

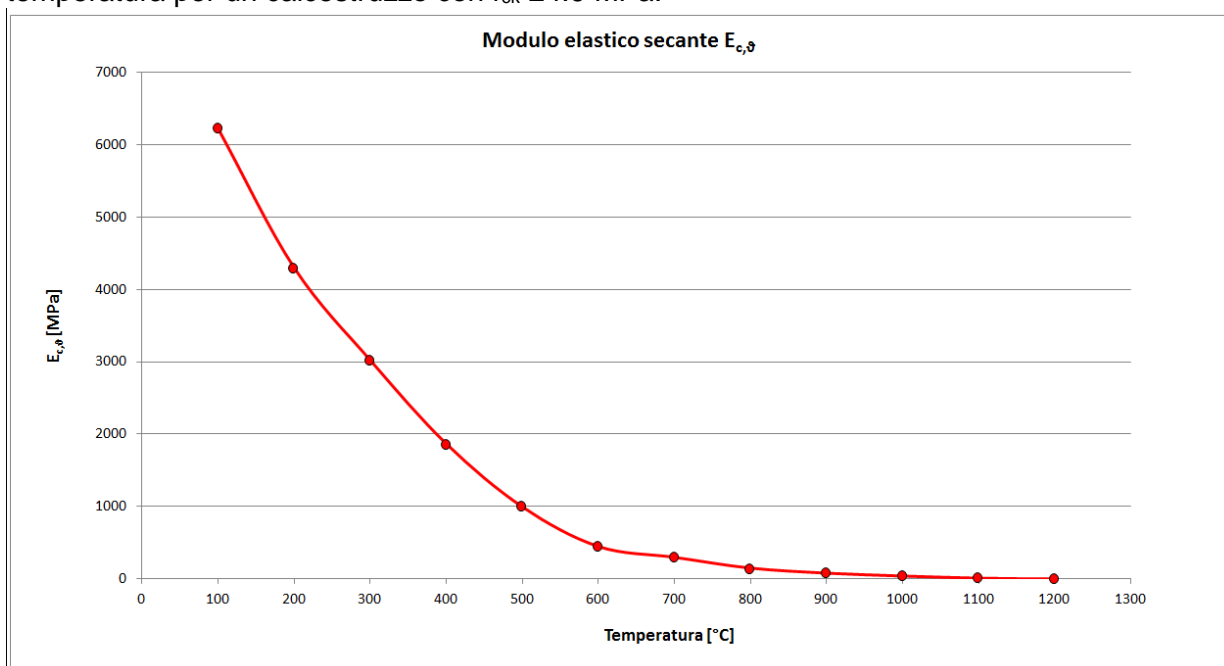


Figura 4 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura ($R_{ck} = 30$ MPa)

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 nel seguito il valore di coesione impiegato nel modello di calcolo secondo il modello di rottura alla Tresca del materiale: si è impiegata una coesione pari a

$$c'_{,\theta} = f_{ck,\theta} / 2$$

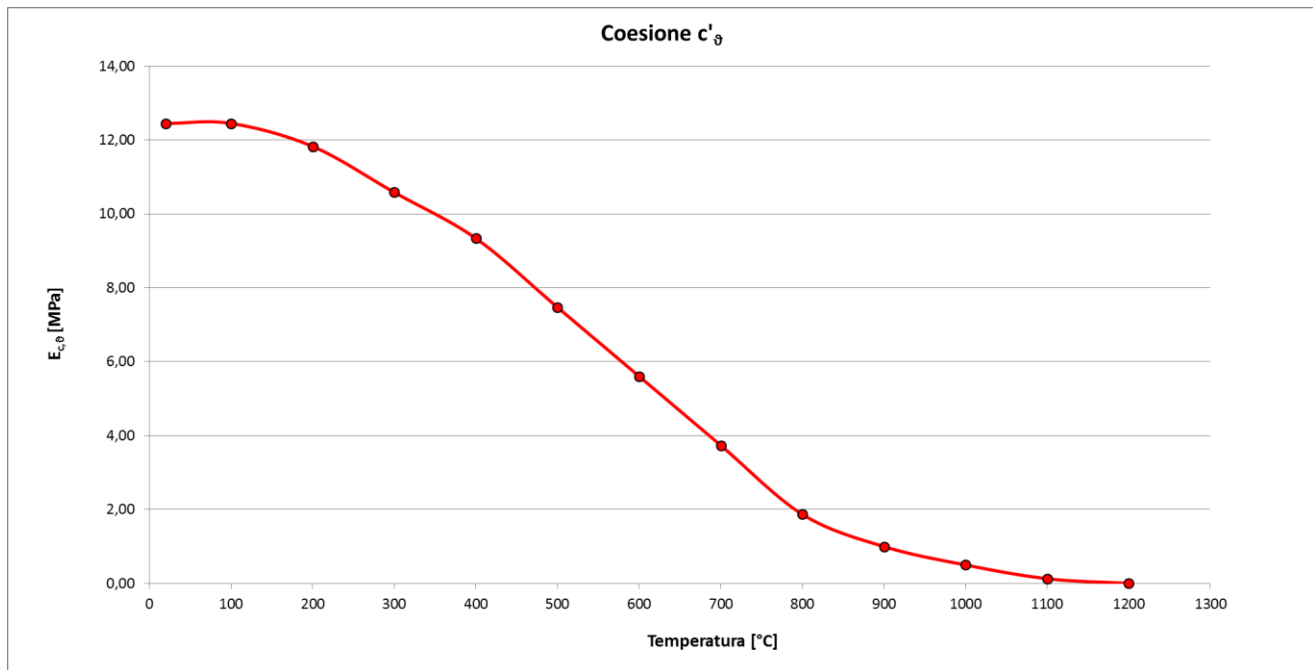


Figura 5 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (R_{ck} = 30 MPa)

T [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
c'_{\theta} [MPa]	12,45	12,45	11,83	10,58	9,34	7,47	5,60	3,74	1,87	1,00	0,50	0,12	0,00

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, come precedentemente indicato, 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.

Infine si è modellato il comportamento a trazione del calcestruzzo, scegliendo all'interno delle possibilità previste dall'Eurocodice, con un decadimento lineare delle caratteristiche di resistenza nel tratto tra le temperature di 100 e 600°C.



Figura 6 – Resistenza a trazione in funzione della temperatura ($R_{ck} = 30$ MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{ck,t}(\vartheta)$ [MPa]	2.558	2.046	1.535	1.023	0.512	0	0	0	0	0	0	0

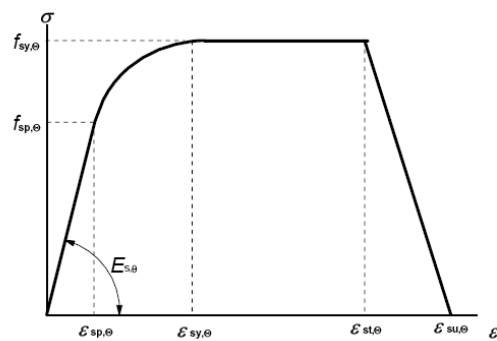
Tabella 5- Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura ($R_{ck} = 30$ MPa)

- **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 θ [°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 6 – Caratteristiche dell'acciaio in funzione della temperatura



Range	Stress $\sigma(\theta)$	Tangent modulus
$\epsilon_{sp,\theta}$	$\epsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\epsilon_{sp,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\epsilon_{ys} - \epsilon)}{a[a^2 - (\epsilon - \epsilon_{ys})^2]^{0,5}}$
$\epsilon_{sy,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	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 ¹⁾	$\epsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\epsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\epsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,20$ 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 7 – Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

Come si nota, per quanto riguarda le armature di intradosso, la resistenza offerta dall'acciaio può essere trascurata: in corrispondenza delle barre si raggiungono infatti temperature prossime ai 1000 gradi, temperatura alla quale la resistenza del materiale si riduce a pochi punti percentuali.

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.

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

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

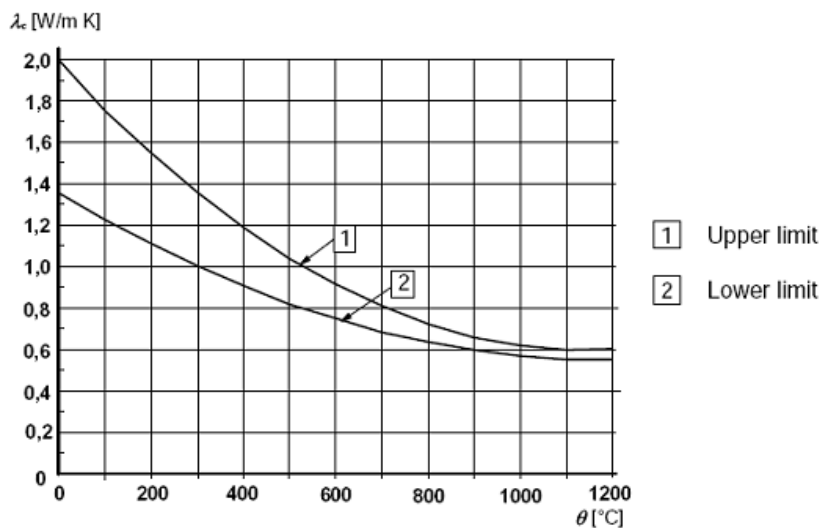


Figura 8 – Legge di variazione della conducibilità termica secondo normativa

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

Tabella 7 – Valori della conducibilità termica di progetto

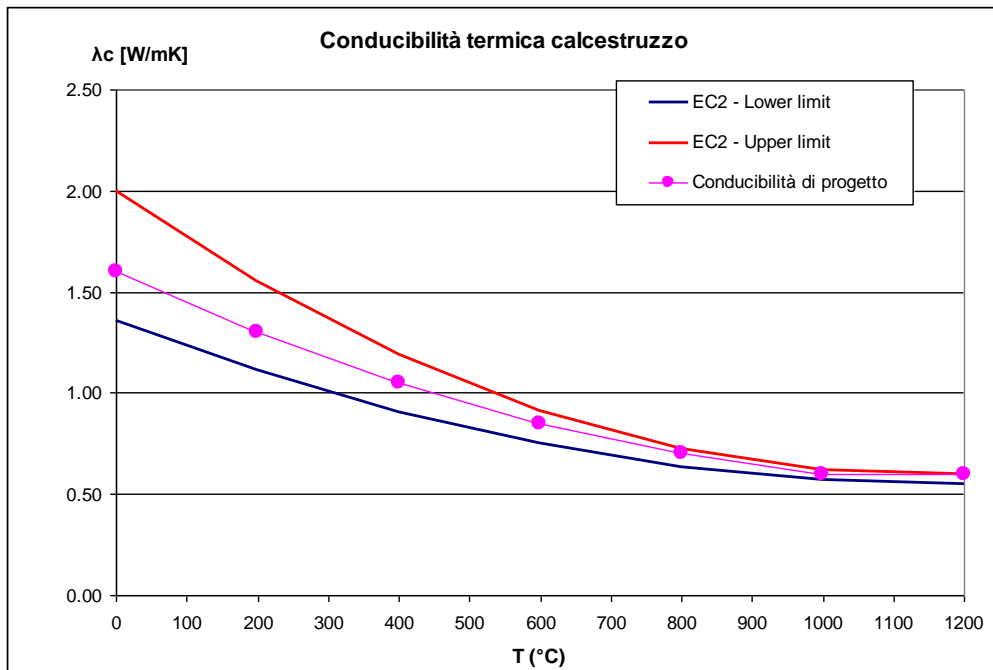


Figura 9 – Conducibilità termica di progetto

- **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 10 – 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 8 – Valori del calore specifico di progetto

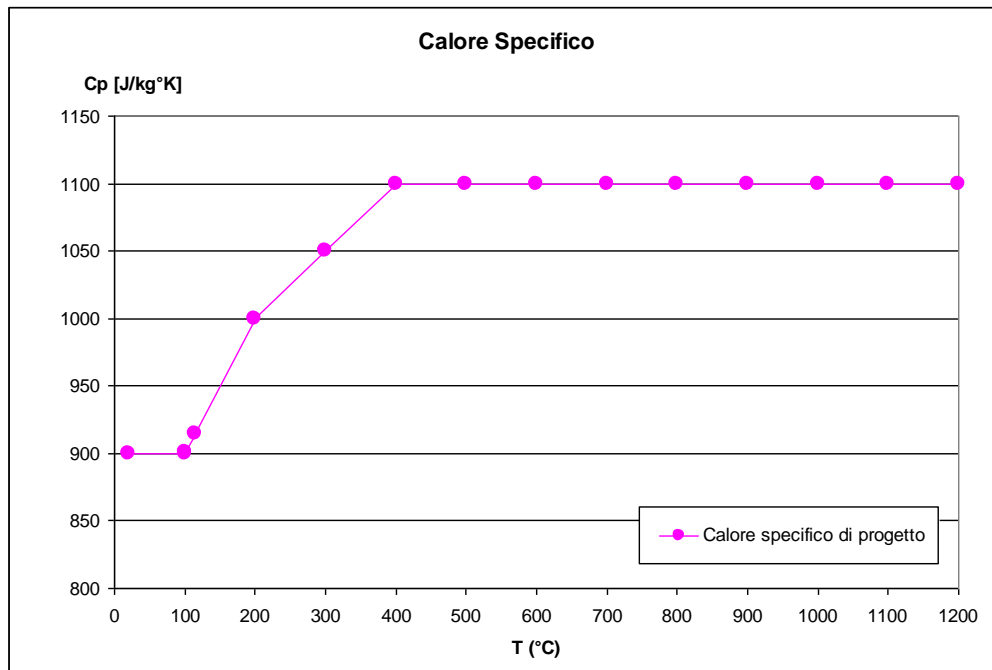


Figura 11 – Calore specifico di progetto

- 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 12 – 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:

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

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

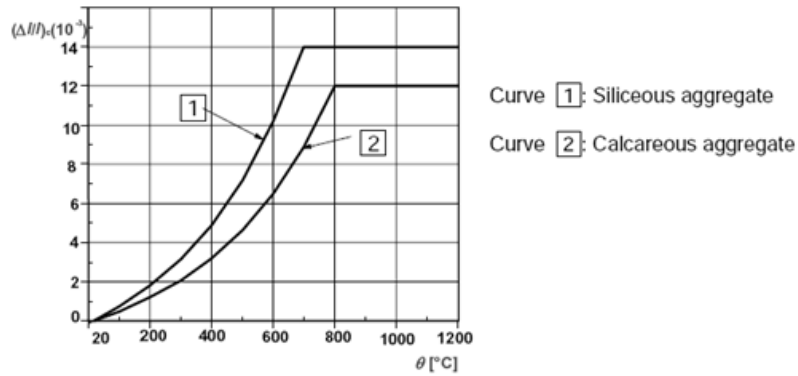


Figura 13 – Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa

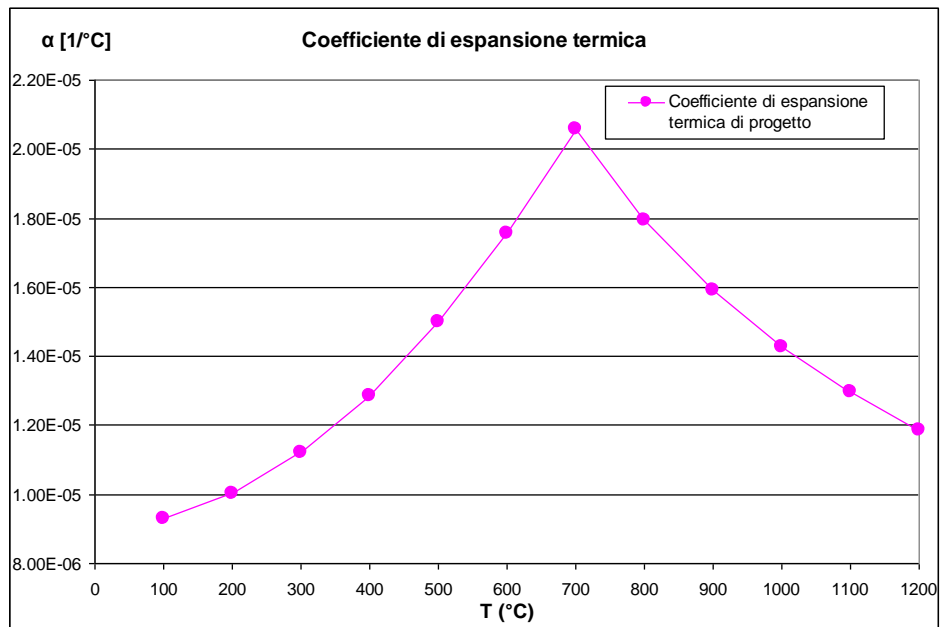


Figura 14 – Coefficiente di espansione termica di progetto

T [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
ε _c	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 9 – 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-GN00-00-001-A00	Foglio 19 di 72

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, λ_c è la conducibilità termica, ρ 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_{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:

α_c è il coefficiente di scambio di calore per convezione assunto pari 25 W/(m²°C), T_m è la temperatura del gas mentre T_g è la temperatura della superficie esposta, Φ è il fattore di configurazione assunto pari a 1,0, ε è il coefficiente di remissività risultante assunto pari a 0,8 e σ è la costante di Stefan-Boltzmann pari a 5,7x10⁻⁸ W/(m²°C⁴).

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

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 20 di 72</p>

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 α , 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 in base a quanto indicato nel capitolo 4. Tali tempi sono ritenuti i più significativi in base all'andamento delle curve per valutare l'evoluzione nel tempo del fenomeno di incendio: si consideri comunque che la tipologia di analisi è di tipo evolutivo e che il decadimento delle proprietà meccaniche del materiale dipende dalla massima temperatura raggiunta in tutti gli istanti di calcolo. Si sottolinea infine che, al fine di cogliere in maniera continua l'evoluzione dell'incendio nel tempo, si sono definiti punti di controllo delle principali grandezze in esame (ad esempio coesione e temperatura) che verranno monitorati durante tutti i 120 minuti di simulazione dell'analisi e presentati nei successivi capitoli.

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, in quanto maggiormente sollecitata.

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 è stata modellata adottando un "aspect-ratio" appositamente incrementato in corrispondenza dell'intradosso della galleria; gli elementi in tale settore risultano quindi di spessore più limitato 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.

Si rimanda alla Relazione di calcolo relativa alle singole sezioni tipo analizzate per un ulteriore approfondimento sulle geometrie e sulla modellazione delle fasi costruttive.

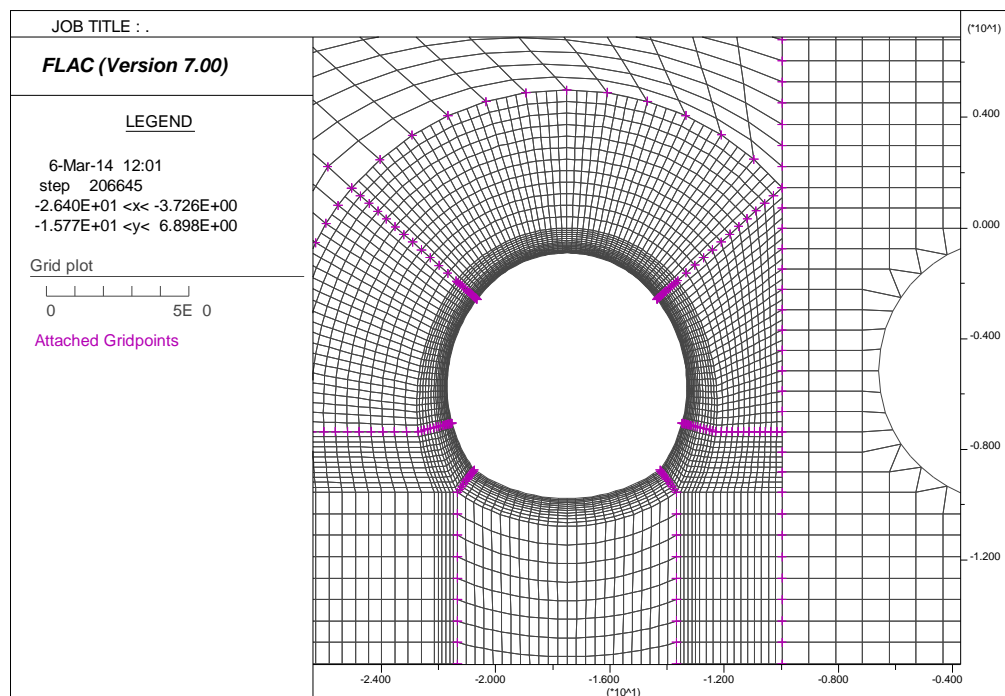


Figura 15 – Mesh di calcolo – B2sb-r

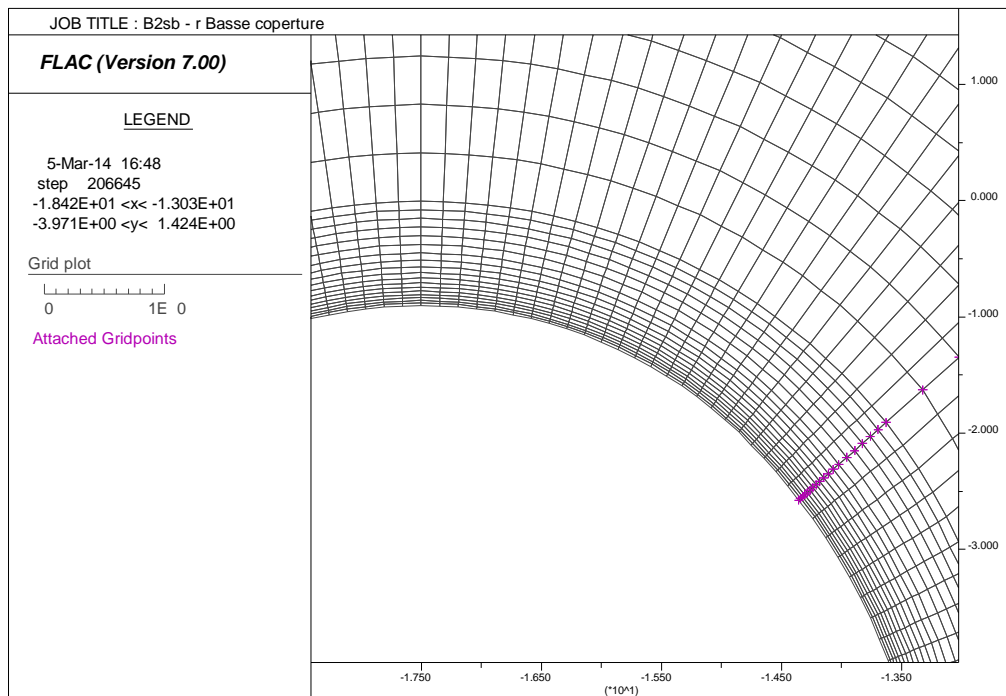


Figura 16 – Mesh di calcolo – Effetto dell’ “Aspect ratio” in intradosso – B2sb-r

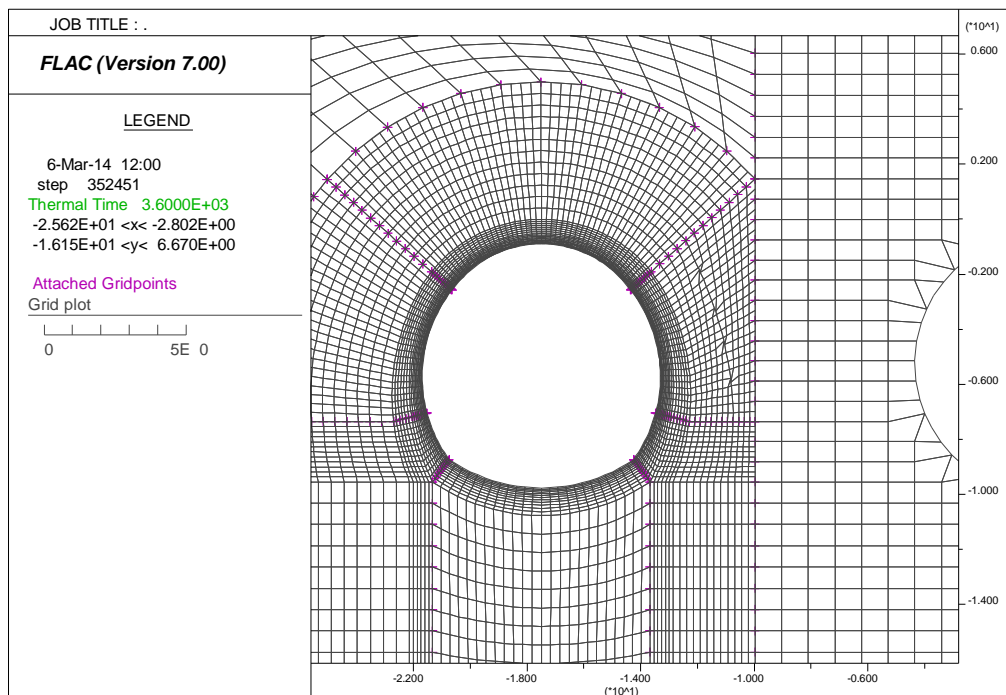


Figura 17 – Mesh di calcolo – C2sb-r

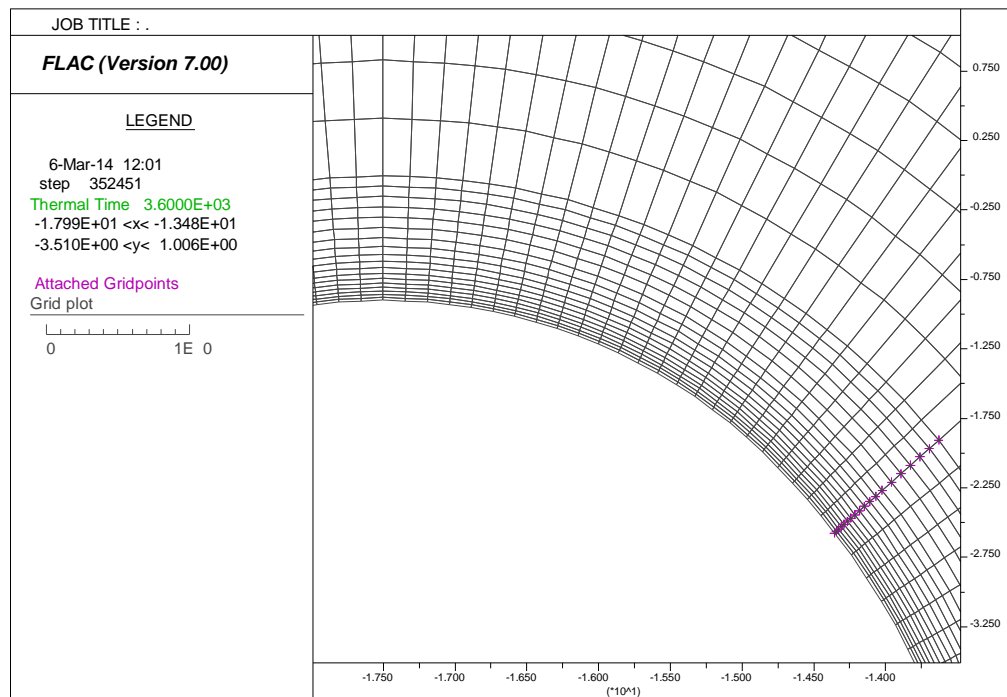


Figura 18 – Mesh di calcolo – Effetto dell’ “Aspect ratio” in intradosso – C2sb-r

In accordo con la relazione strutturale della galleria si sono analizzate le sezioni di calcolo B2sb-r e C2sb-r nei contesti geomeccanici ritenuti più critici lungo l’intera tratta in esame.

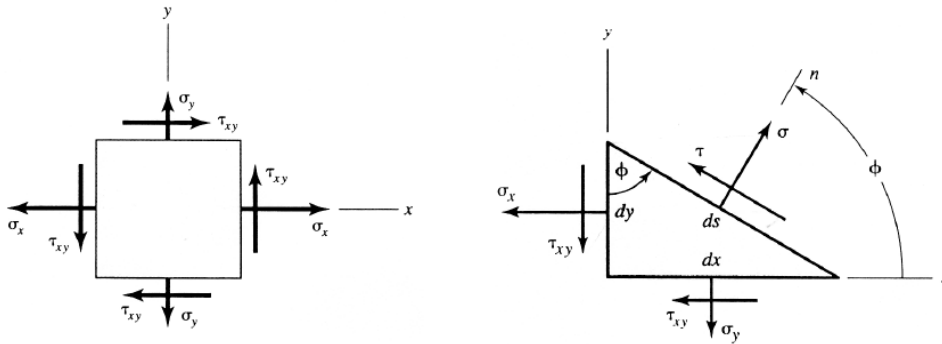
I rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria tramite elementi quadrangolari di mesh. L’utilizzo di elementi quadrangolari per la simulazione dei rivestimenti non restituisce direttamente le azioni interne M, N e T, le quali devono essere ricavate a partire dalle tensioni σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{xy} secondo il metodo di trasformazione delle tensioni tramite cerchio di Mohr.

Risulta così possibile definire completamente lo stato tensionale in ogni nodo della griglia che simula i rivestimenti, per mezzo delle sue componenti normali e tangenziali, qualunque sia l’inclinazione della superficie che contiene il nodo stesso.

Per uno stato piano di tensione, si dimostra che la conoscenza delle tensioni agenti su due piani mutuamente perpendicolari è sufficiente per conoscere lo stato tensionale su qualunque superficie passante per il punto considerato.

Tramite le equazioni di trasformazione, per uno stato piano di tensione è possibile ricavare le tensioni σ e τ necessarie per il calcolo delle azioni interne.

$$\begin{cases} \sigma = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\phi + \tau_{xy} \sin 2\phi \\ \tau = - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \sin 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \end{cases}$$



Ricavati i valori di σ_n e τ per ogni sezione, tramite l'integrazione delle stesse è possibile ottenere l'azione interna N e l'azione di taglio T e di conseguenza il momento M. La modellazione dei rivestimenti così condotta ha permesso di verificare le singole sezioni di calcolo secondo le reali geometrie definite nelle relative tavole di carpenteria.

5.1. Sezione 1 –Sezione tipo B2sb-r - Basse coperture

La sezione tipo B2sb – r nel seguito presentata è stata analizzata nel peggior contesto geomeccanico presente nella tratta in esame per il quale tale sezione tipo dovrà essere applicata. Si sottolinea che la canna presente sul lato destro del modello (binario pari), scavata mediante scavo in meccanizzato, verrà realizzata successivamente al completamento della canna in tradizionale oggetto di analisi (WBS GN15X).

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 subiscono un incremento di temperatura, mentre nella restante parte della sezione non si avvertono sensibili variazioni di temperatura.

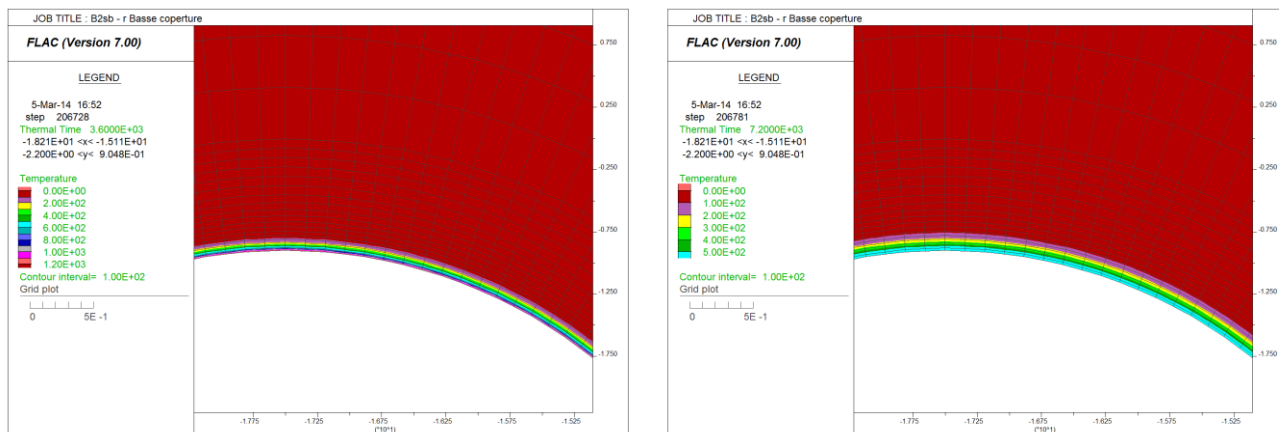


Figura 19 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA

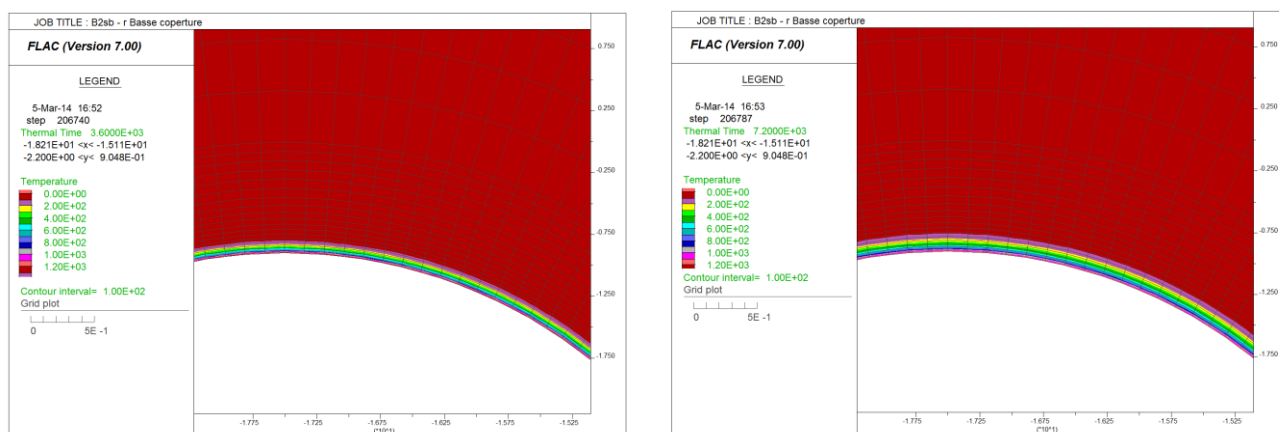


Figura 20 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva UNI11076

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. Si osservi come la discretizzazione sia molto buona, con il primo strato avente spessore paria circa 1.5cm.

PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA
[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]
1	0	4	5.39	7	13.58	10	26.05	13	45
2	1.55	5	7.75	8	17.17	11	31.51	14	50.75
3	3.34	6	10.46	9	21.3	12	37.78		

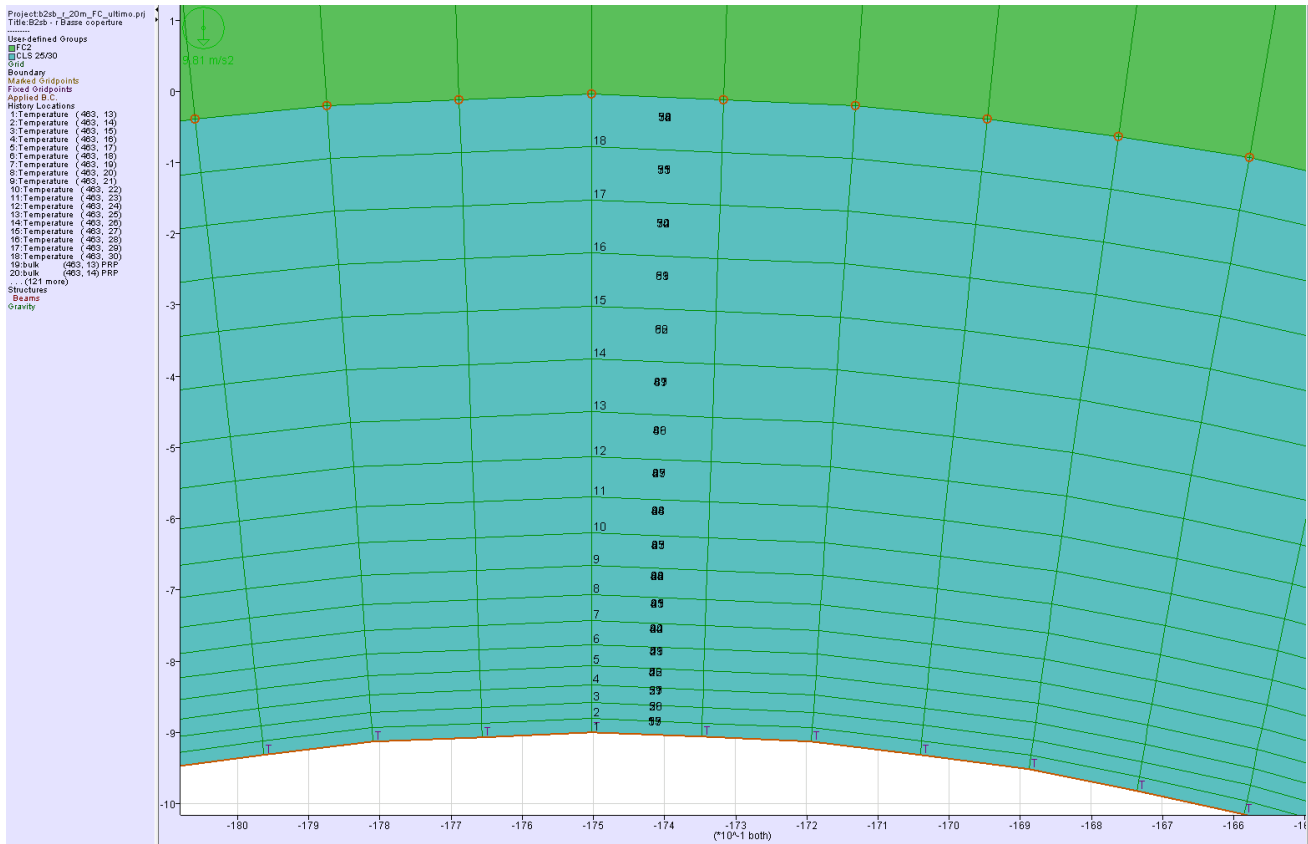


Figura 21 – Punti di controllo per l'evoluzione della temperatura e delle proprietà meccaniche

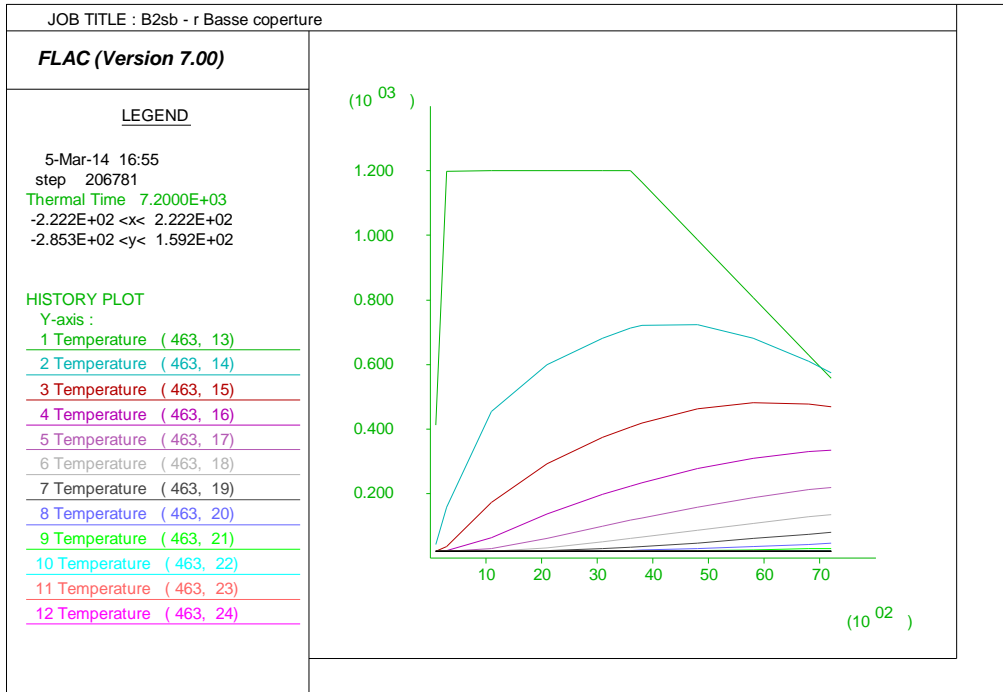


Figura 22 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA

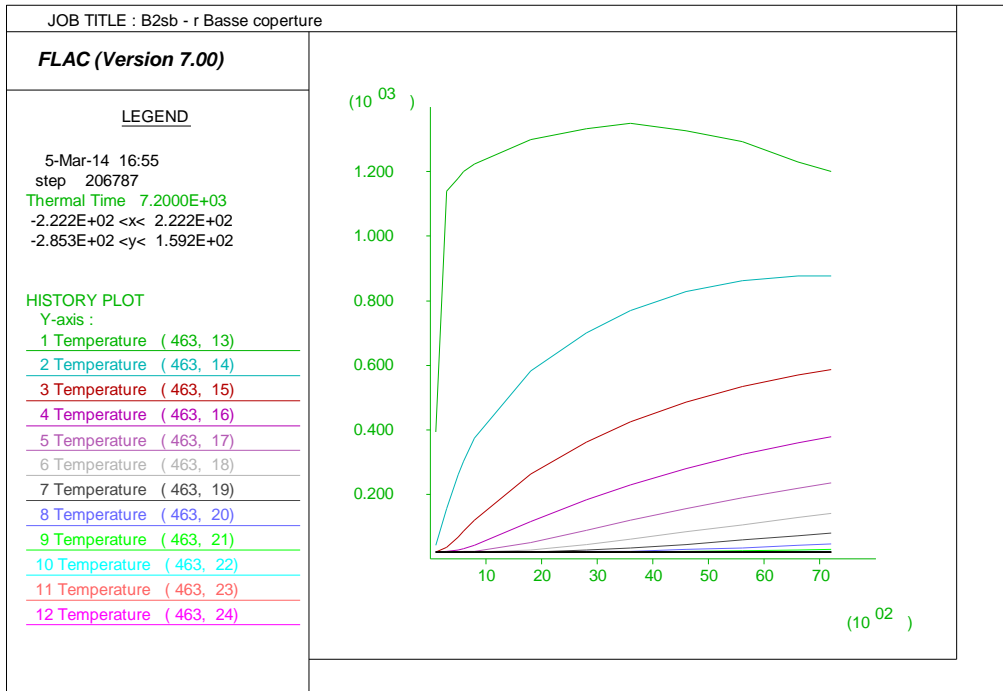


Figura 23 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva UNI11076

5.1.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo

Nel seguito verrà riportato l'andamento del modulo di compressibilità ("bulk") impiegato nel codice di calcolo FLAC. Tale modulo "K" risulta legato dalle seguente legge lineare al modulo elastico: l'andamento con la temperatura risulta pertanto 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 tale valore 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.

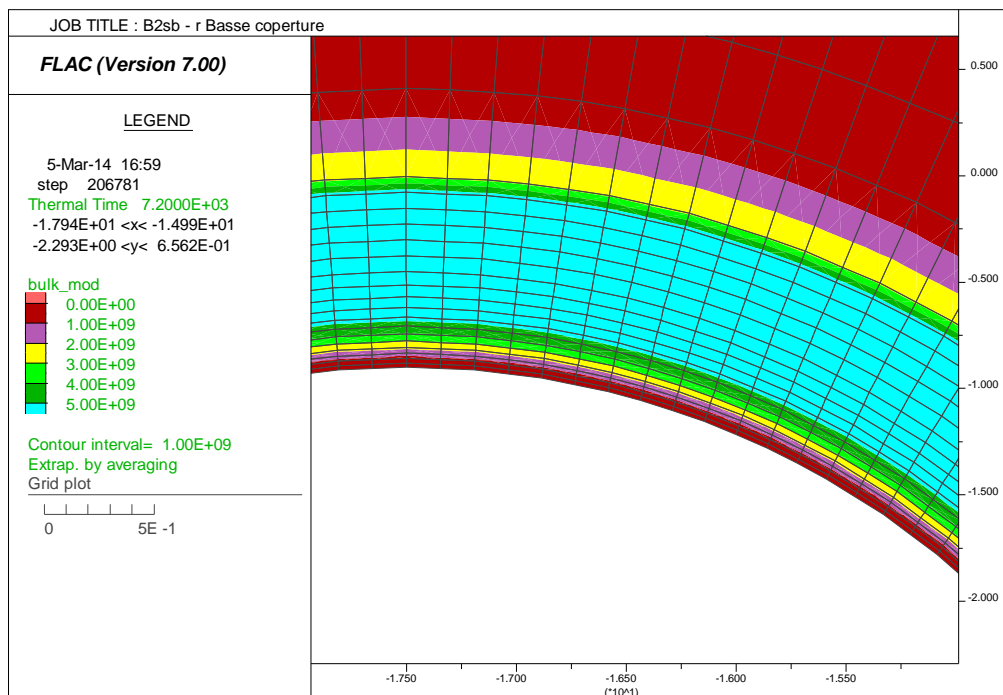


Figura 24 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA (120min)

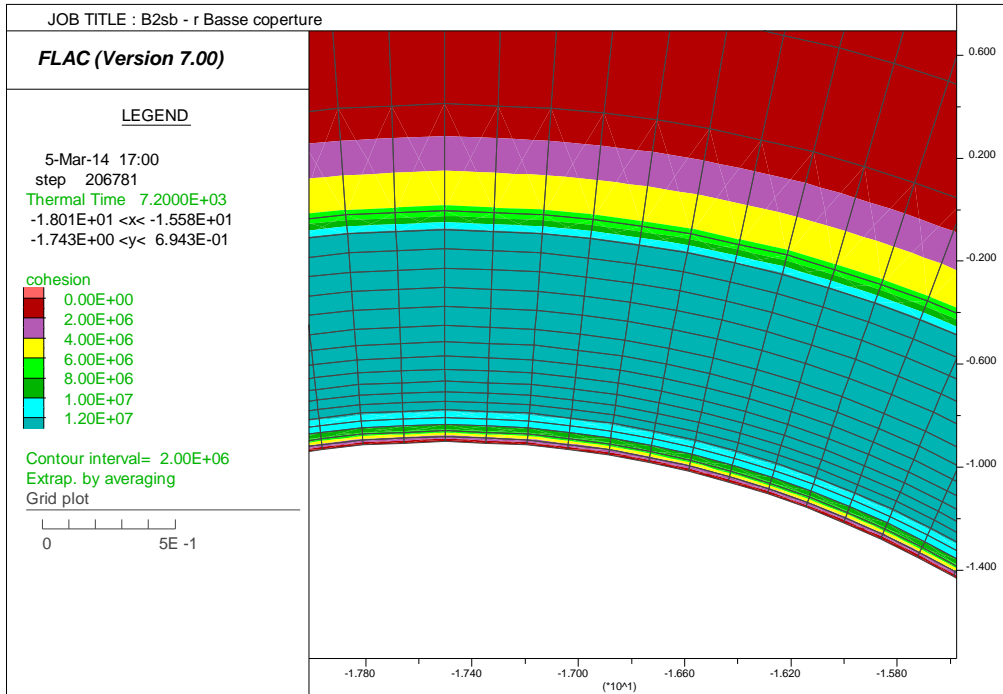


Figura 25 – Evoluzione della coesione c' – Curva EUREKA (120min)

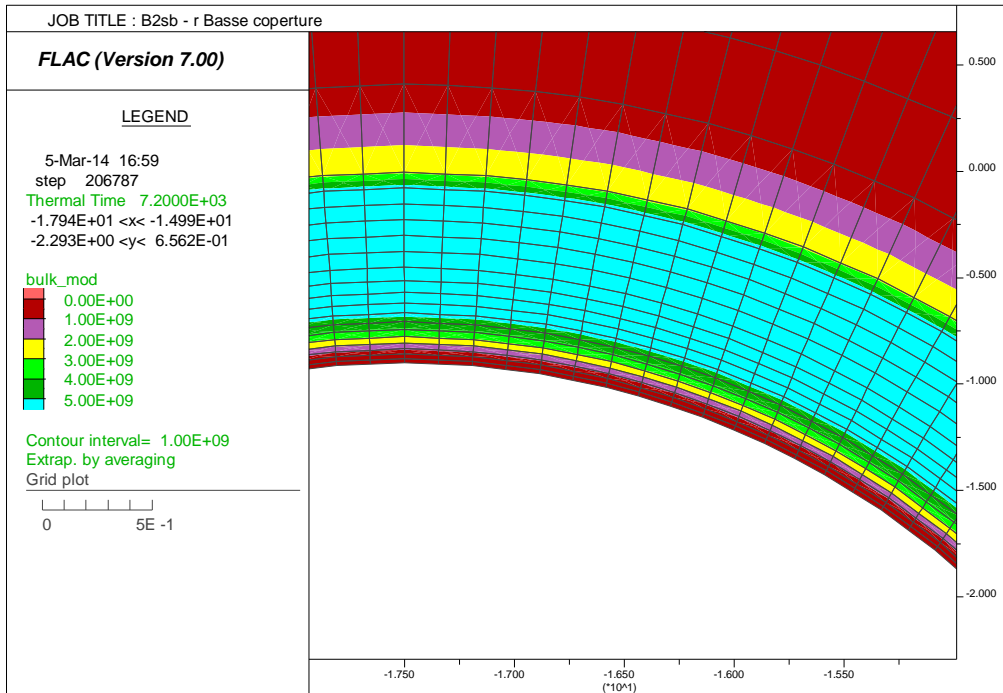


Figura 26 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076 (120min)

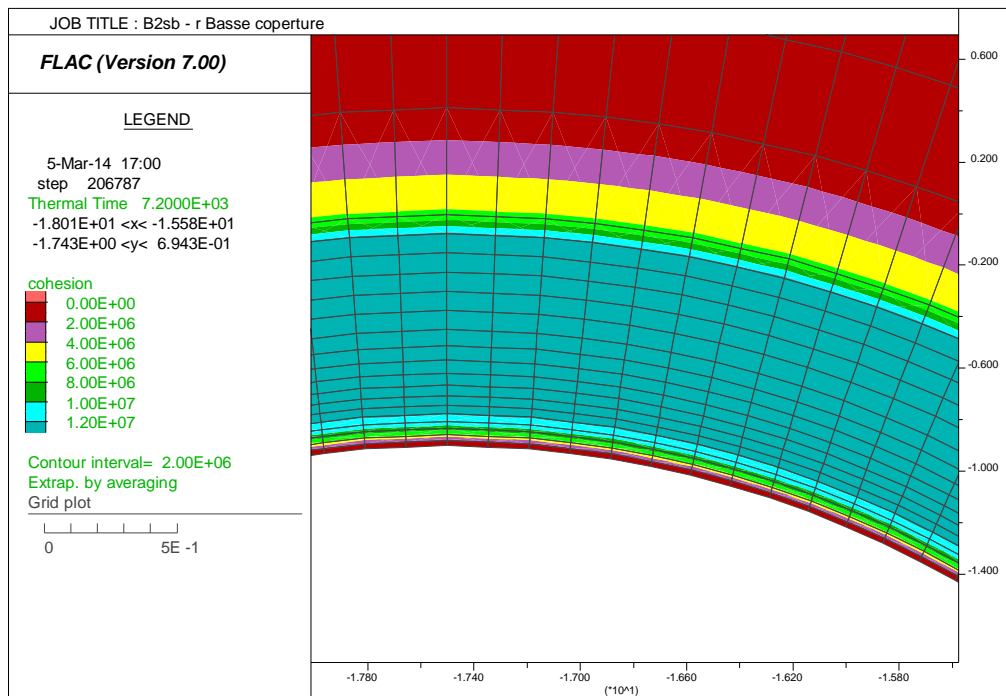


Figura 27 – Evoluzione della coesione c' – Curva UNI11076 (120min)

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.

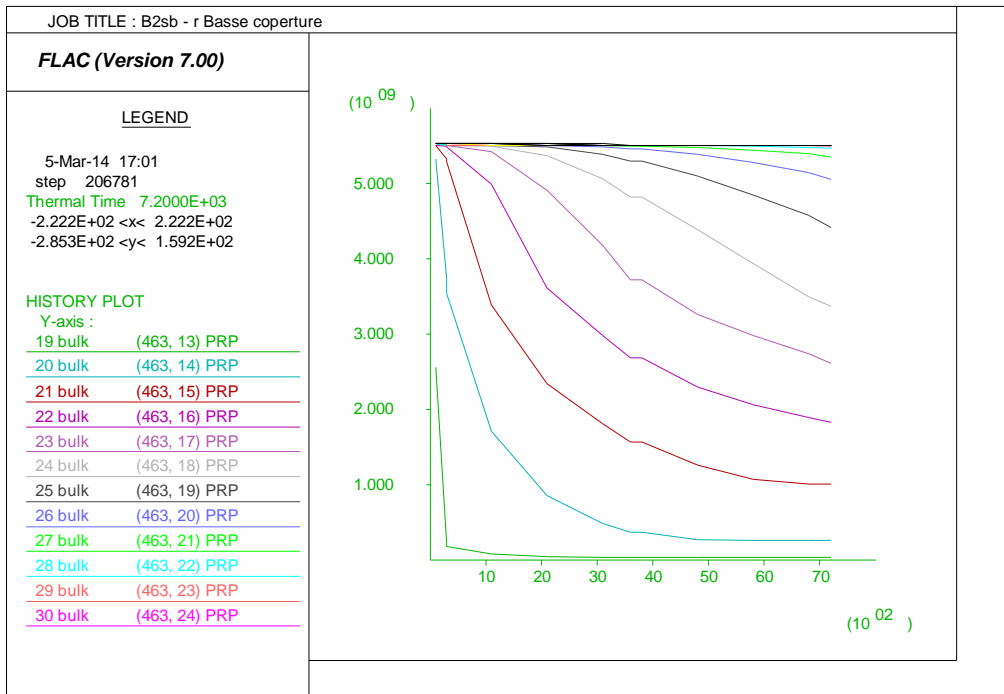


Figura 28 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA

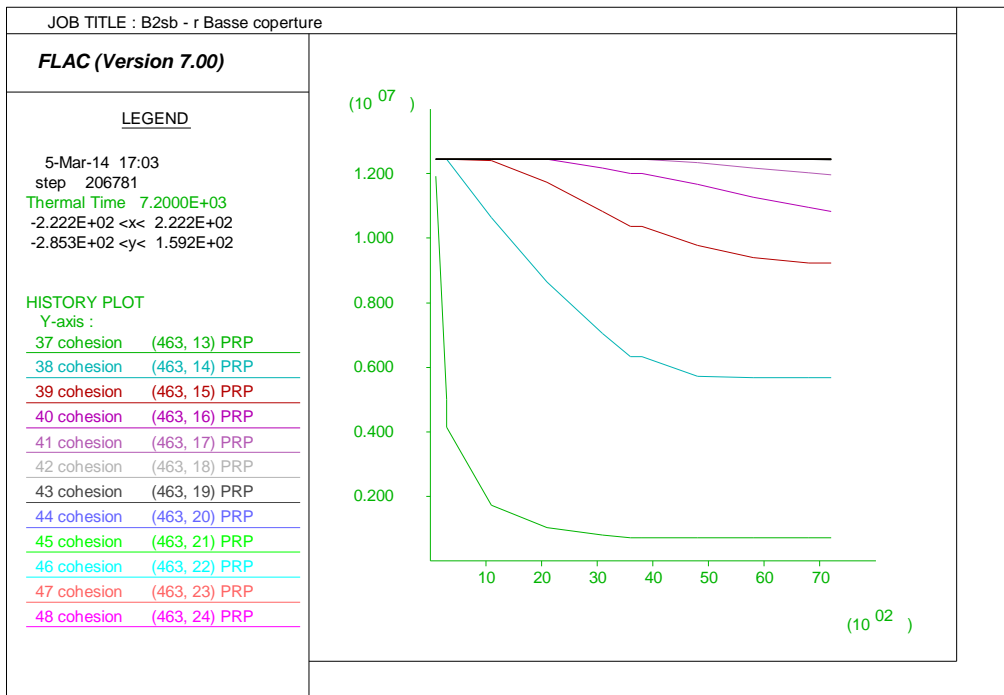


Figura 29 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva EUREKA

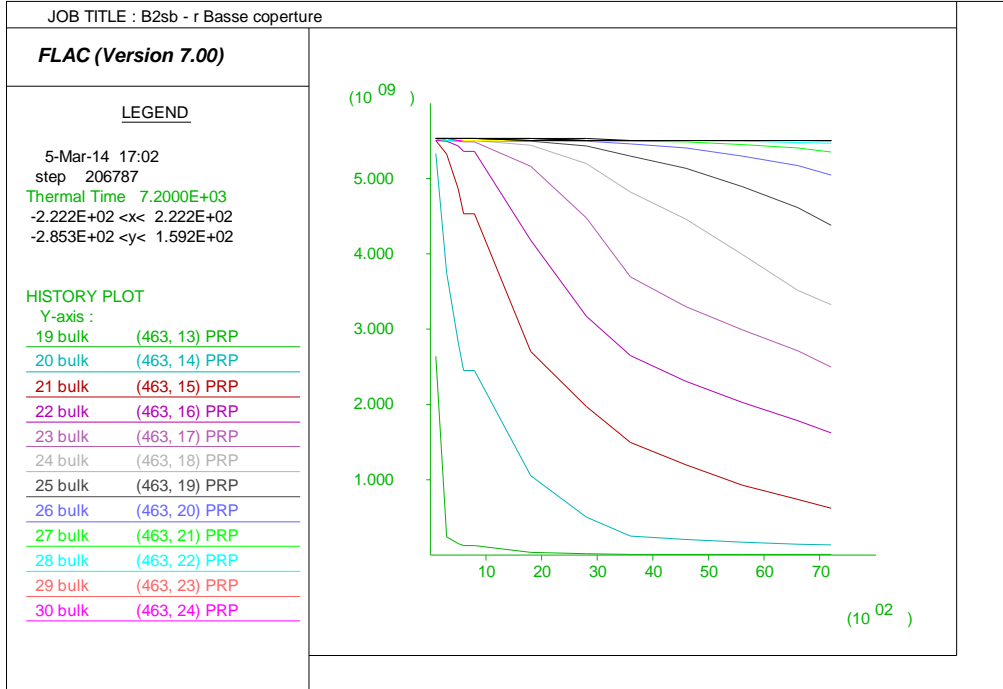


Figura 30 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva UNI11076

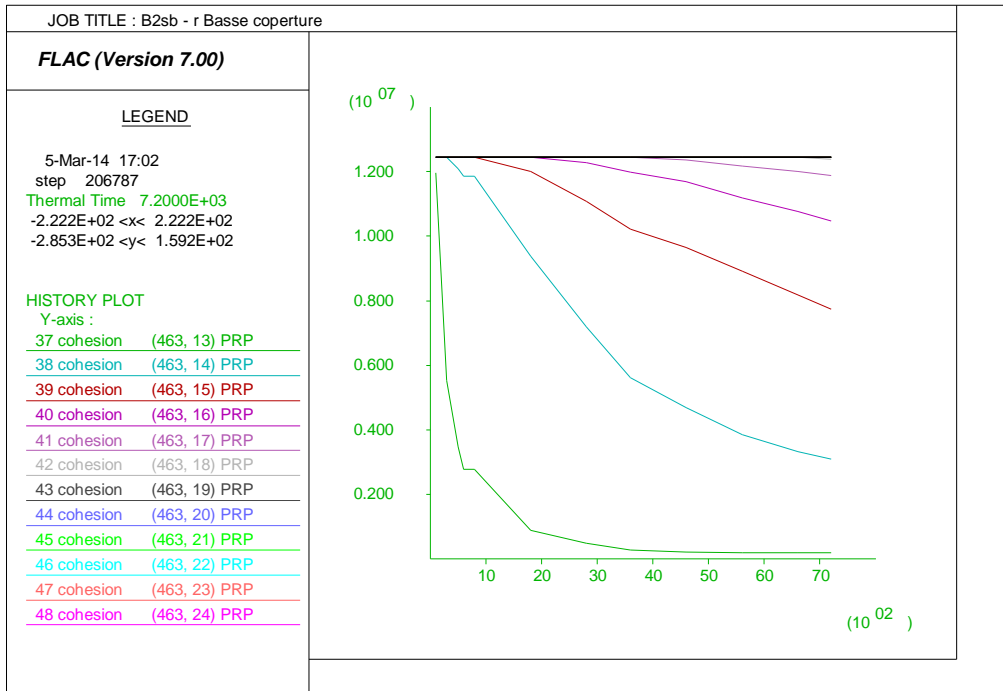


Figura 31 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva UNI11076

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00 Foglio 33 di 72

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 σ_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, lo sviluppo di azioni di trazione, seppur di limitata entità. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica combinata alle azioni geostatiche limitate dovute alle basse coperture in oggetto: l'entità piuttosto limitata dei carichi litostatici unita ai ridotti valori di modulo elastico della formazione attraversata non garantiscono 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.

Tale andamento degli sforzi all'interno della struttura è tipico delle analisi svolte a basse coperture in analoghi contesti geomeccanici; al contrario, alle alte coperture ed in materiali aventi moduli di rigidità più elevati, generalmente le forti compressioni all'interno della sezione dovute ai carichi litostatici non consentono lo sviluppo di trazioni in estradosso a seguito dell'applicazione della curva di 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 e mostrano un'espansione verso l'esterno (si sono azzerati gli spostamenti al termine delle fasi statiche al fine di cogliere unicamente le deformazioni dovute al carico di incendio). Unicamente il primo strato in intradosso (spessore 1.5cm circa) ha mostrato deformazioni più elevate e rivolte verso l'interno del cavo a causa della sostanziale perdita delle caratteristiche meccaniche, particolarmente evidenti nelle immagini sotto riportate.

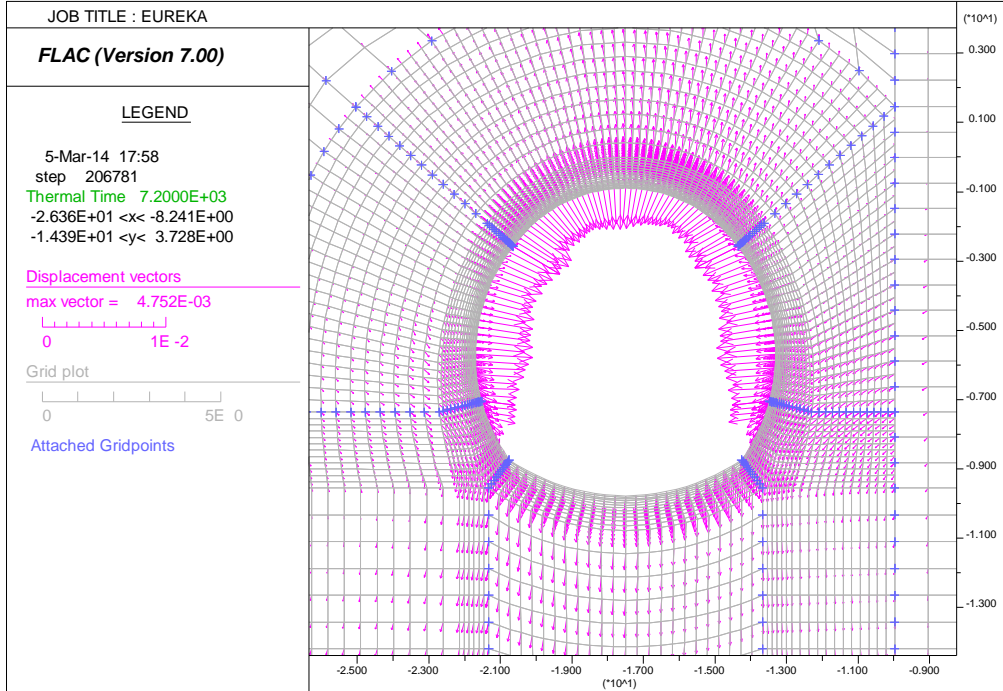


Figura 32 – Deformata – Curva EUREKA – t = 120 min

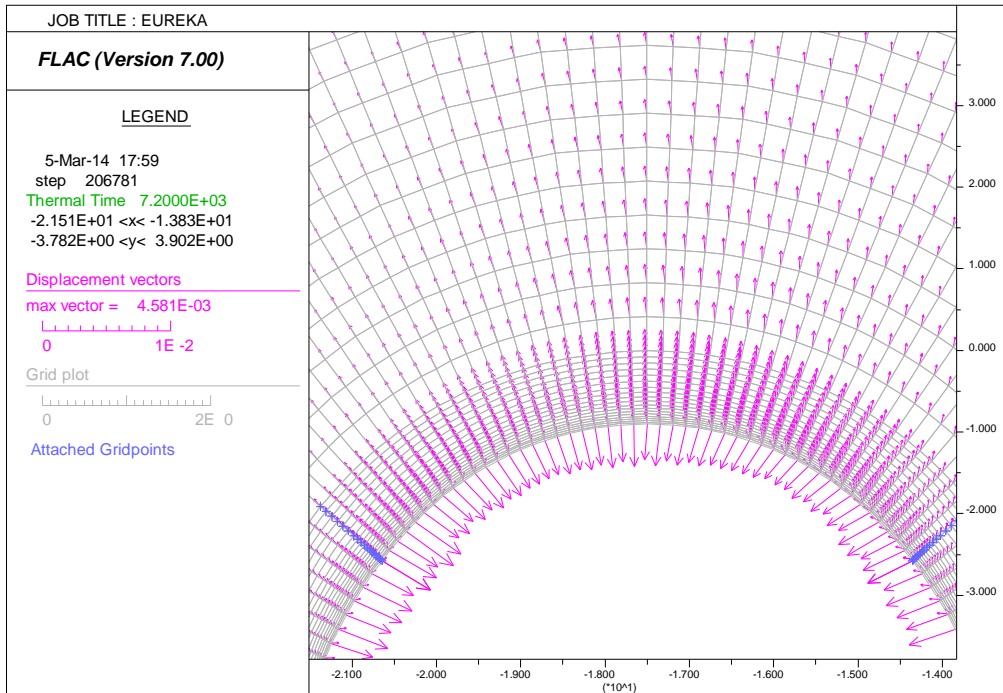


Figura 33 – Deformata (zoom in chiave calotta) – Curva EUREKA – t = 120 min

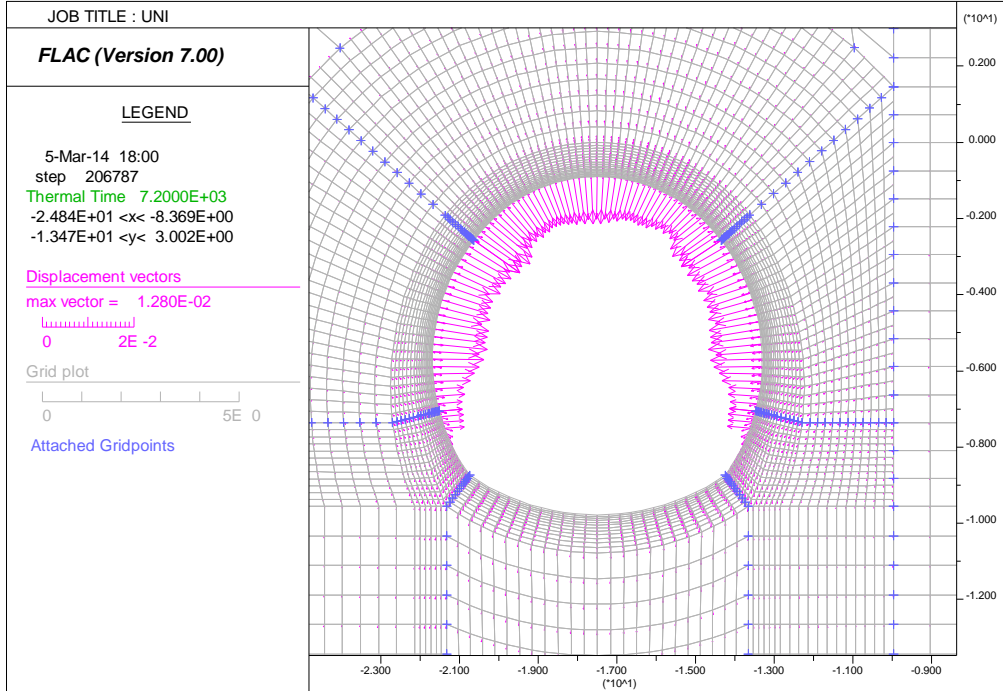


Figura 34 – Deformata – Curva UNI11076 – t = 120 min

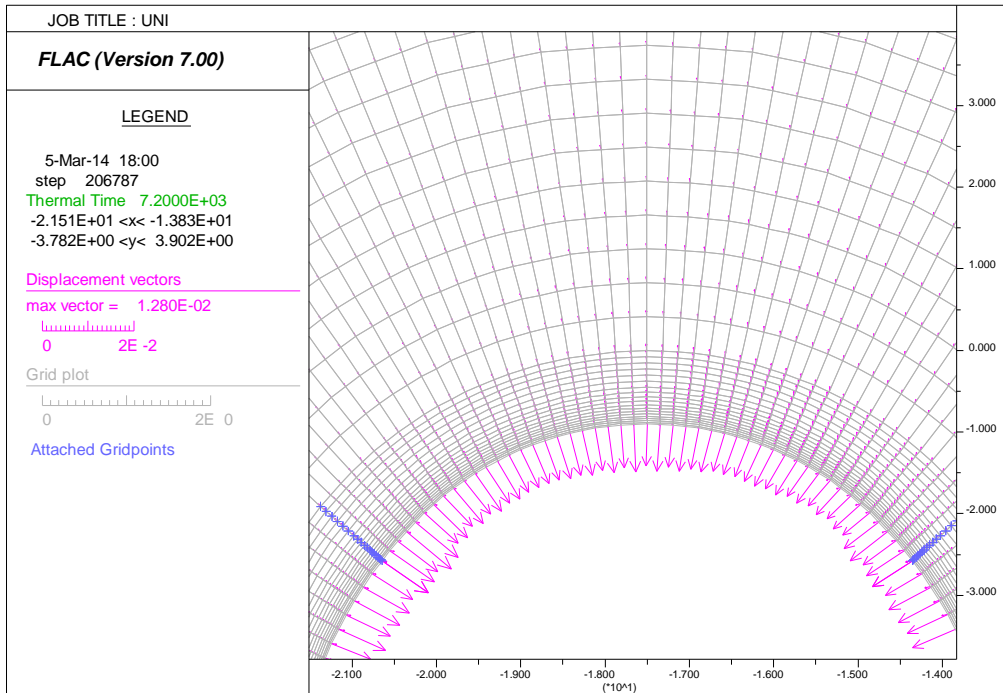


Figura 35 – Deformata (zoom in chiave calotta) – Curva UNI11076 – t = 120 min

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

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

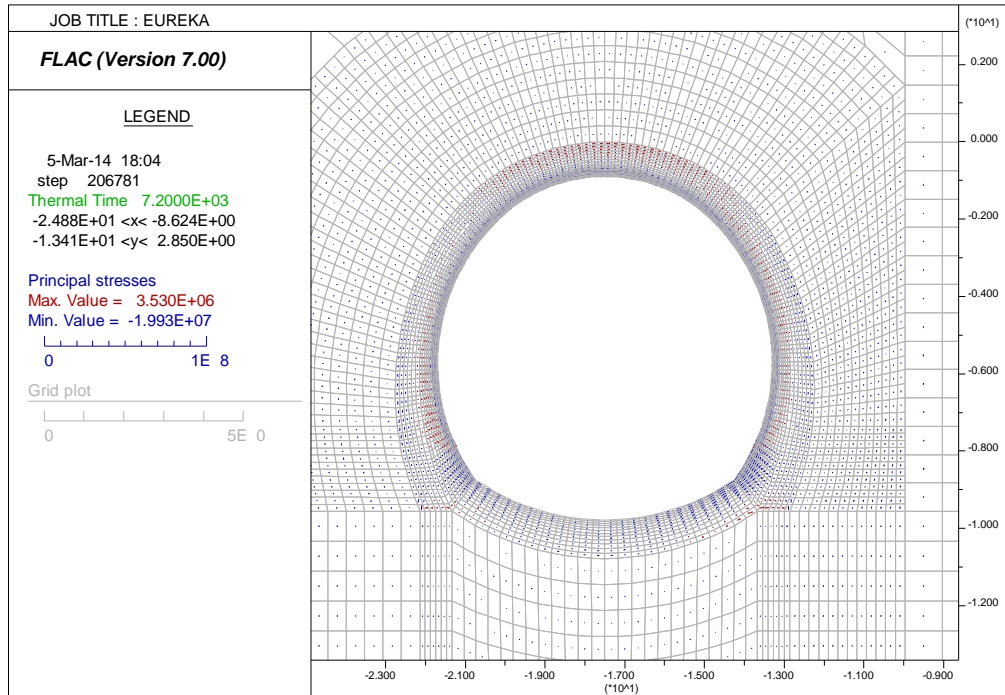


Figura 36 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

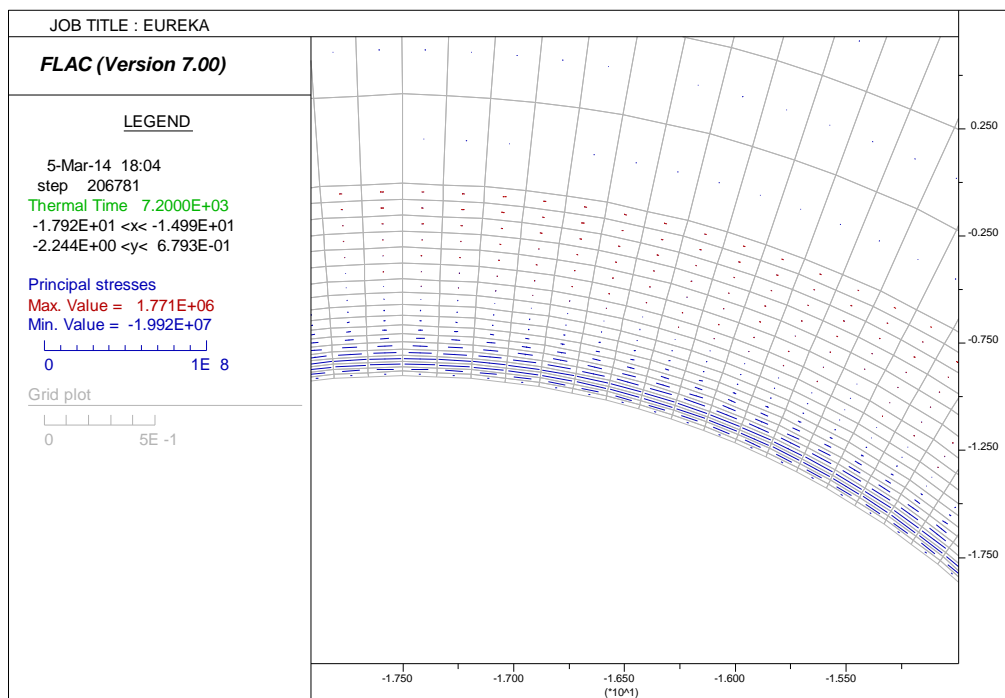


Figura 37 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

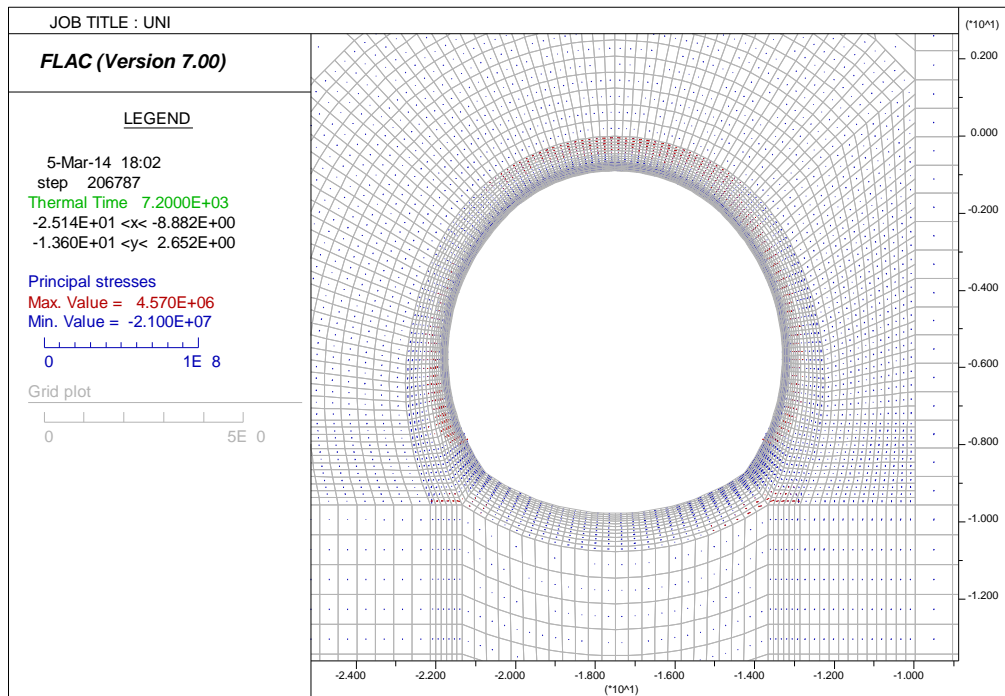


Figura 38 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

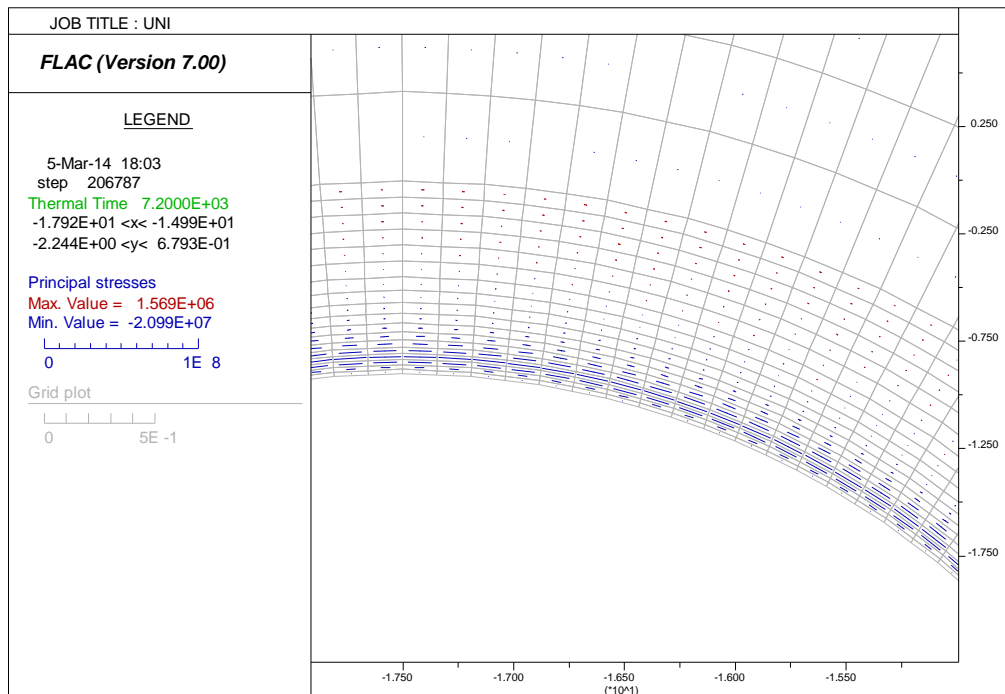


Figura 39 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

Nel seguito si mostrano le plasticizzazioni all'interno del materiale al minuto 120: come si nota i primi strati (inferiori ai 10cm) mostrano per entrambe le curve dei punti che hanno raggiunto la plasticizzazione negli istanti passati con una successiva redistribuzione degli sforzi nei settori più esterni.

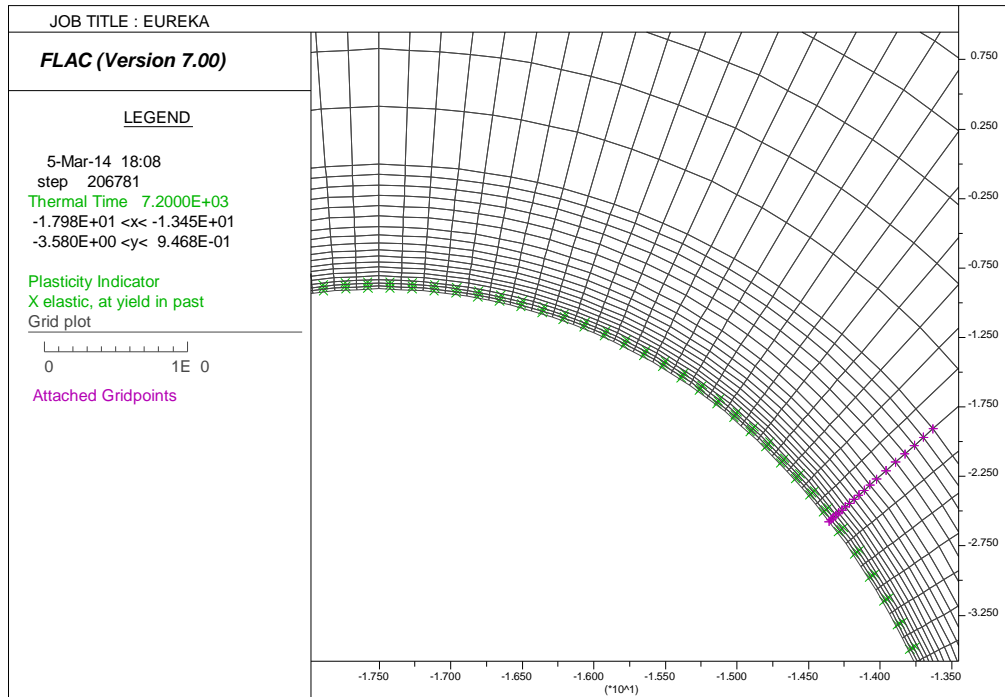


Figura 40 – Plasticizzazioni – Curva EUREKA – t = 120 min

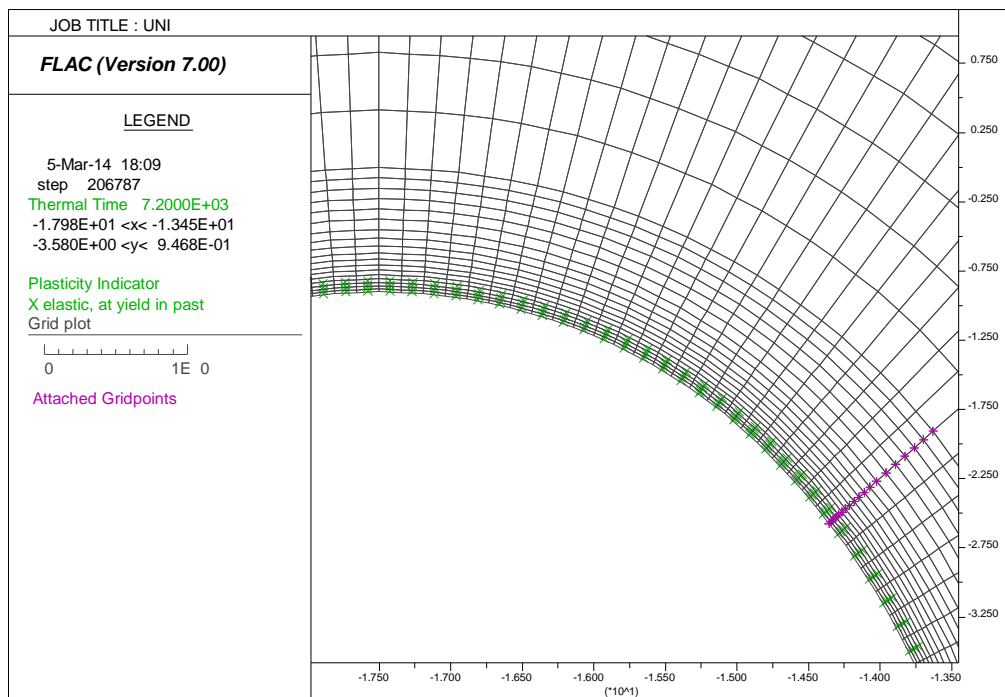


Figura 41 – Plasticizzazioni – Curva UNI11076 – t = 120 min

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 in chiave calotta. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a 120 minuti per entrambe le curve analizzate.

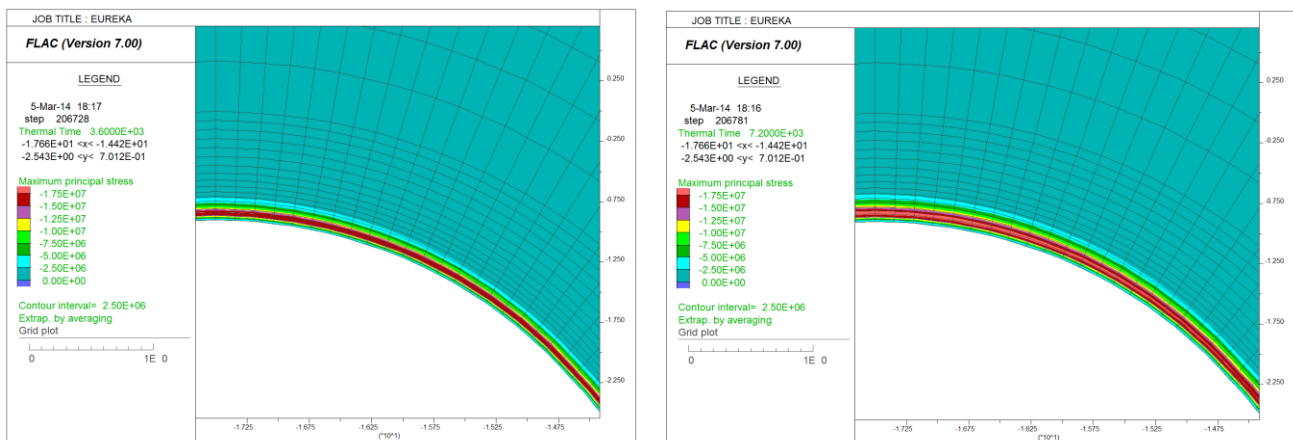


Figura 42 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 120 min

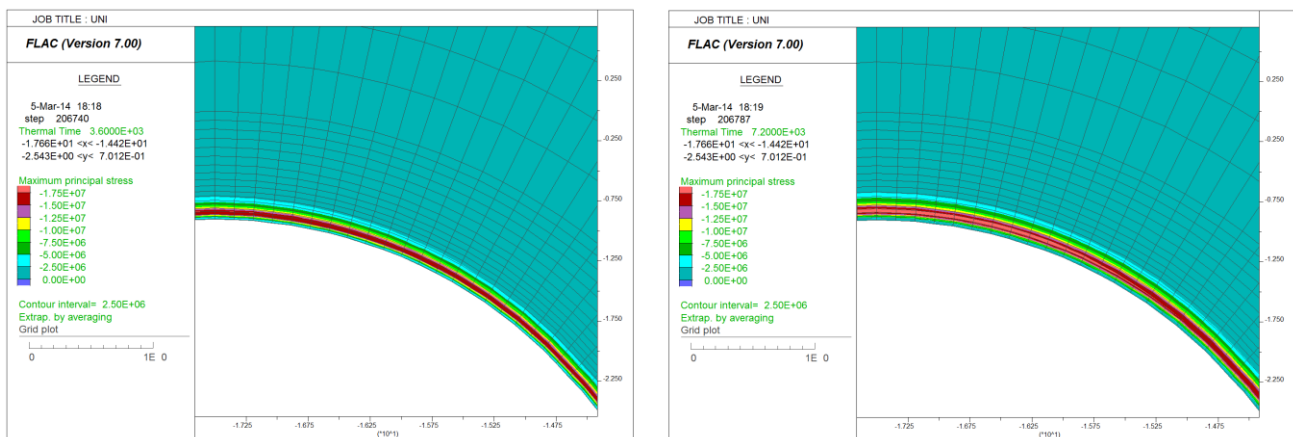


Figura 43 – Sigma 1 – Curva UNI11076 – t = 120 min

5.1.4. 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 dell'ordine di 2000 KN nella zona soggetta all'azione diretta dell'incendio con un andamento pressochè costante, mentre in prossimità dell'attacco delle murette si registrano i momenti massimi superiori a 900 KNm. 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).

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00 Foglio 40 di 72

Unicamente i valori flettenti massimi risultano leggermenti inferiori a quanto ottenuto dall'applicazione della curva "EUREKA".

In entrambi i casi è stata verificata la sezione maggiormente sollecitata nella zona di calotta, considerando a favore di sicurezza lo spessore minimo del rivestimento. I valori di sollecitazione adottati nelle verifiche sono riportati nella tabella seguente.

Curva	H _{calcolo}	N	M
[-]	[m]	[kN]	[kNm]
EUREKA	0.9	-1933	971
UNI	0.9	-1913	902

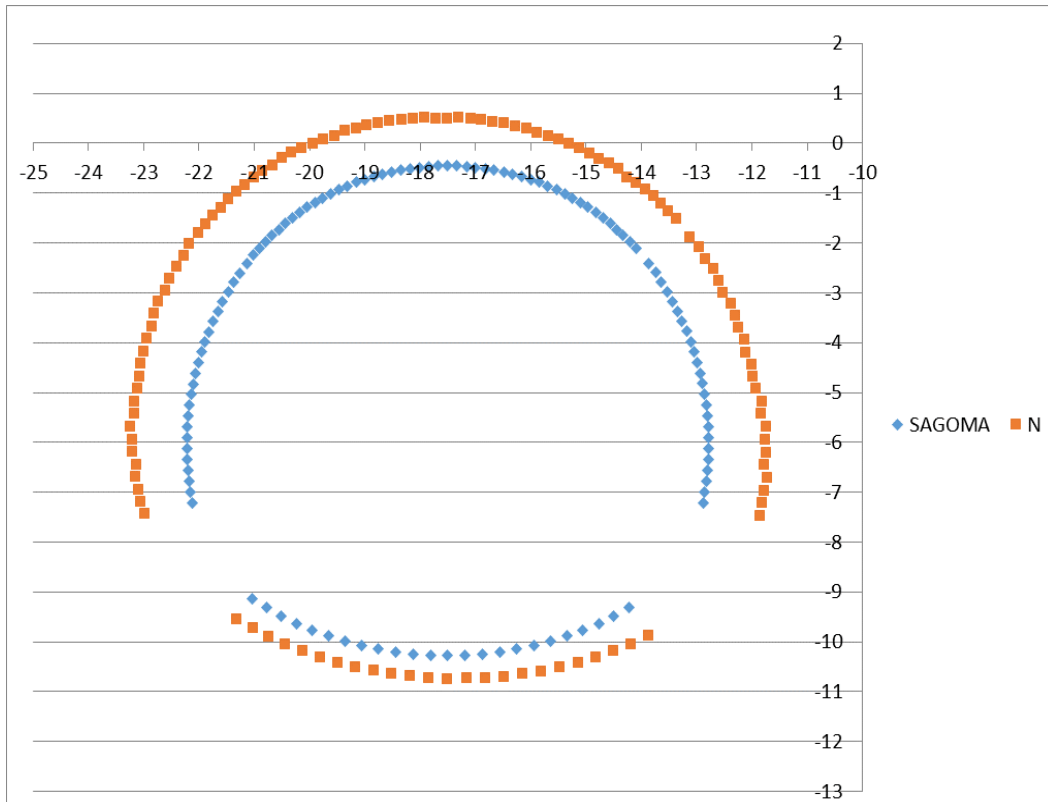


Figura 44 – Azione assiale – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=2000KN)

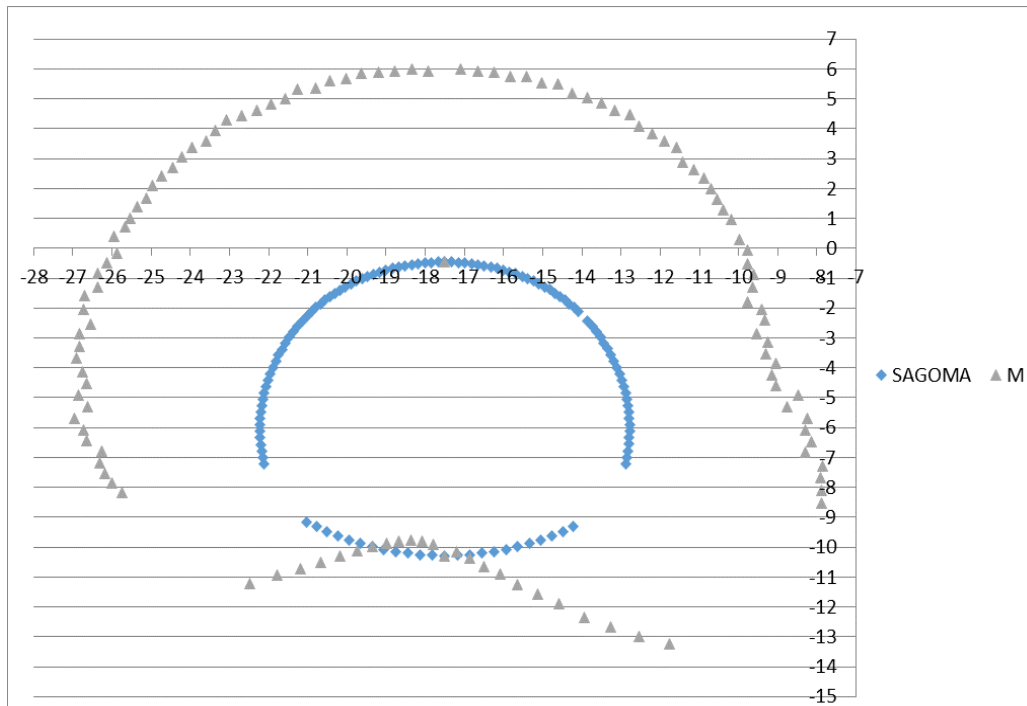


Figura 45 – Azione flettente – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=150KNm)

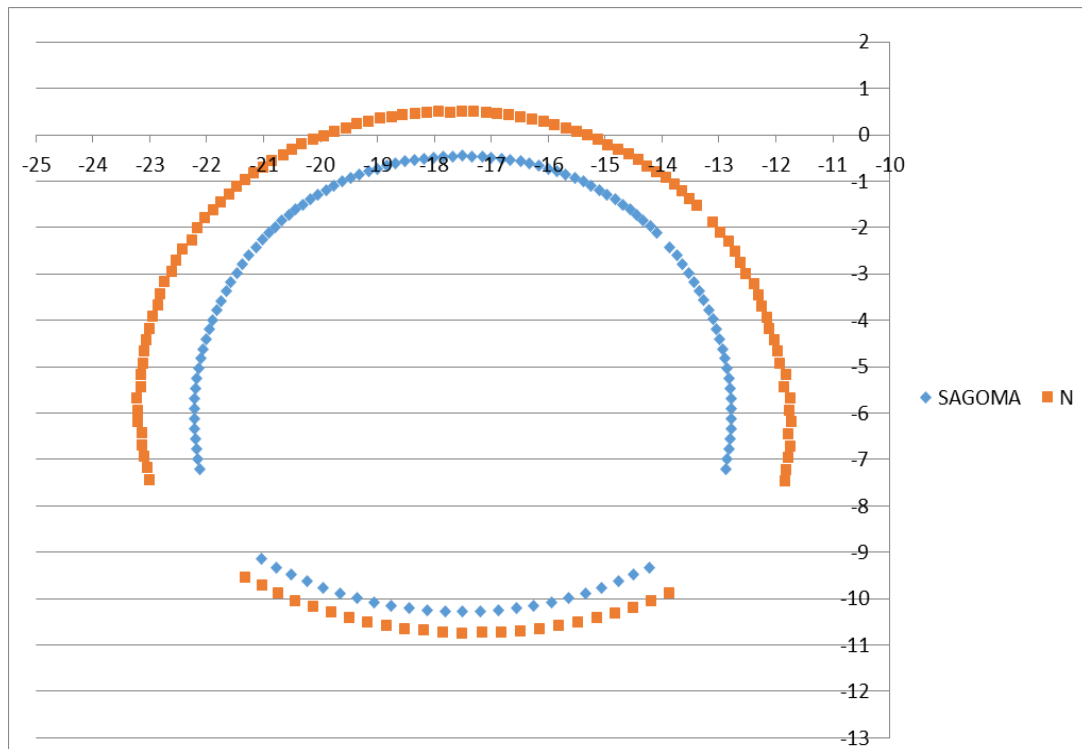


Figura 46 – Azione assiale – Curva UNI11076 – t = 120 min (Scala 1m=2000KN)

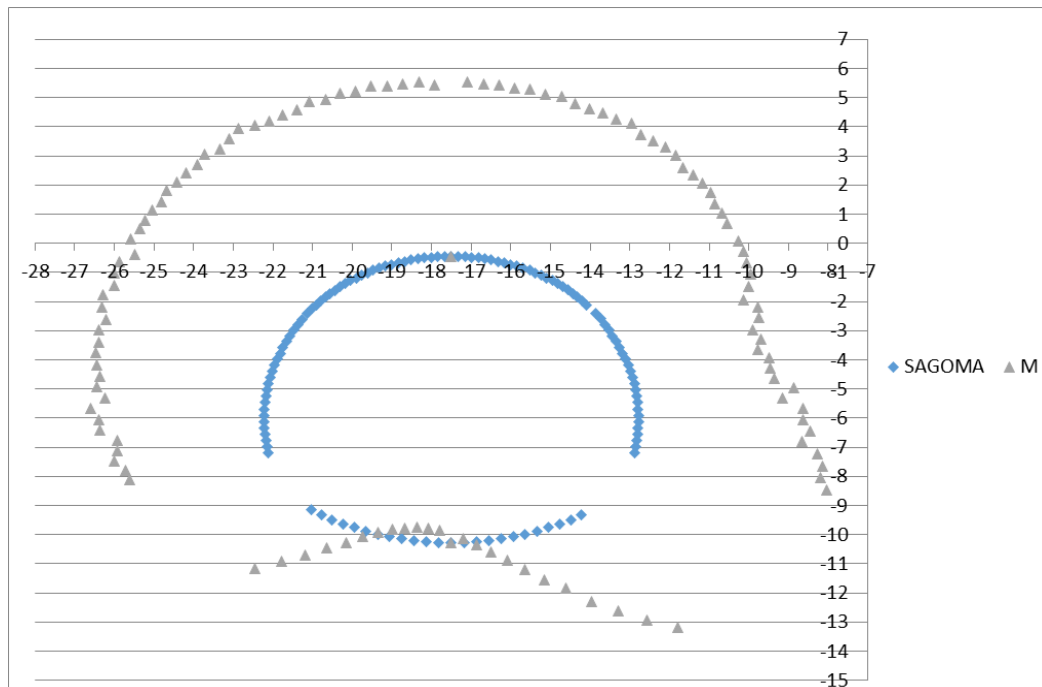


Figura 47 – Azione flettente – Curva UNI11076 – t = 120 min (Scala 1m=150KNm)

5.2. Sezione 2 –Sezione tipo C2sb-r - Basse coperture

La sezione tipo C2sb – r nel seguito presentata è stata analizzata nel peggior contesto geomeccanico presente nella tratta in esame per il quale tale sezione tipo dovrà essere applicata. Si sottolinea che la canna presente sul lato destro del modello (binario pari), scavata mediante scavo in meccanizzato, verrà realizzata successivamente al completamento della canna in tradizionale oggetto di analisi (WBS GN15X).

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 sensibili variazioni di temperatura.

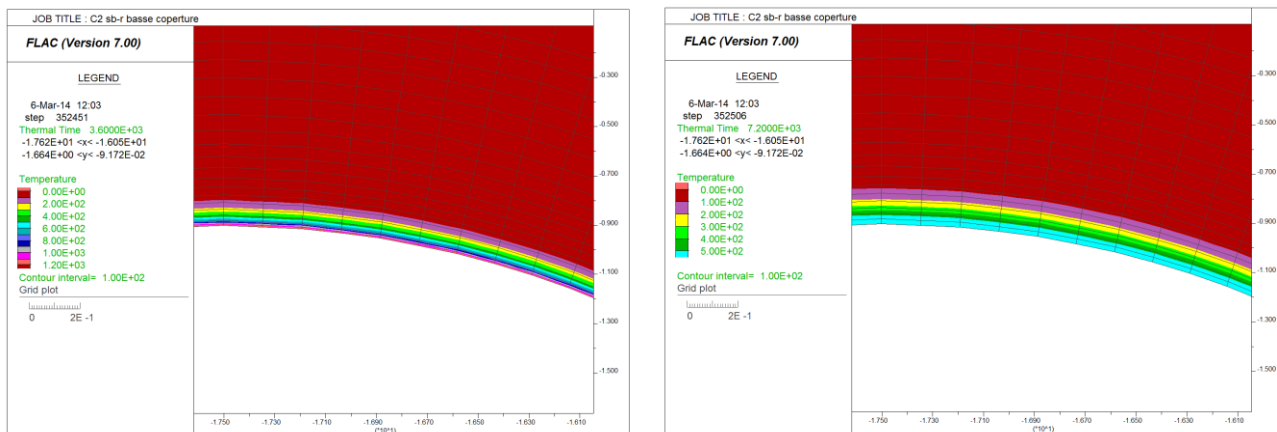


Figura 48 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA

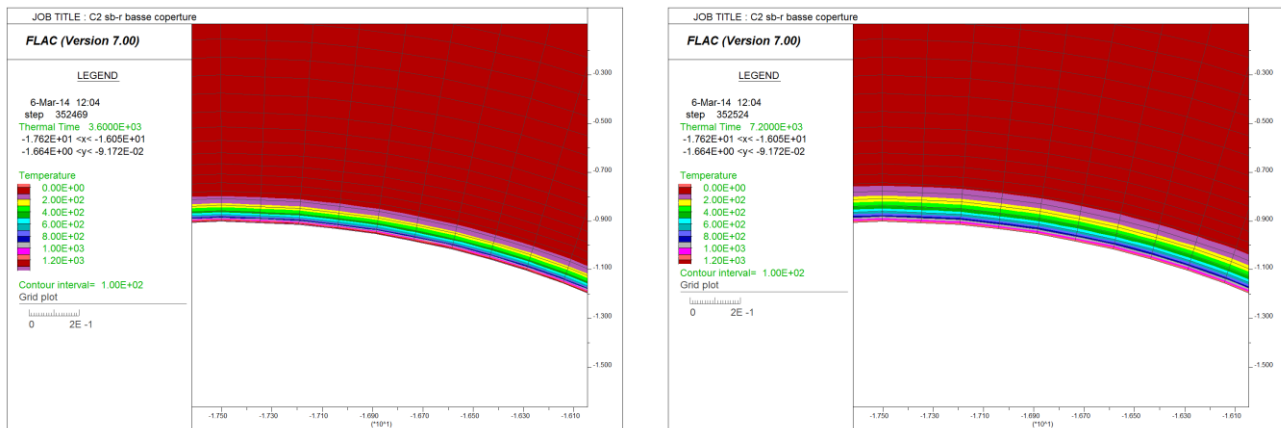


Figura 49 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva UNI11076

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. Si osservi come la discretizzazione sia molto buona, con il primo strato avente spessore paria circa 1.5cm.

PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA	PUNTO	DISTANZA
[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]
1	0	4	5.39	7	13.58	10	26.05	13	45
2	1.55	5	7.75	8	17.17	11	31.51	14	50.75
3	3.34	6	10.46	9	21.3	12	37.78		

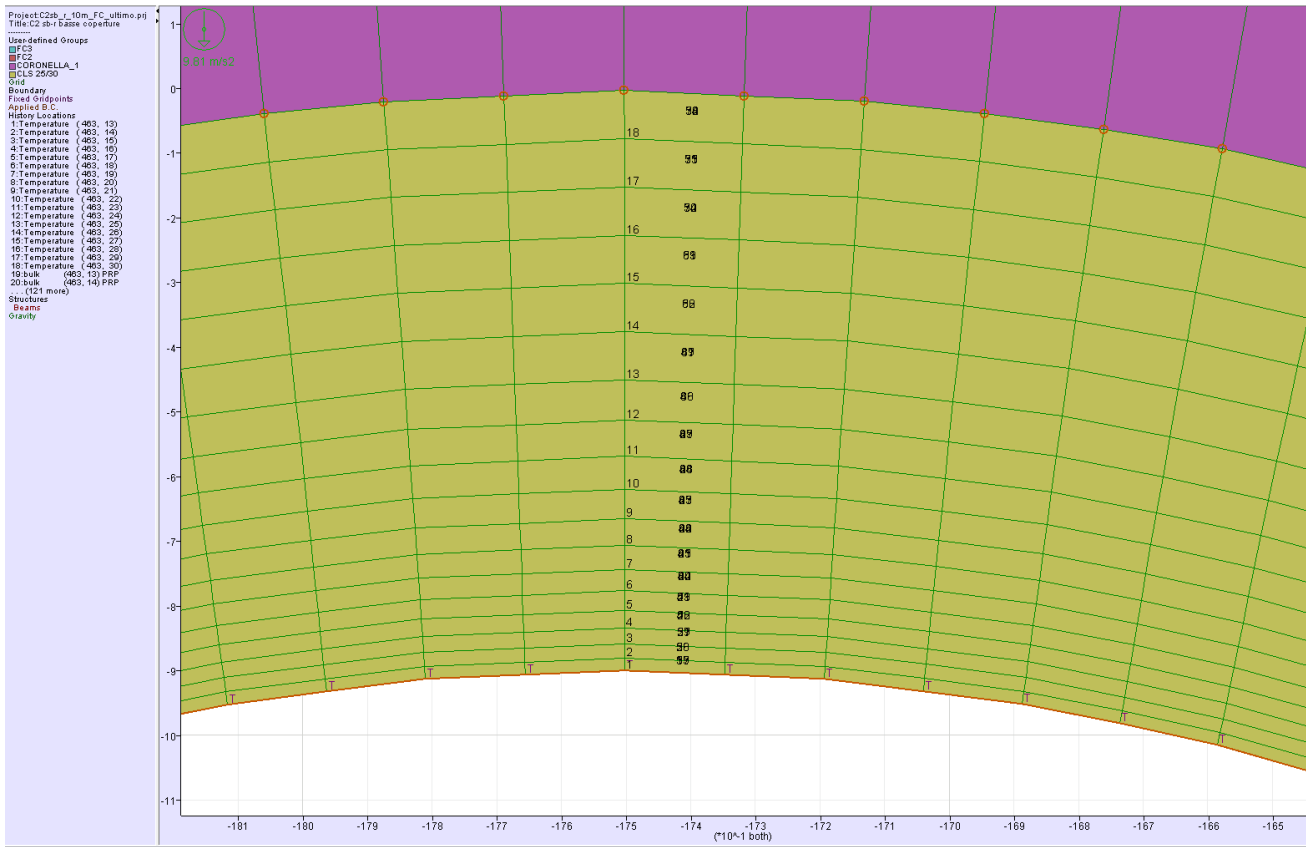


Figura 50 – Punti di controllo per l'evoluzione della temperatura e delle proprietà meccaniche

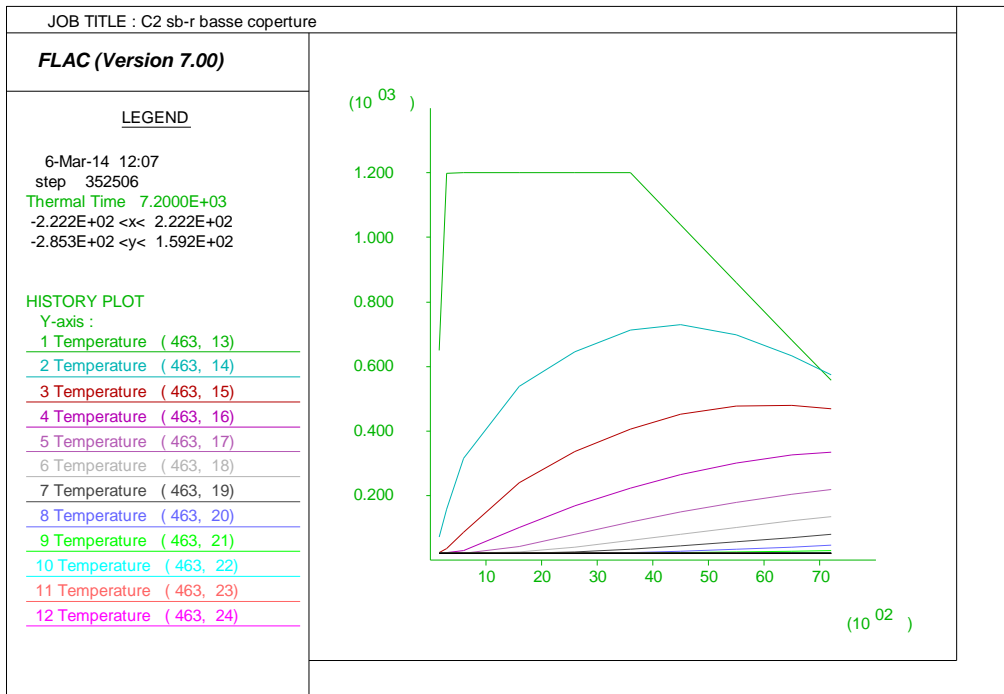


Figura 51 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA

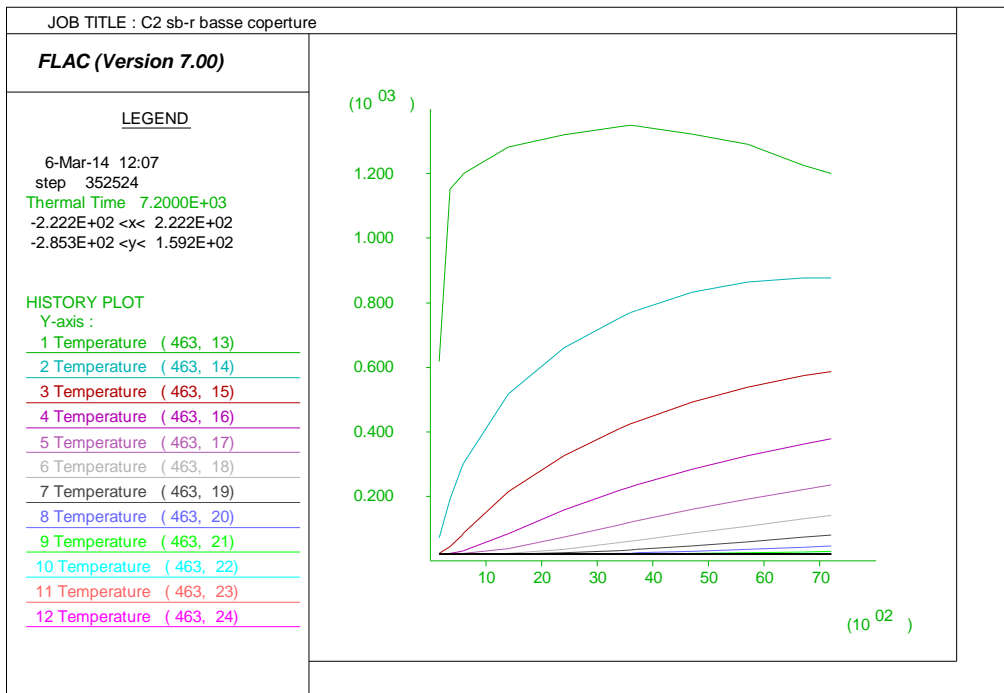


Figura 52 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva UNI11076

5.2.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo

Nel seguito verrà riportato l'andamento del modulo di compressibilità ("bulk") impiegato nel codice di calcolo FLAC. Tale modulo "K" risulta legato dalle seguente legge lineare al modulo elastico: l'andamento con la temperatura risulta pertanto 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 tale valore 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.

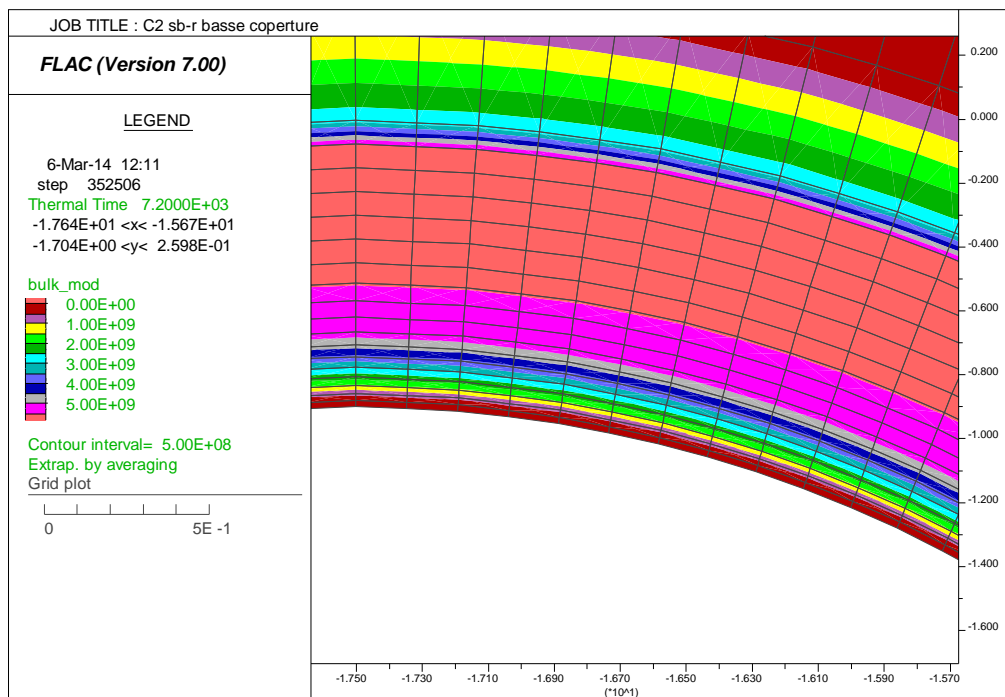


Figura 53 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA (120min)

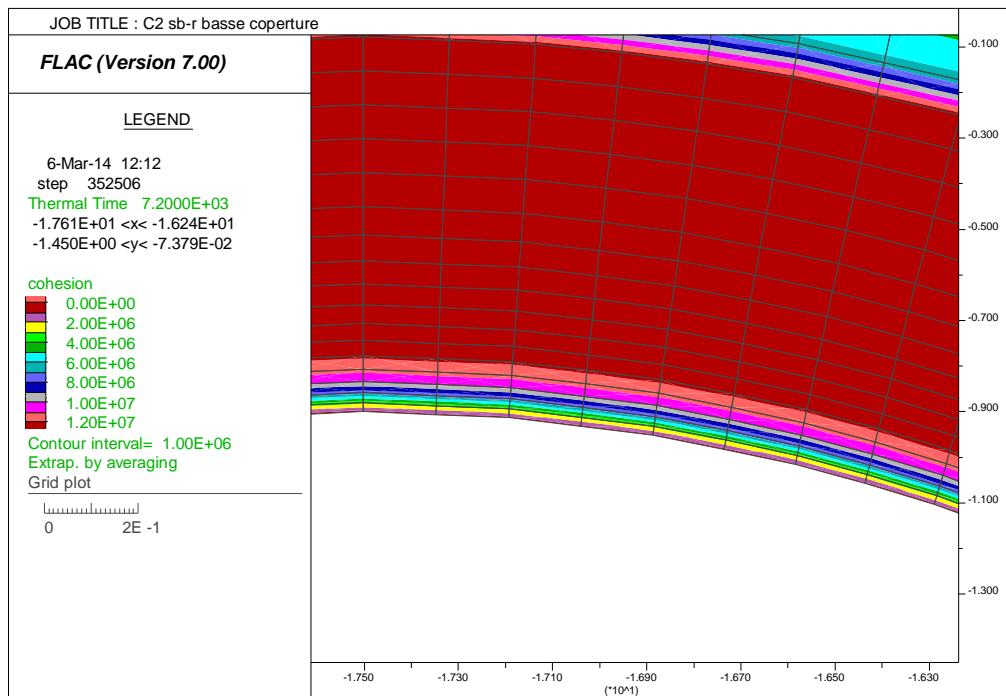


Figura 54 – Evoluzione della coesione c' – Curva EUREKA (120min)

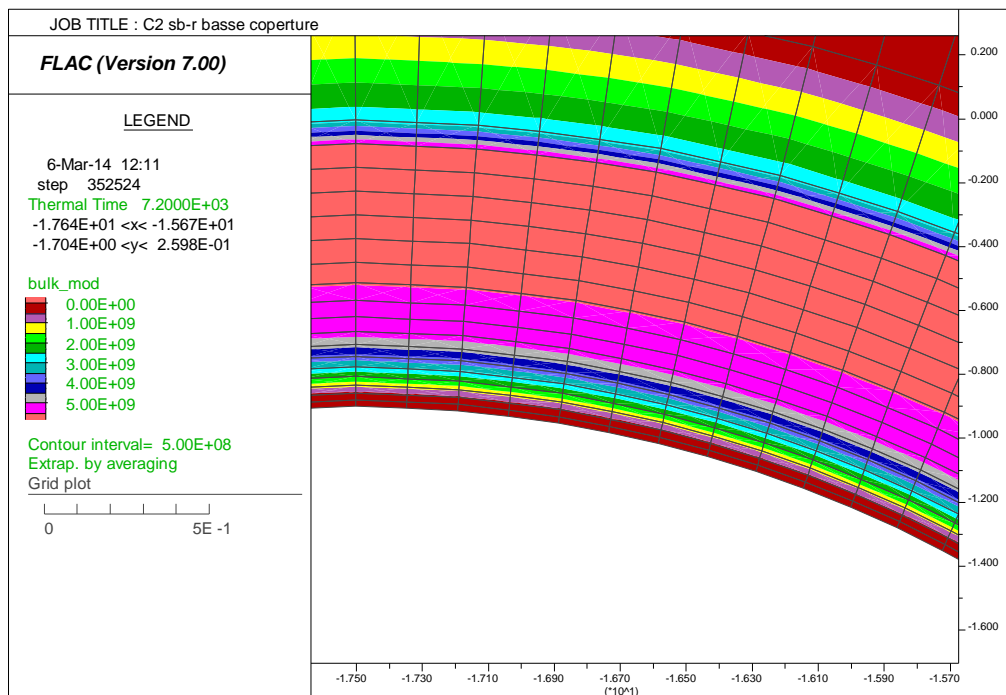


Figura 55 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076 (120min)

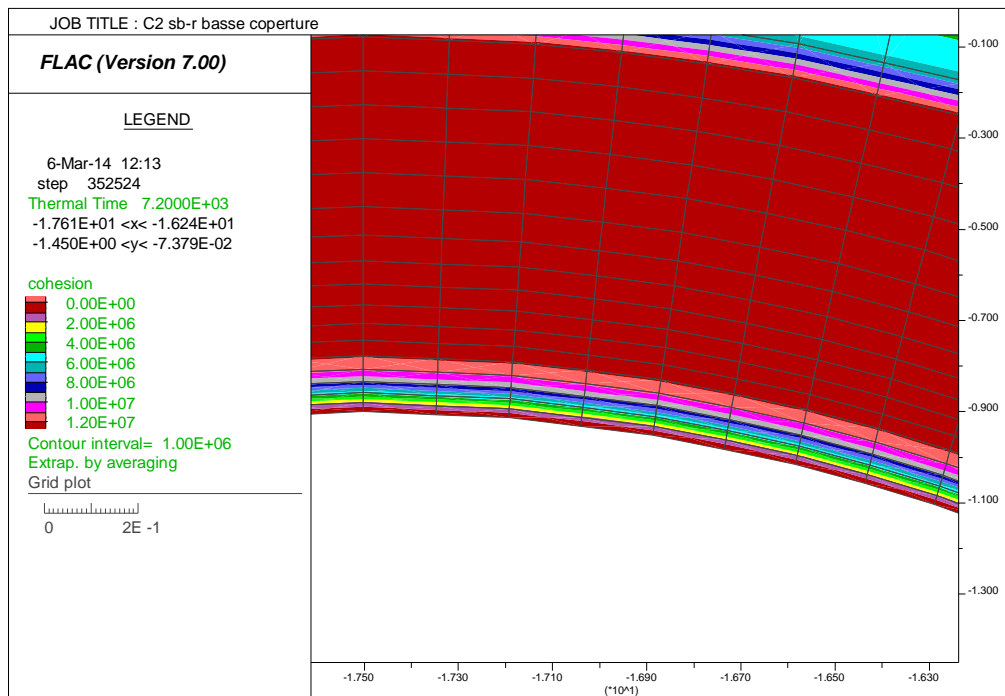


Figura 56 – Evoluzione della coesione c' – Curva UNI11076 (120min)

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.

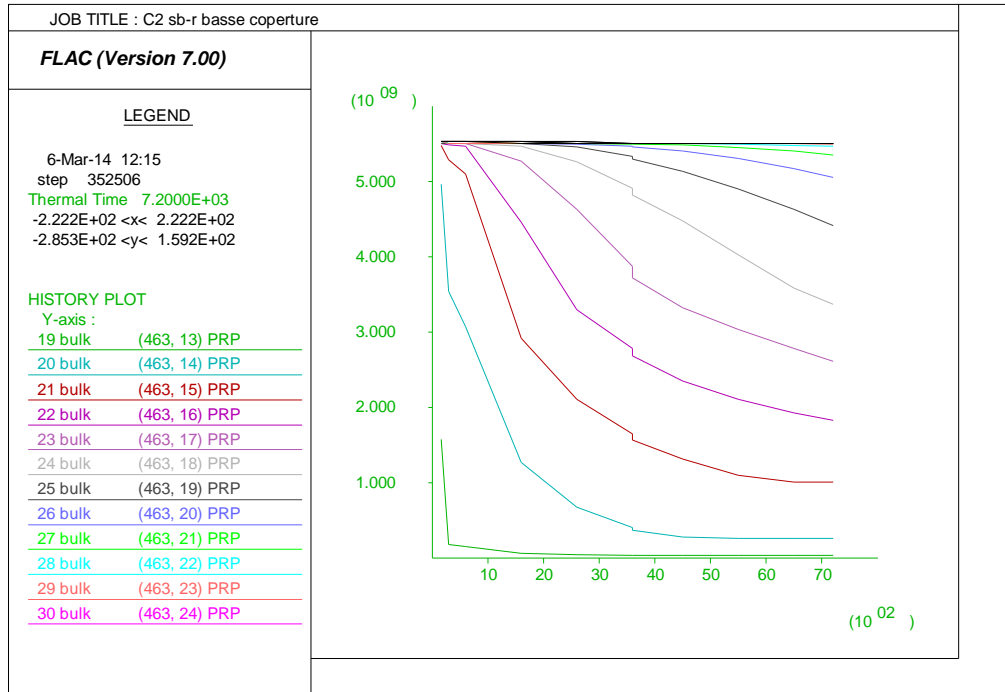


Figura 57 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA

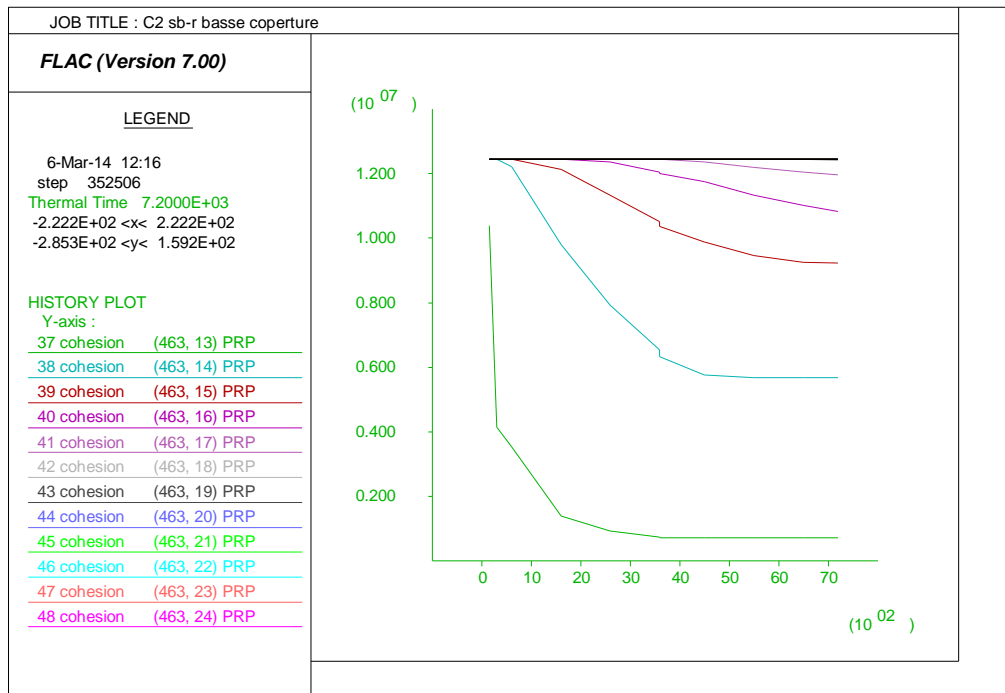


Figura 58 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva EUREKA

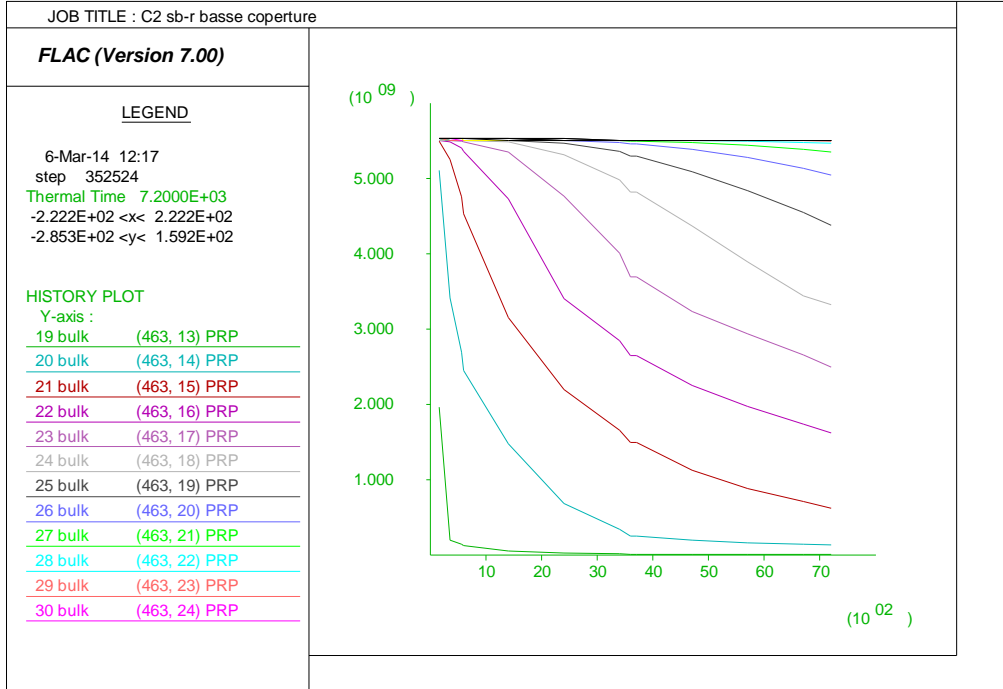


Figura 59 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva UNI11076

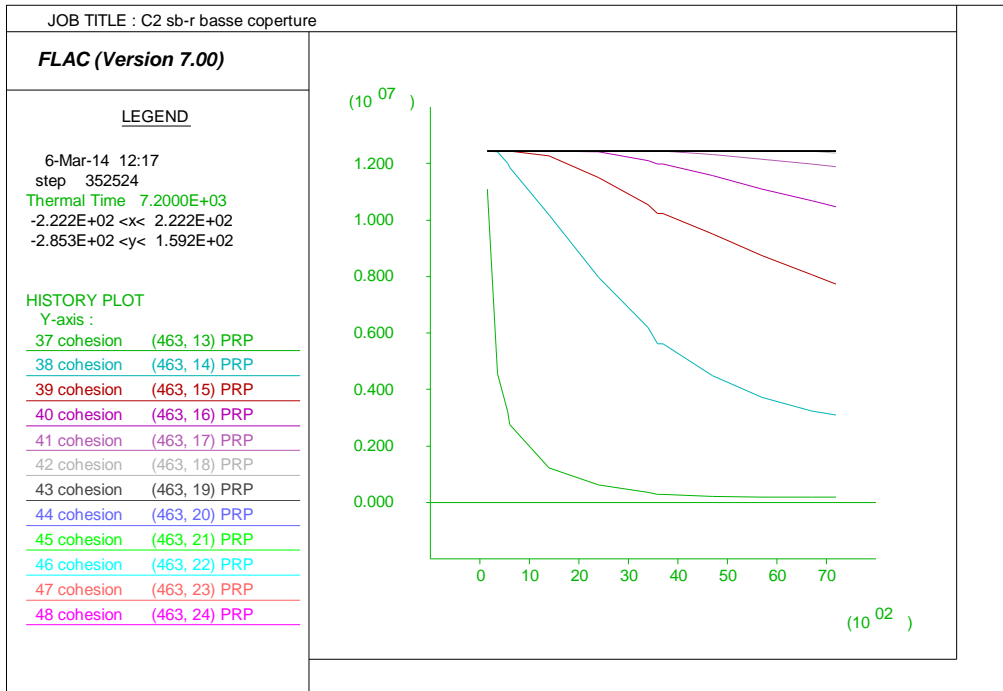


Figura 60 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva UNI11076

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00
	Foglio 52 di 72

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 σ_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, lo sviluppo di azioni di trazione, seppur di limitata entità. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica combinata alle azioni geostatiche limitate dovute alle basse coperture in oggetto: l'entità piuttosto limitata dei carichi litostatici unita ai ridotti valori di modulo elastico della formazione attraversata non garantiscono 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.

Tale andamento degli sforzi all'interno della struttura è tipico delle analisi svolte a basse coperture in analoghi contesti geomeccanici; al contrario, alle alte coperture ed in materiali aventi moduli di rigidità più elevati, generalmente le forti compressioni all'interno della sezione dovute ai carichi litostatici non consentono lo sviluppo di trazioni in estradosso a seguito dell'applicazione della curva di incendio. Si noti inoltre come nel caso considerato le trazioni in estradosso agenti sul rivestimento definitivo risultano ancor più evidenti di quanto non evidenziato dalla prima sezione di calcolo analizzata.

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 e mostrano un'espansione verso l'esterno (si sono azzerati gli spostamenti al termine delle fasi statiche al fine di cogliere unicamente le deformazioni dovute al carico di incendio). Unicamente il primo strato in intradosso (spessore 1.5cm circa) ha mostrato deformazioni di ordine pluricentimetrico e rivolte verso l'interno del cavo a causa della sostanziale perdita delle caratteristiche meccaniche, particolarmente evidenti nelle immagini sotto riportate.

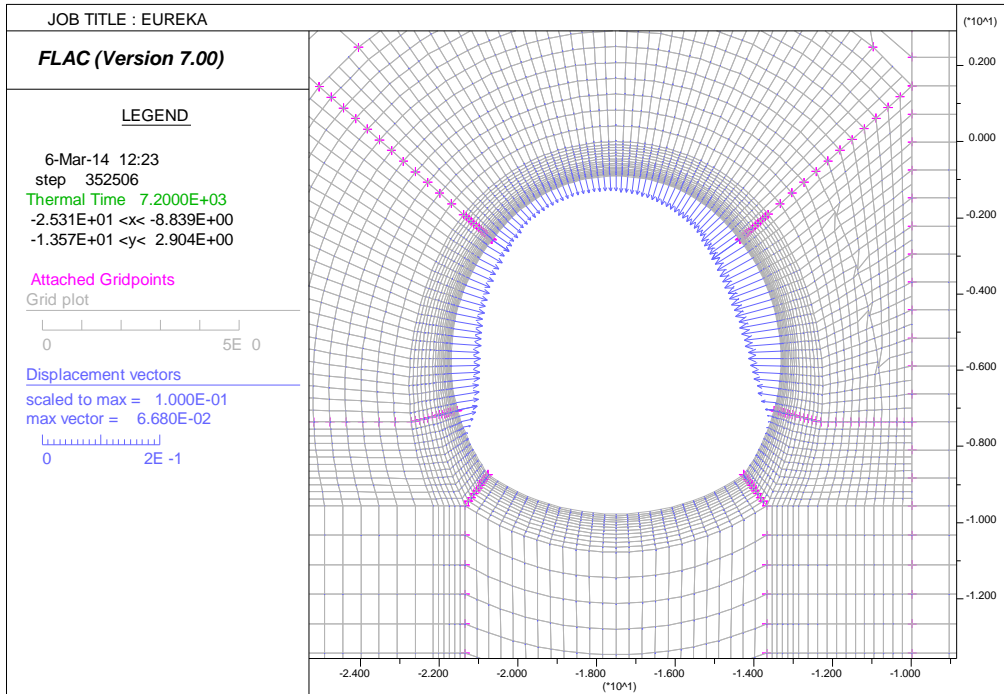


Figura 61 – Deformata – Curva EUREKA – t = 120 min

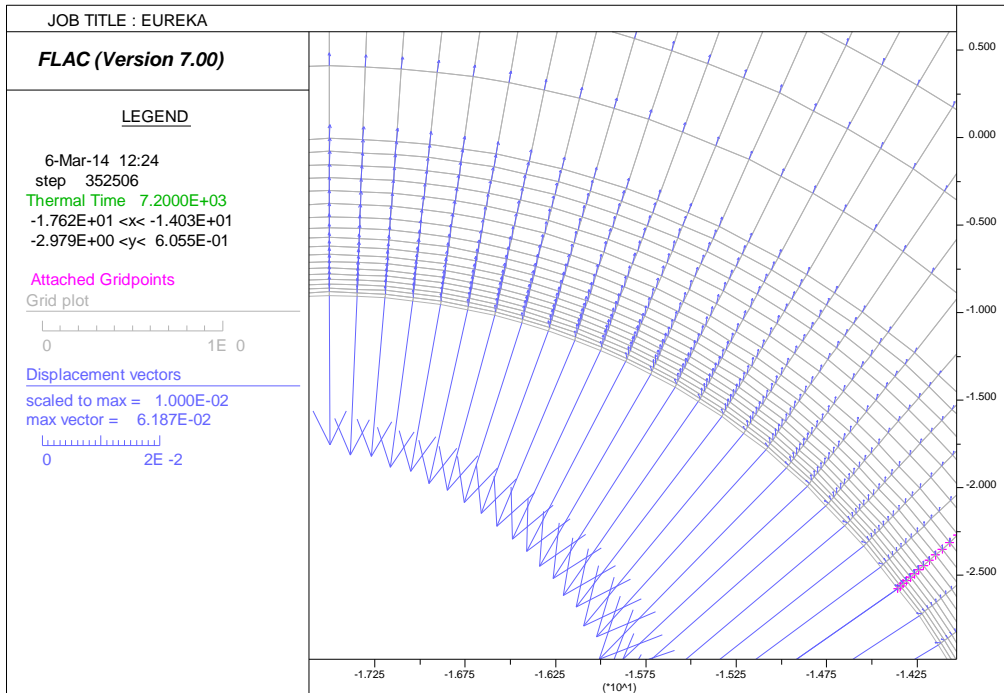


Figura 62 – Deformata (zoom in chiave calotta) – Curva EUREKA – t = 120 min

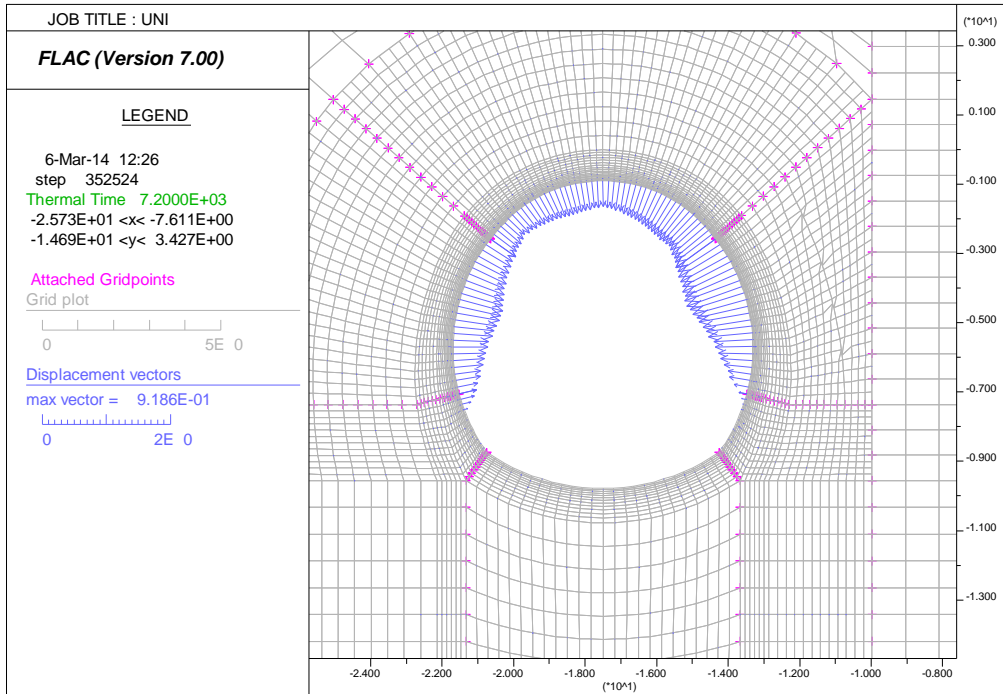


Figura 63 – Deformata – Curva UNI11076 – t = 120 min

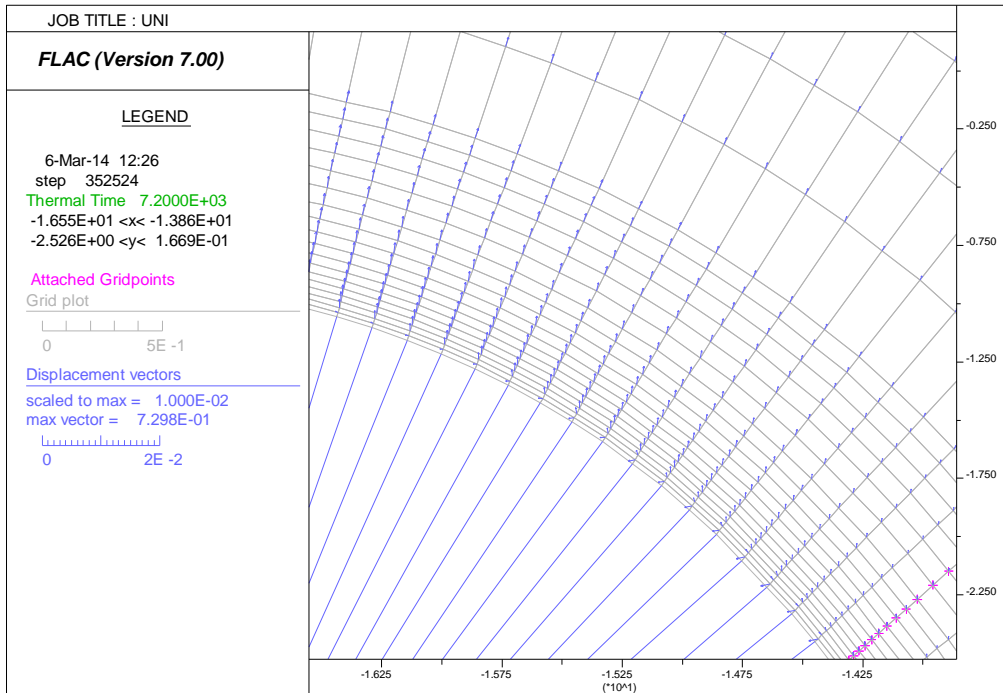


Figura 64 – Deformata (zoom in chiave calotta) – Curva UNI11076 – t = 120 min

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

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

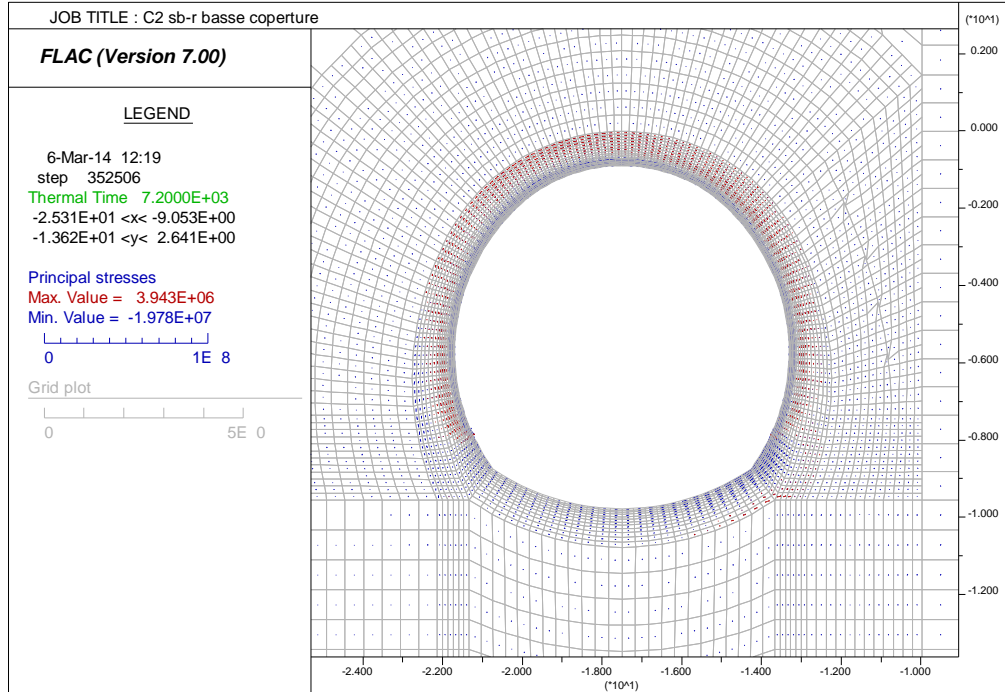


Figura 65 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

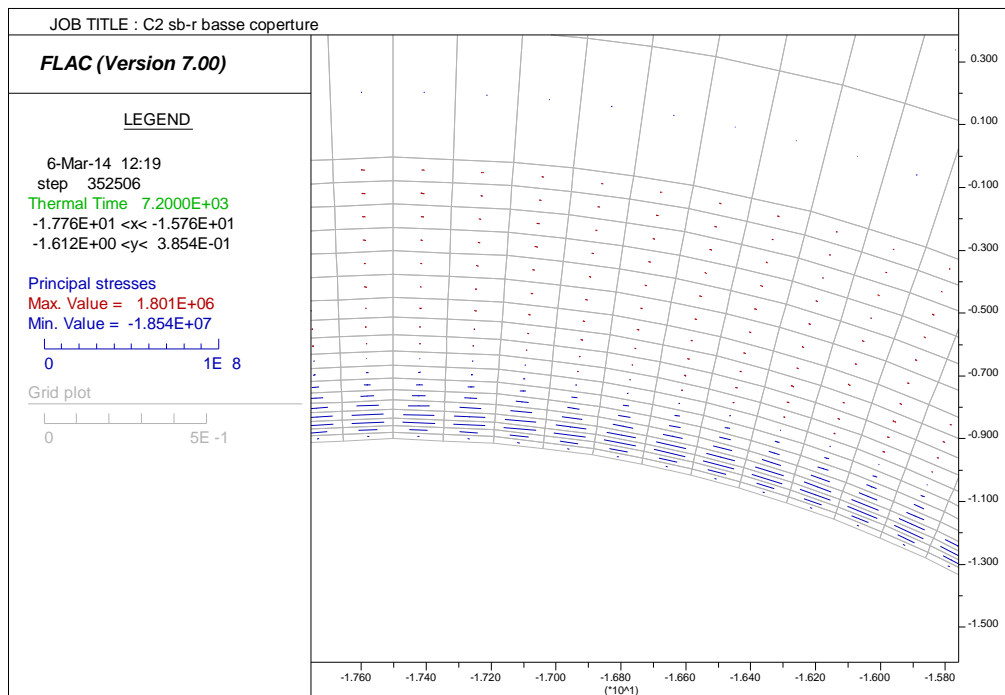


Figura 66 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

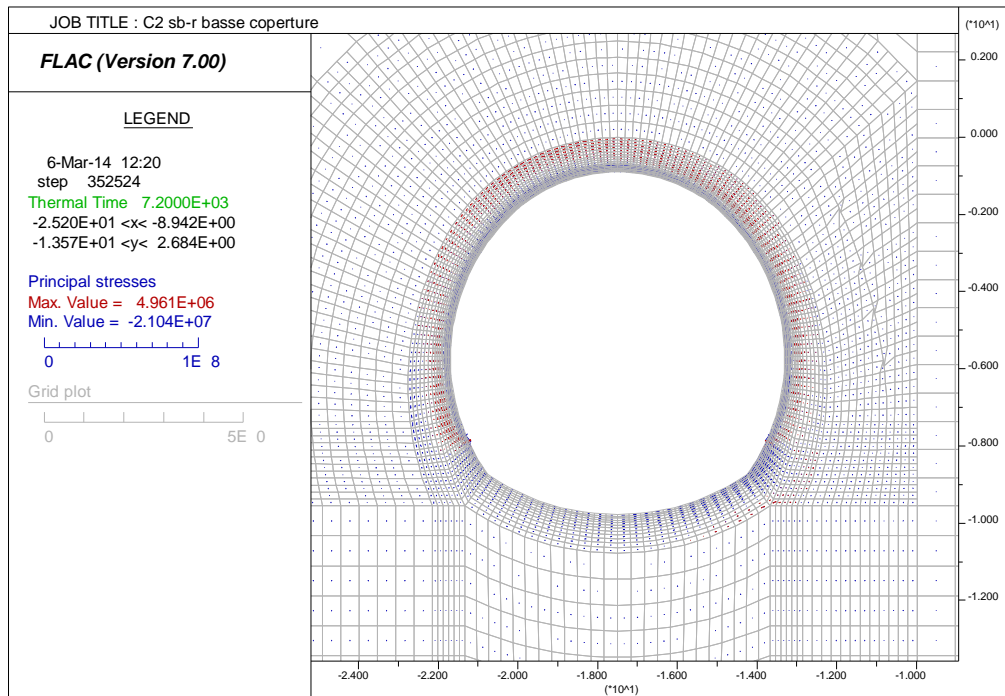


Figura 67 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

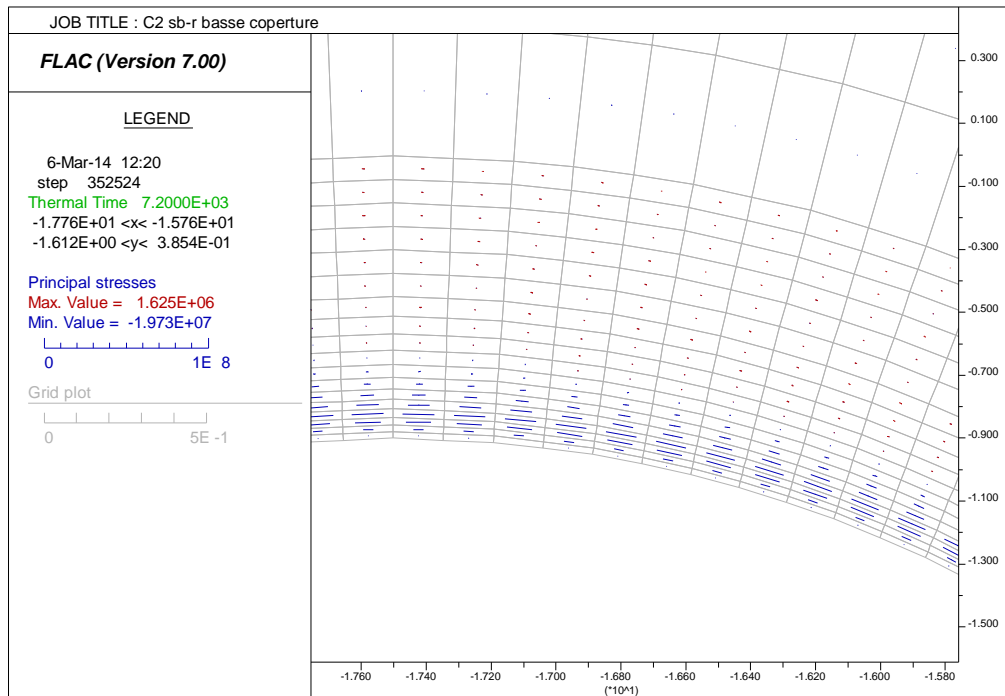


Figura 68 – Stato tensionale – Curva UNI11076 – t = 120 min

Nel seguito si mostrano le plasticizzazioni all'interno del materiale al minuto 120: come si nota i primi strati (inferiori ai 10cm) mostrano per entrambe le curve dei punti che hanno raggiunto la plasticizzazione negli istanti passati con una successiva redistribuzione degli sforzi nei settori più esterni.

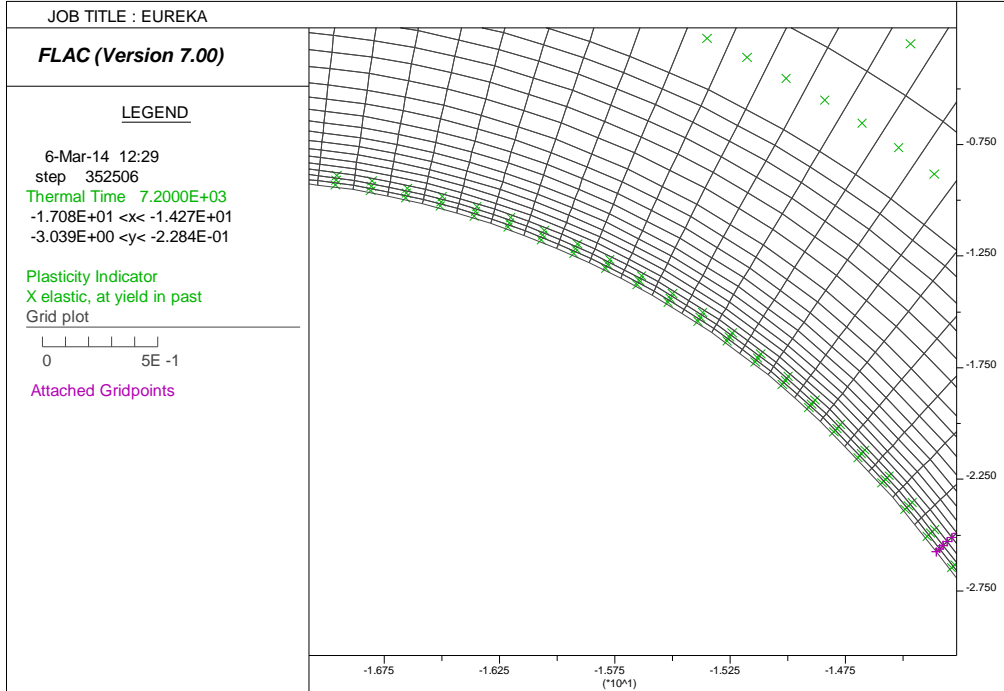


Figura 69 – Plasticizzazioni – Curva EUREKA – t = 120 min

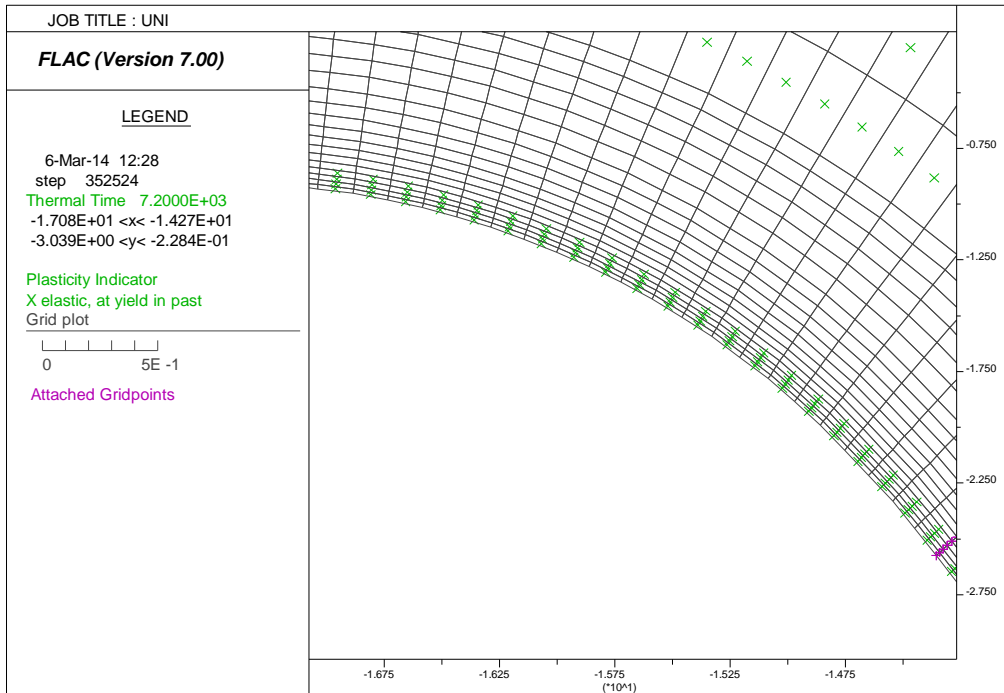


Figura 70 – Plasticizzazioni – Curva UNI11076 – t = 120 min

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 essere posta sul lato sinistro rispetto chiave calotta. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a 120 minuti per entrambe le curve analizzate.

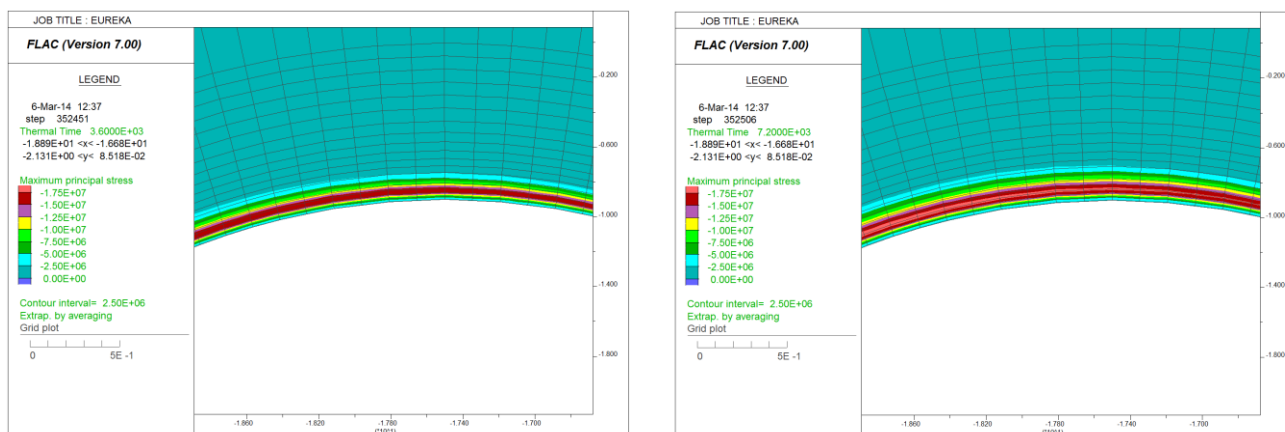


Figura 71 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 120 min

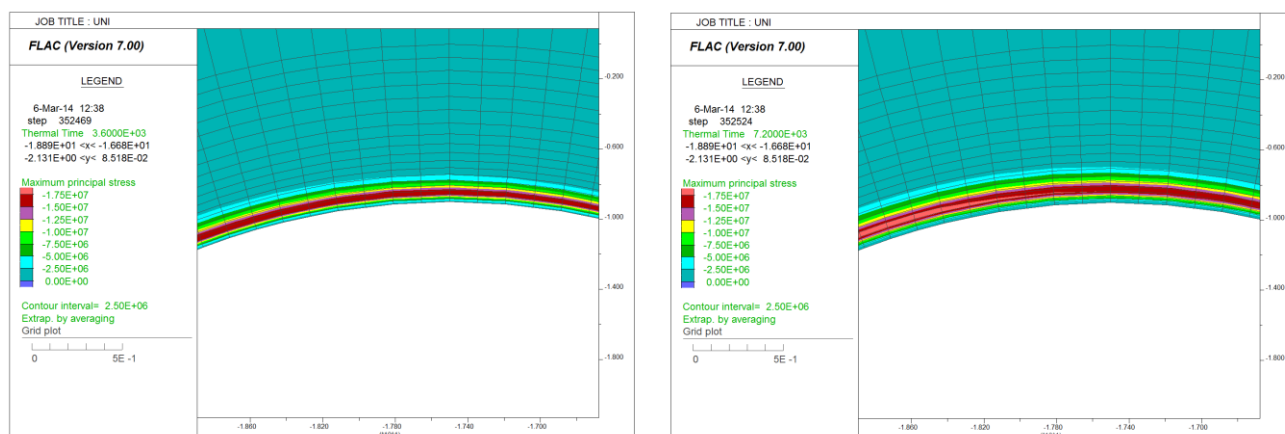


Figura 72 – Sigma 1 – Curva UNI1076 – t = 120 min

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 $T=120$ min si raggiungono azioni assiali variabili tra i 600 ed i 1600 KN circa nella zona soggetta all'azione diretta dell'incendio, con il lato sinistro più caricato rispetto al piedritto destro. Anche i momenti flettenti mostrano una certa variabilità, con valori massimi prossimi ai 1000 KNm. 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). Unicamente i valori flettenti massimi risultano leggermenti inferiori a quanto ottenuto dall'applicazione della curva "EUREKA".

In entrambi i casi è stata verificata la sezione maggiormente sollecitata nella zona di calotta, considerando a favore di sicurezza lo spessore minimo del rivestimento. I valori di sollecitazione adottati nelle verifiche sono riportati nella tabella seguente.

Curva	H_{calcolo}	N	M
[-]	[m]	[kN]	[kNm]
EUREKA	0.9	-1582	1103
UNI	0.9	-1583	1041

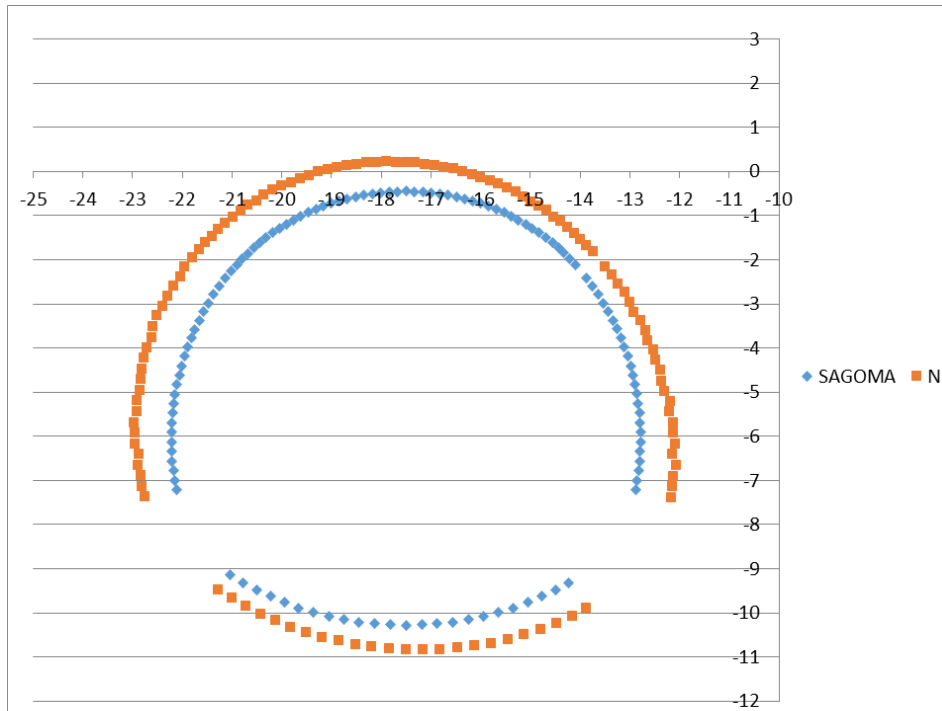


Figura 73 – Azione assiale – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=2000KN)

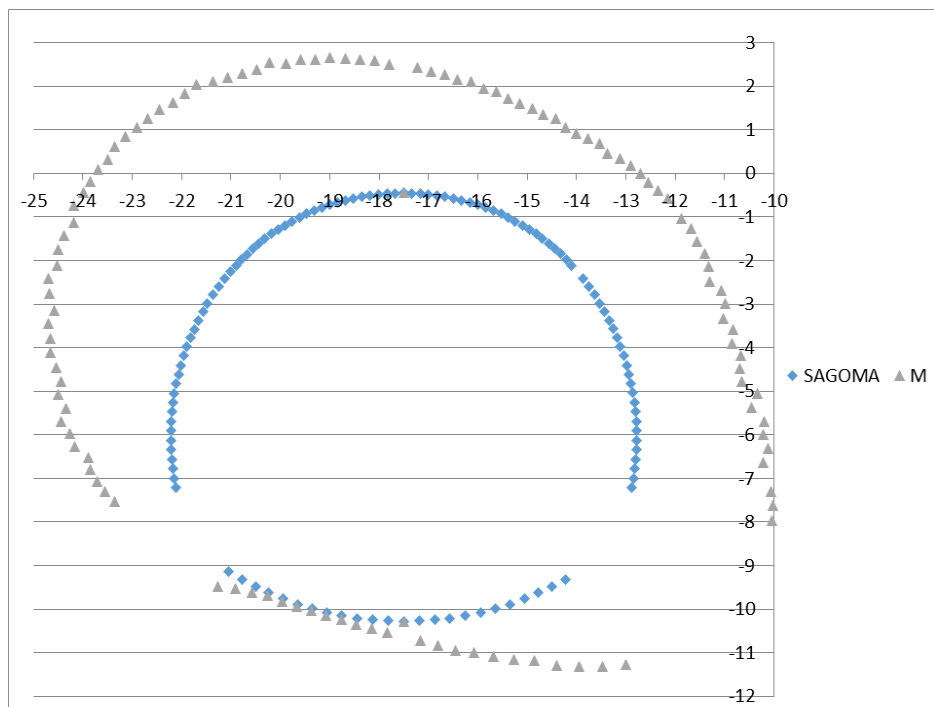


Figura 74 – Azione flettente – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=300KNm)

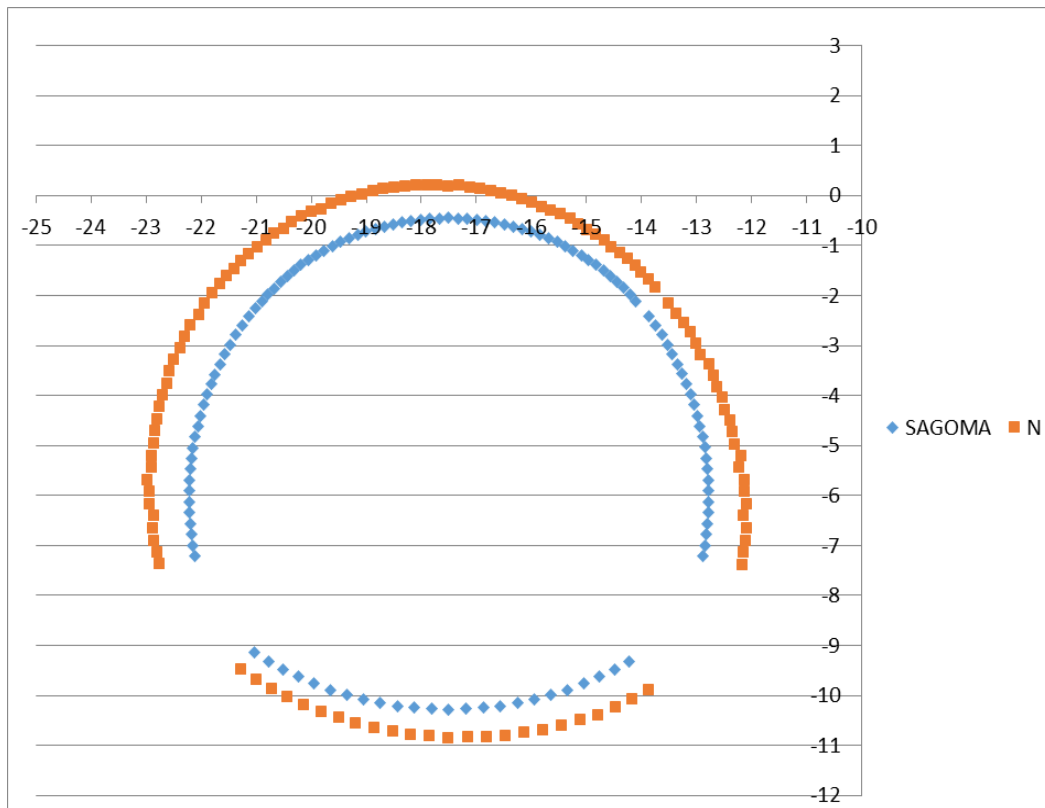


Figura 75 – Azione assiale – Curva UNI11076 – t = 120 min (Scala 1m=2000KN)

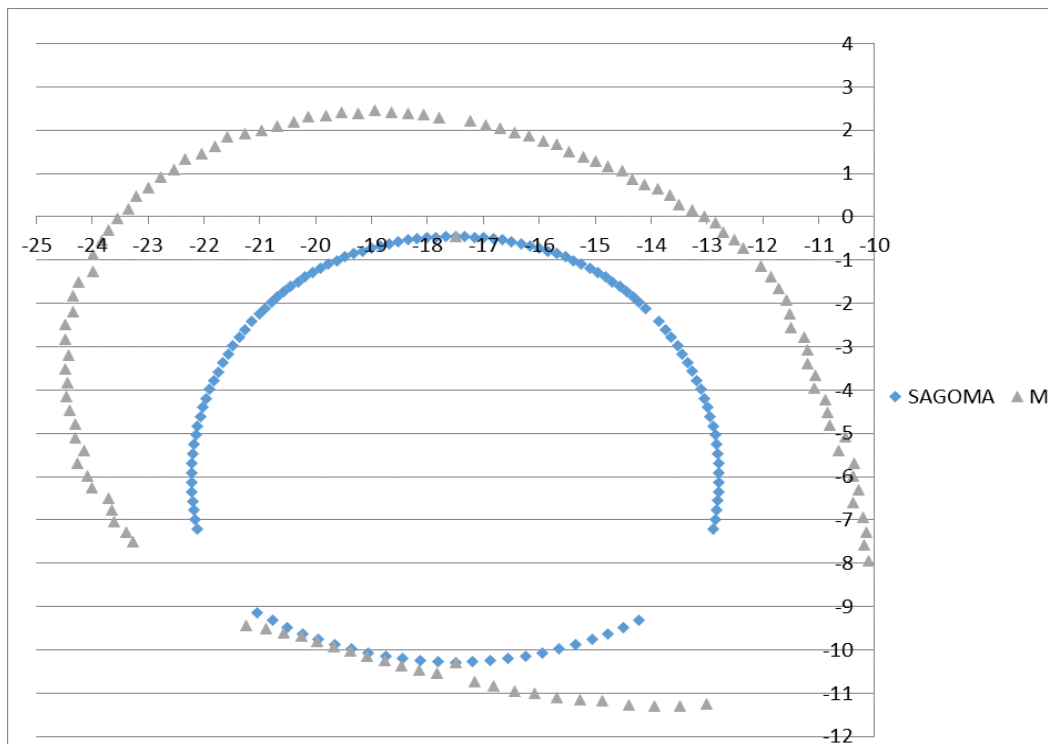


Figura 76 – Azione flettente – Curva UNI11076 – t = 120 min (Scala 1m=300KNm)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00
	Foglio 62 di 72

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 σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{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.

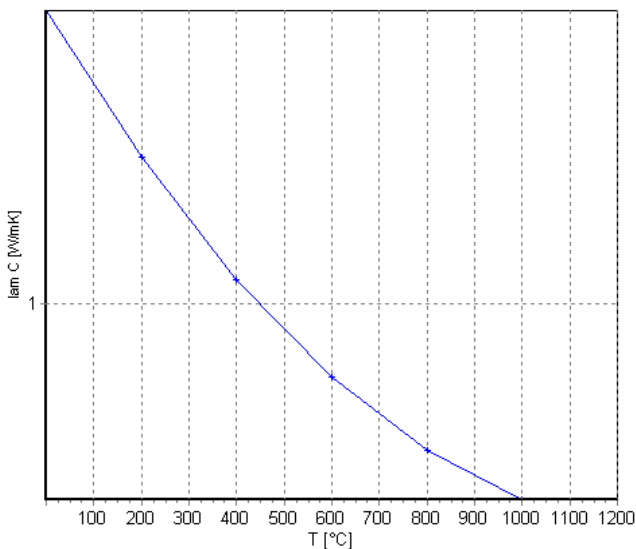


Figure 1: Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

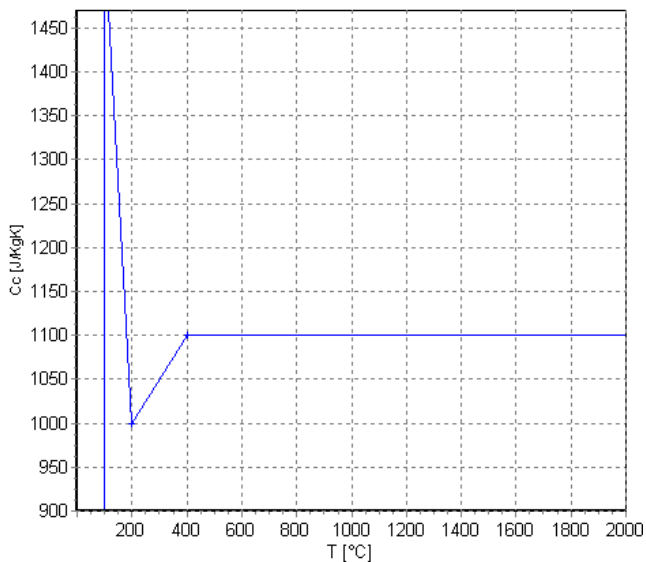


Figure 2: Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

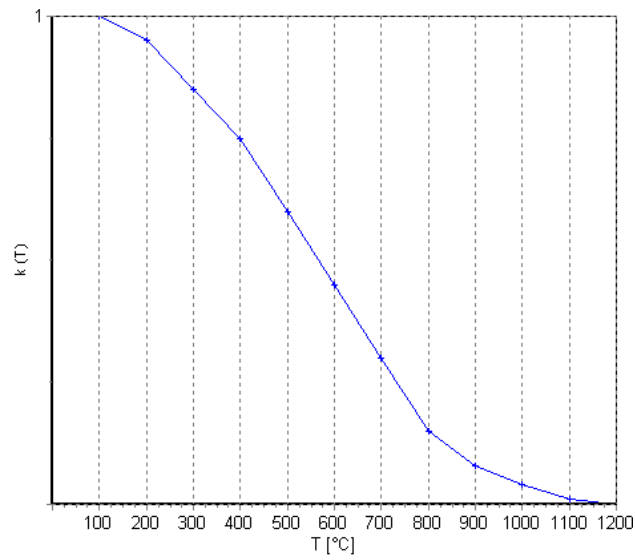


Figure 3: Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{ck} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

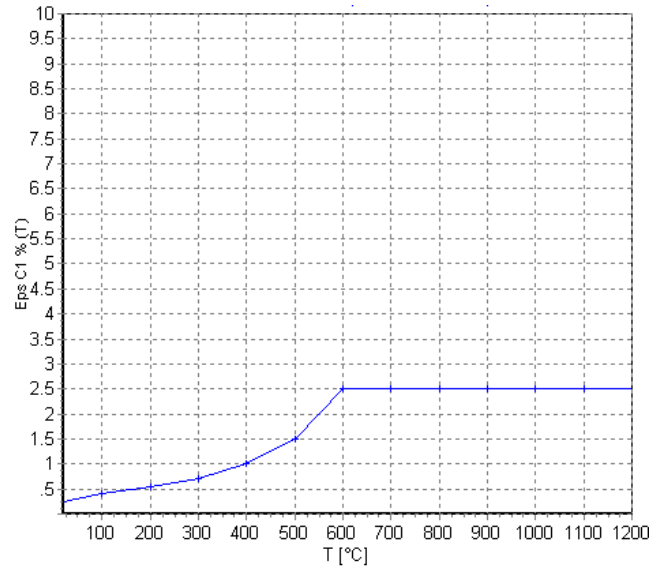


Figure 4: Fattore di riduzione del valore di ϵ_{c1} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

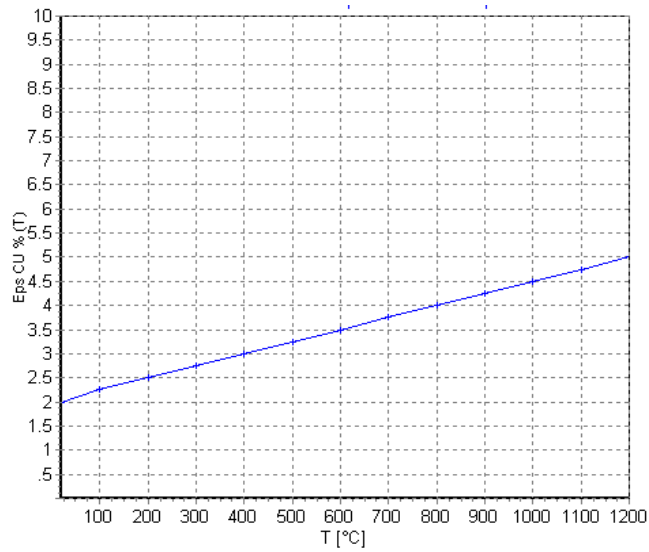


Figure 5: Fattore di riduzione del valore di ϵ_{cu} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

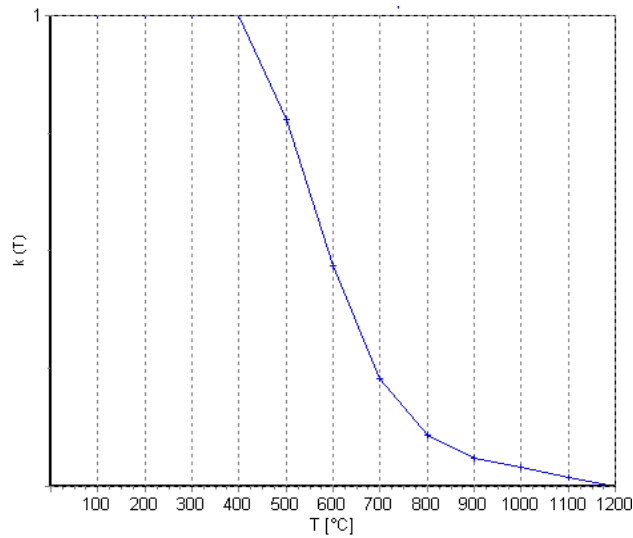
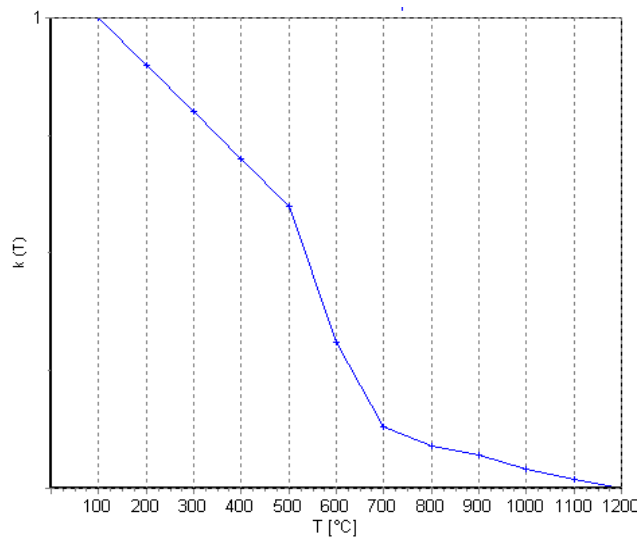


Figure 6: Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{yk} per per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)



**Figure 7: Fattore di riduzione del valore del modulo elasticoper 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-GN00-00-001-A00 Foglio 67 di 72

6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno

Come precedentemente indicato, le verifiche mediante analisi della sezione al fuoco considerando l'integrazione degli sforzi all'interno della sezione verrà svolta nel caso di sezioni armate per tutte le analisi precedentemente sviluppate.

La carpenteria e l'armatura relativa alle due sezioni considerate (C2sb-r e B2sb-r) risultano le medesime. La sezione di calcestruzzo è stata modellata utilizzando elementi finiti triangolari a sei nodi. La condizione più gravosa si è verificata nella zona di calotta, dove il rivestimento presenta uno spessore variabile tra i 90 ed i 100cm, per poi presentare uno spessore maggiore all'attacco tra piedritti e murette. Ai fini di verifica si è considerata unicamente la sezione minima, avente altezza pari a 0.90m, in modo da poter estendere la validità della verifica effettuata su tutto il rivestimento.

Ai fini del calcolo si sono inoltre eliminati 3cm in intradosso a favore di sicurezza per tenere in conto dei fenomeni di espulsione di calcestruzzo, modellando in tal modo cautelativamente di applicare l'incendio più internamente alla sezione già a partire dal primo istante temporale. Tale grandezza è stata assunta considerando i valori derivati dai test sulle strutture presenti in letteratura.

La sezione tipica di verifica avrà quindi base 100 cm ed altezza pari a 87cm. L'armatura, simmetrica, è costituita da $\Phi 24$ passo 20, con copriferro netto pari a 4 cm in estradosso e ridotto a 2cm in intradosso in seguito alla riduzione effettuata sul calcestruzzo.

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.

TEMPERATURA 20°

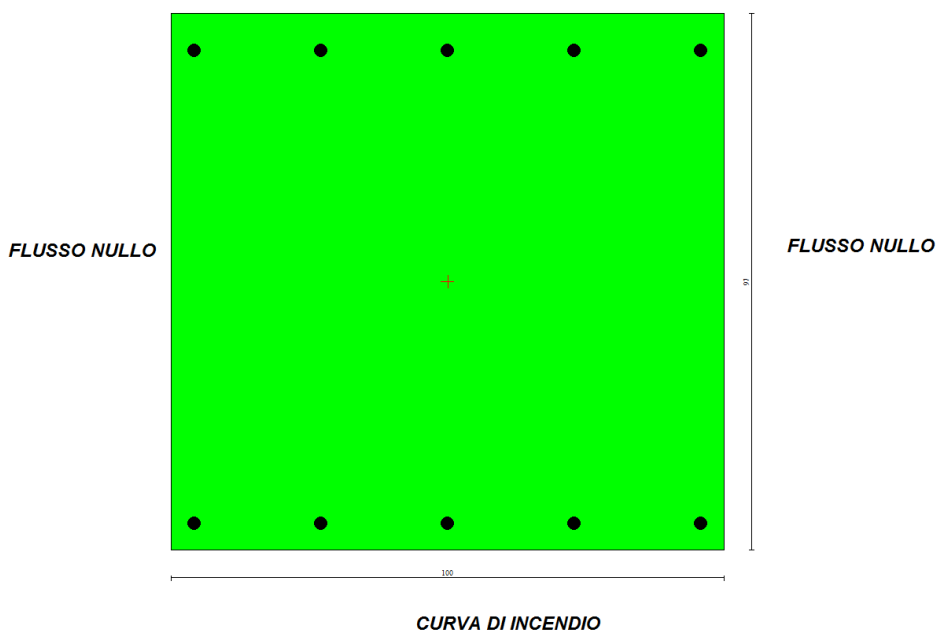


Figure 8: Schematizzazione della sezione e condizioni al contorno

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00	Foglio 68 di 72

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

- Lato inferiore: scambio, convenzione 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.

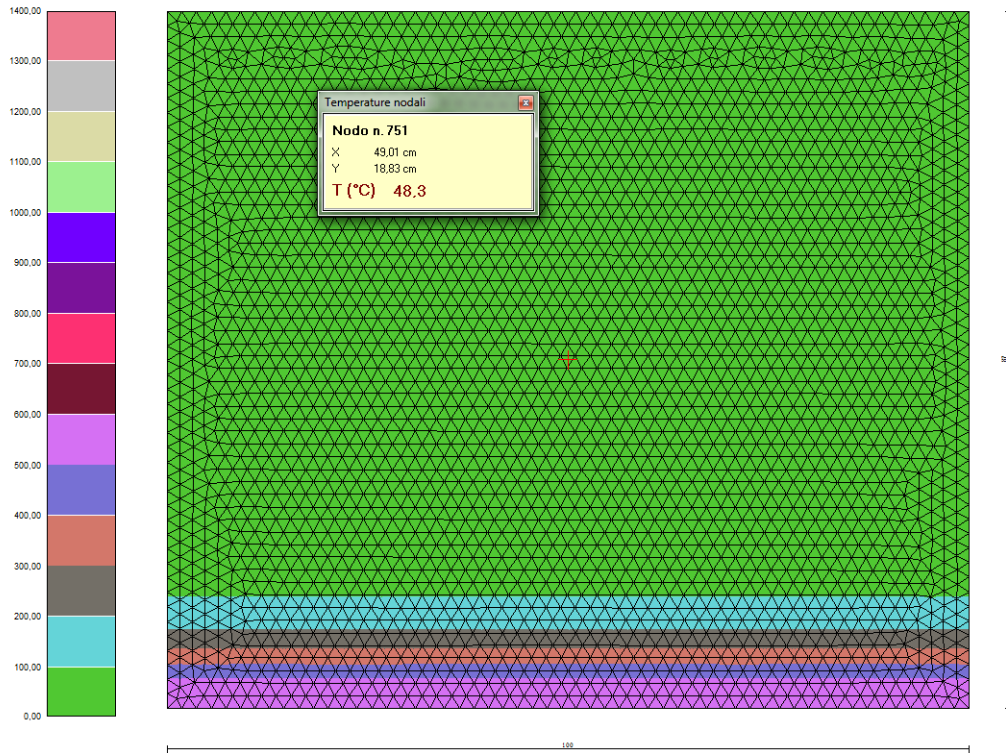


Figure 9: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (T=120 min curva EUREKA)

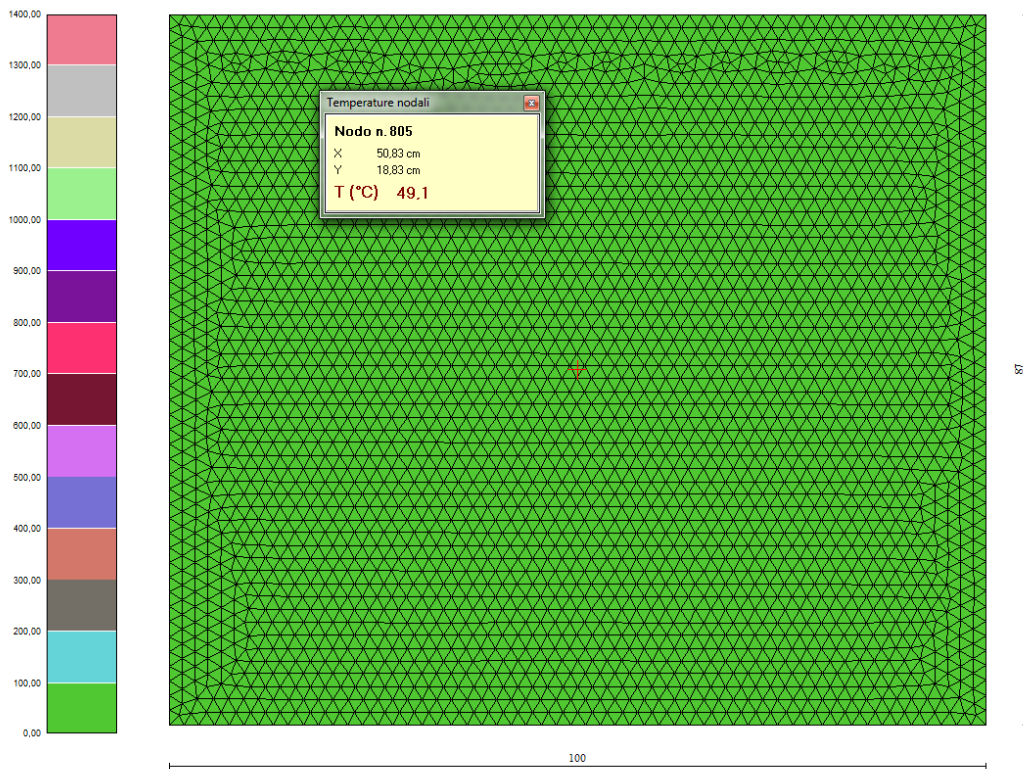


Figure 10: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (t = 120 min curva UNI)

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 incendio 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.

Sezione	Curva	H _{calcolo}	N	M	FS
[-]	[-]	[m]	[kN]	[kNm]	[-]
B2sb-r	EUREKA	0.9	-1933	971	1.49
	UNI	0.9	-1913	902	1.57
C2sb-r	EUREKA	0.9	-1582	1103	1.22
	UNI	0.9	-1583	1041	1.27

Tabella 10 Verifiche al fuoco considerando le due diverse curve d'incendio

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00	Foglio 71 di 72

7. CONCLUSIONI

Oggetto del presente elaborato è l'analisi del comportamento in condizioni di incendio della galleria naturale di Valico a singolo Binario – Tratta 6 (WBS GN15X), relativa al solo binario dispari. 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).

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-04-E-CV-RH-GN00-00-001-A00

Foglio
72 di 72

ALLEGATI DI CALCOLO