

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 SERRAVALLE IMBOCCO SUD
Verifiche di resistenza al fuoco

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI
Consorzio Cociv Ing. P.P. Marcheselli	

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I G 5 1	0 2	E	C V	R H	G A 1 K 0 0	0 0 1	A

Progettazione :								
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione	Rocksoil <i>A. Palomba</i>	13/01/2014	Rocksoil <i>A. Palomba</i>	14/01/2014	A. Palomba <i>A. Palomba</i>	16/01/2014	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:	File: IG5103ECVRHGN4100001A00
-----------	-------------------------------

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	
	<p>IG5102ECVVRHGA1K00001A00</p>	<p>Foglio 3 di 61</p>

INDICE

INDICE.....	3
1. INTRODUZIONE.....	5
2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....	5
3. MATERIALI IMPIEGATI.....	5
3.1. Gallerie artificiali.....	5
4. VERIFICHE AL FUOCO	6
4.1. Fase "0": costruzione dello stato tensionale in fase statica	9
4.1.1. Geometria del modello.....	9
4.1.2. Modellazione degli elementi geotecnici e strutturali.....	12
4.1.3. Fasi di calcolo	13
4.2. Fase "1": Analisi accoppiata termo-meccanica.....	13
4.2.1. Procedimento di calcolo.....	14
4.2.2. Modello di trasmissione del calore.....	14
4.3. Proprietà meccaniche a caldo	16
4.4. Proprietà termiche.....	21
4.5. Valutazione delle azioni interne	25
5. SINTESI DEI RISULTATI.....	26
5.1. "Fase 0": Analisi statica.....	26
5.1.1. Andamento delle azioni interne nella struttura.....	28
5.2. "Fase 1": Analisi accoppiata termo-meccanica.....	31
5.2.1. Distribuzione di temperatura	32
5.2.2. Evoluzione del modulo elastico e della coesione nel calcestruzzo.....	36
5.2.3. Stati tensionali e deformativi	41
5.2.4. Andamento delle azioni interne nella struttura.....	47
6. VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO.....	50
6.1. Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©).....	50
6.2. Procedura di calcolo e verifica	50
6.3. Caratteristiche termiche dei materiali	51
6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno.....	55
6.5. RISULTATI E VERIFICHE	59
7. CONCLUSIONI	60
ALLEGATI DI CALCOLO.....	61

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG5102ECVRHGA1K00001A00

Foglio
4 di 61

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 Foglio 5 di 61

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è lo studio del comportamento al fuoco del rivestimento definitivo della Galleria Artificiale “Imbocco Sud – Galleria Serravalle” (WBS GA1K) e la verifica di resistenza in tali condizioni. 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 SERRAVALLE – IMBOCCO SUD - Relazione geotecnica, di calcolo e di monitoraggio”.

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 artificiali

Rivestimenti in c.a.

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

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 Foglio 6 di 61

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 0 – Sviluppo delle modellazioni numeriche in assenza di incendio

Le analisi sono state condotte partendo dalle condizione di carico "a freddo", ricreando nel programma di calcolo la geometria dell'opera, del ritombamento e del terreno di fondo. In analogia a quanto fatto nell'elaborato "GALLERIA NATURALE SERRAVALLE – IMBOCCO SUD - Relazione geotecnica, di calcolo e di monitoraggio" si è modellato un ritombamento simmetrico dell'opera, trascurando la presenza della paratia provvisoria in quanto si vuole simulare la fase di lungo termine. Si rimanda ai paragrafi successivi per una maggiore descrizione del modello di calcolo adottato. Tale fase di calcolo è propedeutica unicamente a ricreare lo stato tensionale di partenza per il calcolo durante l'incendio e non verranno quindi svolte verifiche sezionali: la struttura risulta infatti dimensionata all'interno dell'elaborato sopra citato con riferimento alle differenti combinazioni di carico dovute alle spinte delle terre e alle accelerazioni sismiche.

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 valutate nelle "Fase 0". 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.

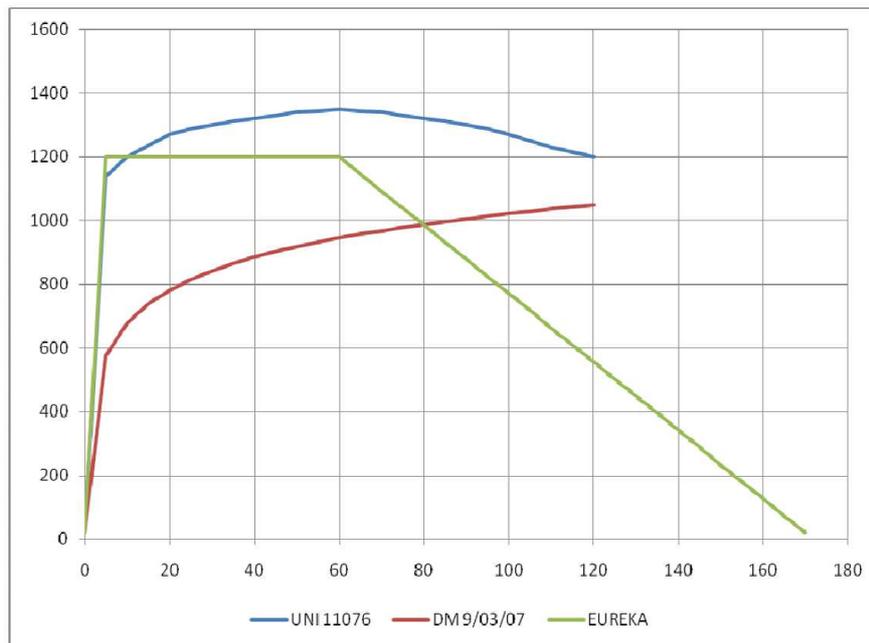


Figura 1 Comparazione tra le curve d'incendio

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 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°C a 10 minuti, un massimo di 1350°C a 60 minuti e un ritorno a 1200°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.

4.1. Fase "0": costruzione dello stato tensionale in fase statica

Il programma FLAC 7.0 ha permesso di simulare, per fasi successive, la realizzazione della galleria artificiale e del ritombamento. La sezione analizzata, in coerenza con le assunzioni fatte nell'elaborato "GALLERIA NATURALE SERRAVALLE – IMBOCCO SUD - Relazione geotecnica, di calcolo e di monitoraggio", risulta quella in prossimità della dima, in corrispondenza del ritombamento massimo. A partire dalla condizione geostatica, si è in una prima fase realizzato il getto della galleria artificiale, mentre in seconda battuta si è proceduto a ritombare l'opera in esame. La paratia presente lateralmente alla galleria artificiale, in quanto opera provvisoria, non è stata tenuta in conto analizzando la situazione di lungo termine, in conformità a quanto fatto per il dimensionamento statico.

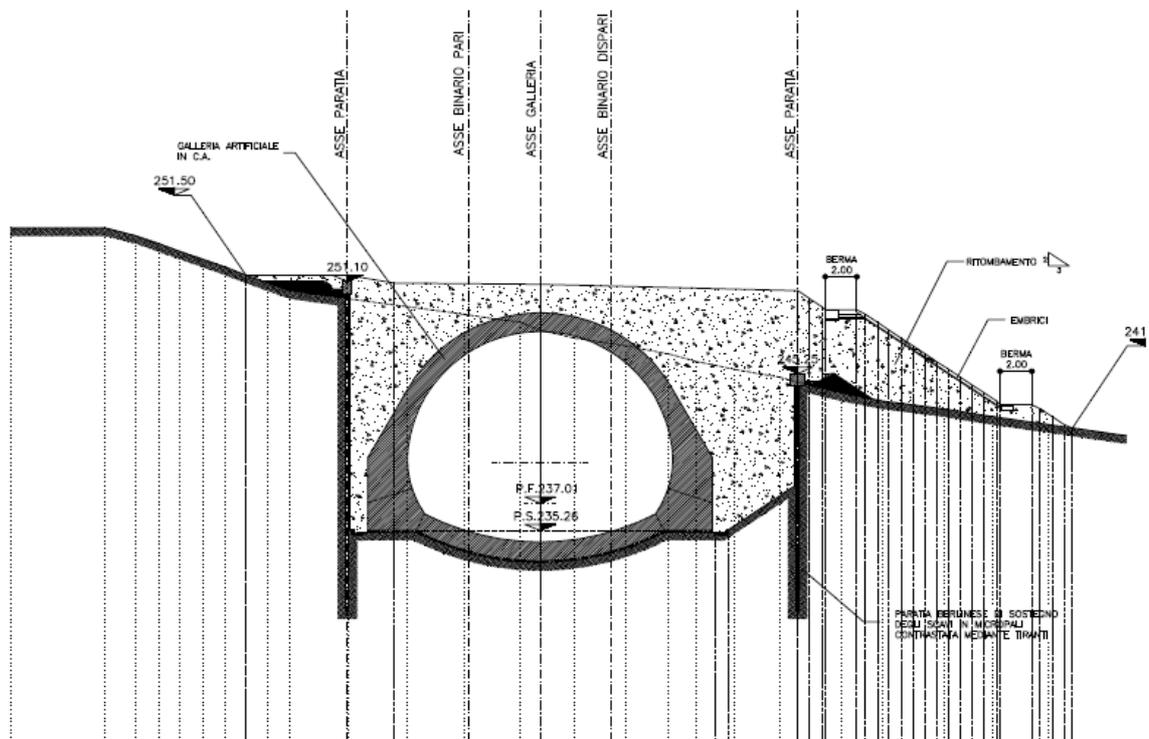


Figura 3 – Situazione analizzata – Galleria artificiale.

4.1.1. Geometria del modello

La sezione analizzata si riferisce alla sezione immediatamente a tergo del concio di attacco, dove termina la dima; le analisi sono state condotte considerando un modello bidimensionale avente lunghezza unitaria (1m) fuori piano. Nel calcolo si è simulato, per fasi successive, la realizzazione della galleria artificiale considerando l'effettiva geometria. Il calcestruzzo è stato modellato come un materiale elastico lineare ed infine si è realizzato il ritombamento con un'altezza di circa 2.0 m rispetto alla sezione di chiave calotta della galleria artificiale. Il terreno è stato modellato attraverso un unico stato di sottofondo, in coerenza a quanto fatto nel dimensionamento statico e le analisi

sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo “*Mohr-Coulomb*”.

Gli elementi in c.a. sono stati modellati in base alla loro reale geometria mediante elementi “shell”, in quanto è indispensabile ai fini dell’analisi accoppiata termo-meccanica da svolgere nelle successive fasi di analisi non impiegare dei beam; col fine di poter valutare le azioni interne, si potranno quindi integrare gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti.

Si è utilizzato un modello “Plane strain” bidimensionale avente dimensione di 200m in larghezza e 90m in altezza. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per il calcolo della galleria naturale, costituita da n° 17472 zone.

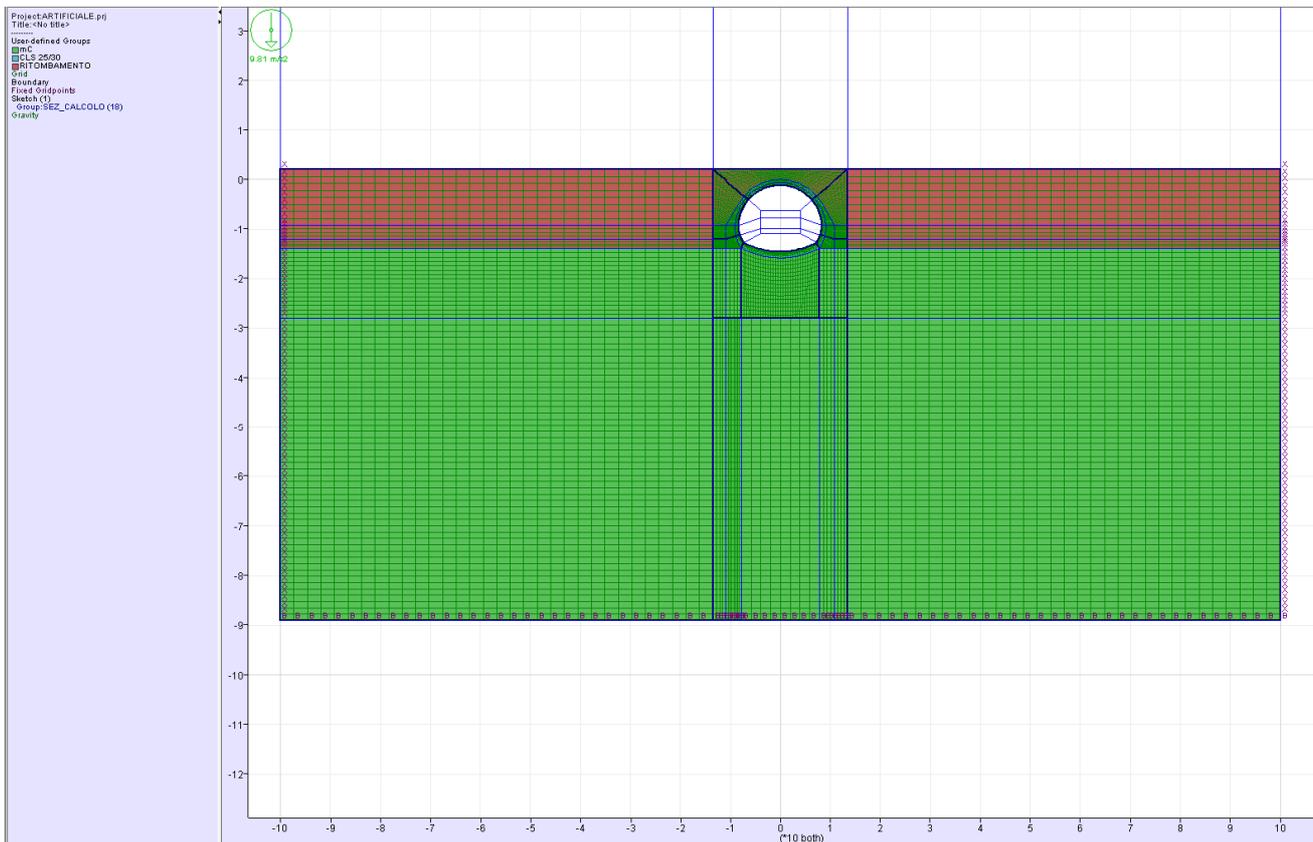


Figura 4 – Mesh di calcolo – Galleria artificiale.

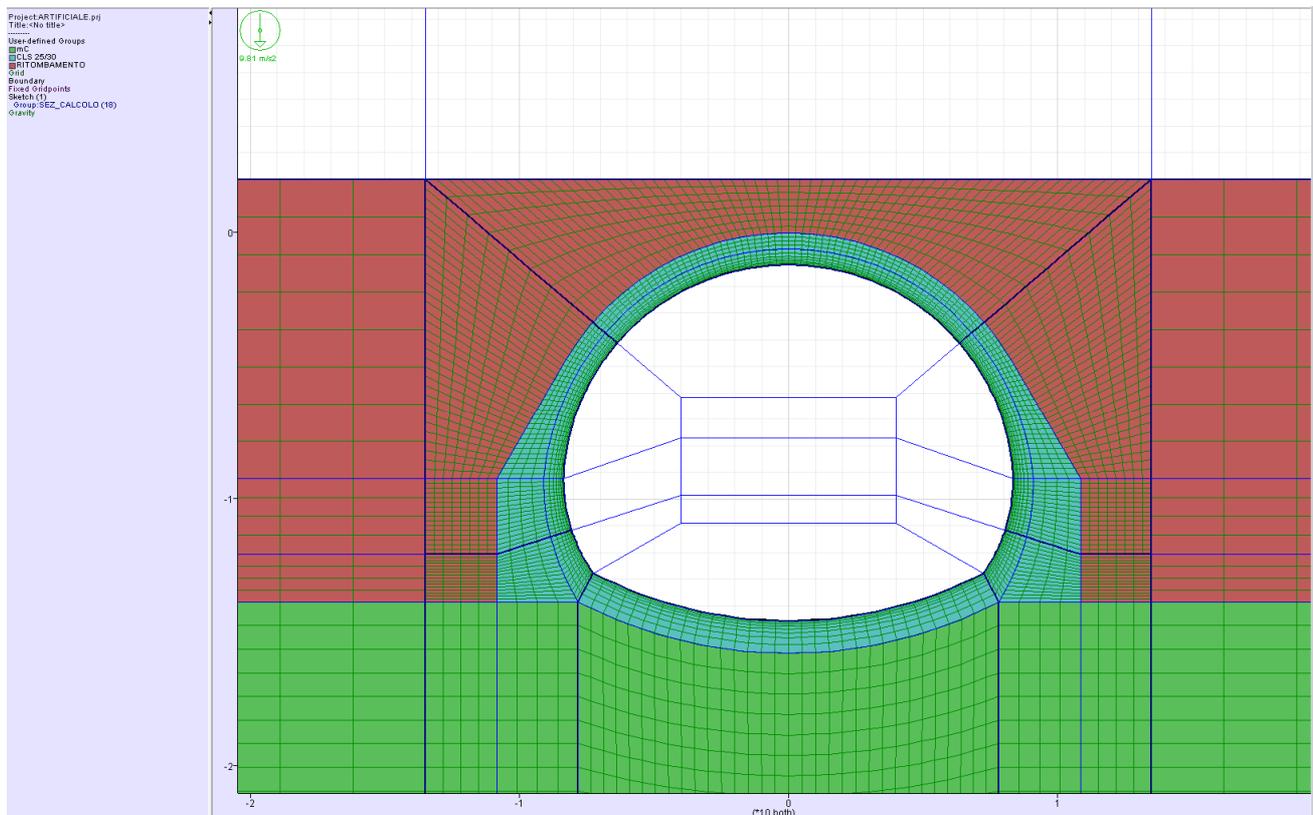


Figura 5 – Mesh di calcolo in prossimità dell'opera

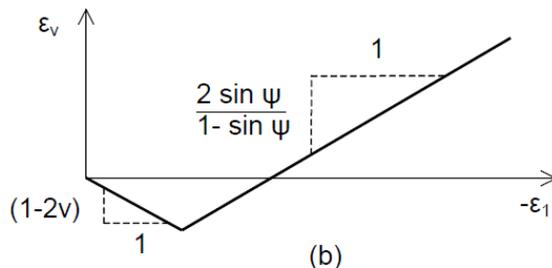
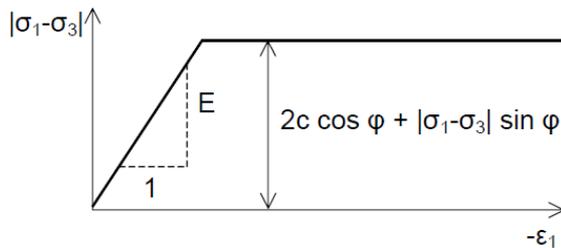
Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

4.1.2. Modellazione degli elementi geotecnici e strutturali

Il terreno viene modellato utilizzando un modello costitutivo elasto-plastico ideale con superficie di rottura alla Mohr-Coulomb.



I parametri necessari alla modellazione del terreno sono i seguenti:

- modulo di Young E
- coefficiente di Poisson ν
- coesione c'
- angolo di attrito φ'
- angolo di dilatanza ψ
- peso di volume del materiale saturo e non saturo $\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{unsat}}$

Terreno	Peso di volume γ (kN/m ³)	Coesione c' (kPa)	Angolo di attrito φ (°)	Modulo def. E (MPa)	Coeff. Poisson ν (-)
Substrato	22	100	26	500	0.3
Ritombamento	21	0	30	40	0.3

Il valore del coefficiente di spinta a riposo è stato valutato in base alla formula di Jaky $K_0=1-\text{sen}\varphi$ e vale quindi 0.562 per il substrato.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5102ECVRHGA1K00001A00
	Foglio 13 di 61

Il calcestruzzo utilizzato per la galleria artificiale nelle fasi statiche è stato modellato come un materiale elastico lineare. Questo modello rappresenta la legge di Hooke dell'elasticità isotropa lineare e richiede due parametri di rigidezza elastici, che sono il modulo di Young E , ed il coefficiente di Poisson ν , pari a $E=31220$ MPa e $\nu=0.2$.

Il carico idrostatico si considera non agente sulle opere in esame.

4.1.3. Fasi di calcolo

Si riporta la metodologia impiegata per simulare le fasi di realizzazione dell'opera.

step 1 geostatico: vengono applicati i pesi propri del terreno e si inizializzano gli sforzi orizzontali;

step 2 Getto della galleria artificiale;

step 3 Ritombamento della galleria

4.2. Fase "1": Analisi accoppiata termo-meccanica

La valutazione delle sollecitazioni che nascono nel rivestimento definitivo della galleria artificiale in esame 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 ai quali è sottoposta, 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 "Time" di calcolo relativa alle condizioni di incendio a seguire la fase di lungo termine ("FASE 0").

Durante tali fasi 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 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 in grado di resistere alla sollecitazione di incendio.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 Foglio 14 di 61

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 $T=20^{\circ}\text{C}$.

4.2.1. Procedimento di calcolo

L'analisi termo-meccanica, viene effettuata partendo dalle condizioni tenso-deformative ottenute al termine dell'analisi "a freddo" nell'ultima time di calcolo (tempo $t=0$) e presentate in precedenza. 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 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. 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. Infine, si sono posti particolari punti di controllo delle principali grandezze in esame (ad esempio coesione e temperatura) che verranno plottati in funzione del tempo col fine di rendere possibile l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni indagati nel tempo.

4.2.2. 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:

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

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

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

dove:

α_c è il coefficiente di scambio di calore per convezione assunto pari $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$, 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 $5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C}^4)$.

Nelle analisi numeriche effettuate la temperatura della superficie interna del rivestimento della galleria nella zona che può entrare a contatto direttamente con le fiamme è stata assunta pari a quella della curva di incendio assegnata.

4.3. 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	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
[°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
$f_{c,\theta}$ [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:

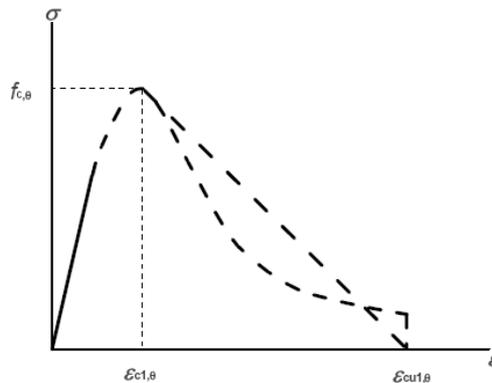


Figura 6 – Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

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:

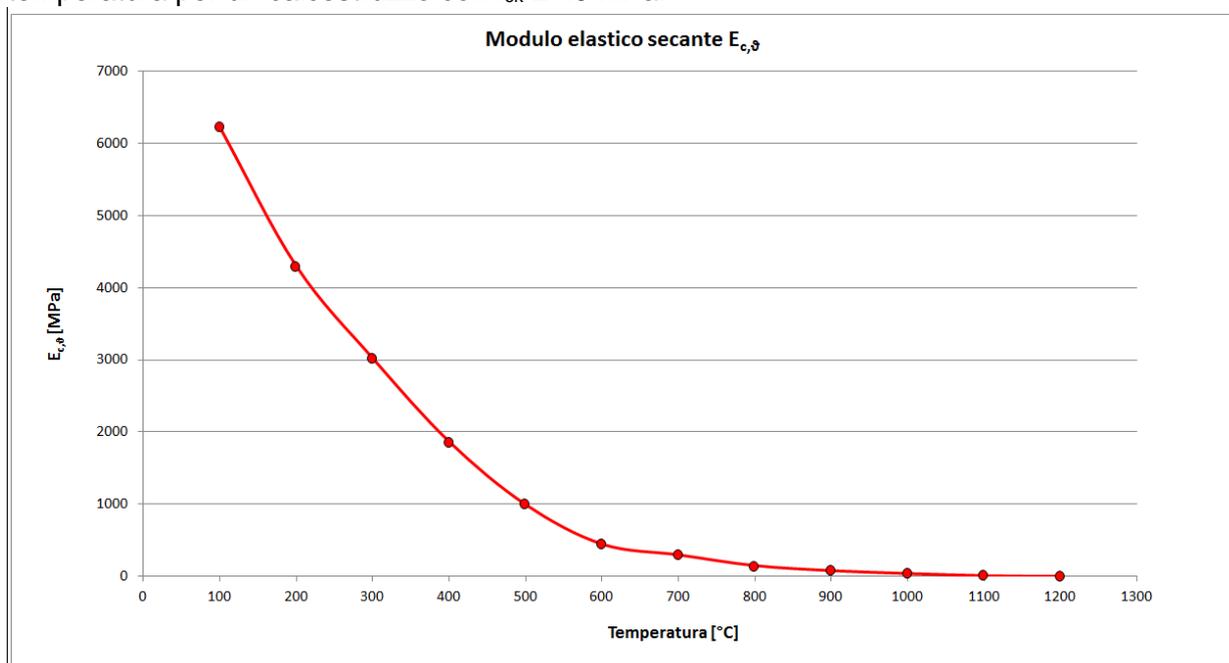


Figura 7 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura ($R_{ck} = 30$ MPa)

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: si è impiegata una coesione pari a

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

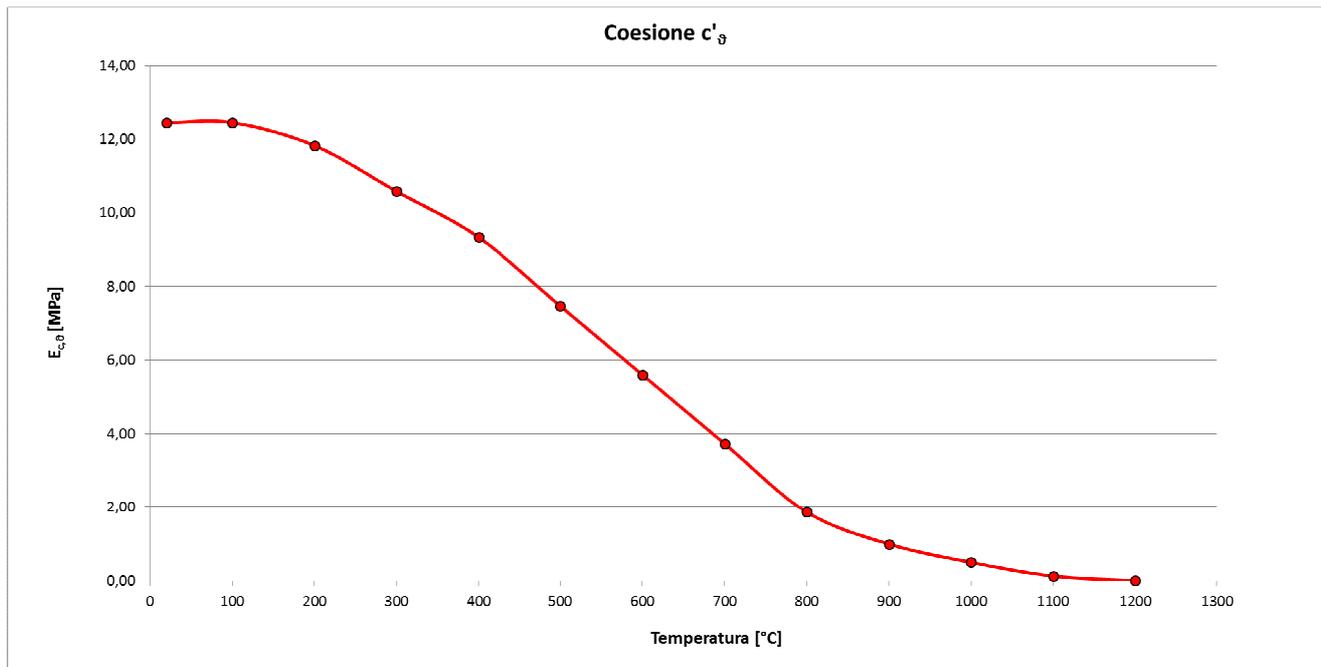


Figura 8 – Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (R_{ck} = 30 MPa)

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.

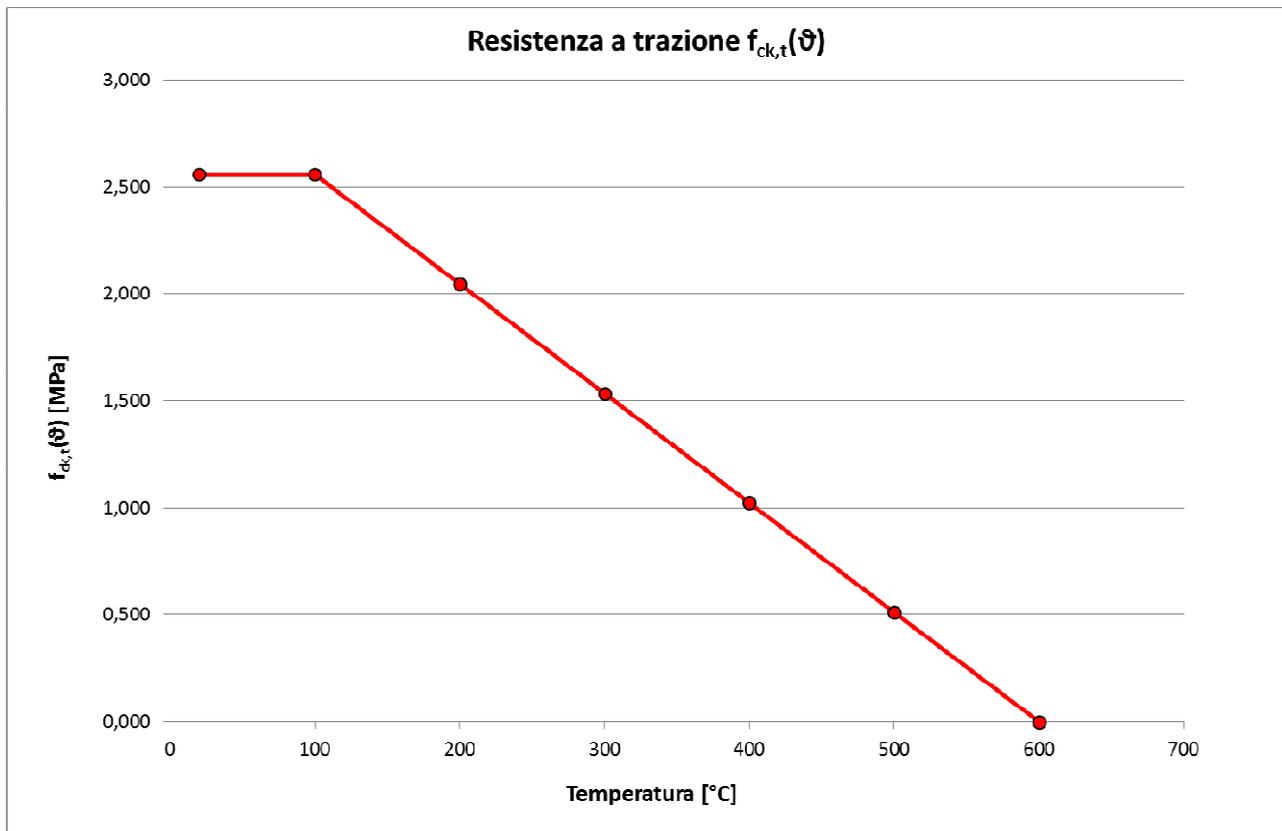


Figura 9 – Resistenza a trazione in funzione della temperatura ($R_{ck} = 30$ MPa)

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)

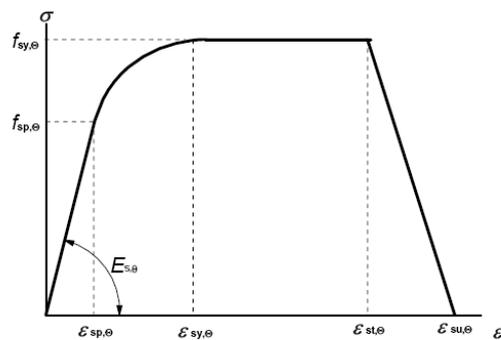
Nella zona in estradosso, data la presenza di armatura e le basse temperature raggiunte, si è preferito assegnare un comportamento elastico a trazione per il calcestruzzo: dall'integrazione delle tensioni agenti e dalle successive verifiche tensionali si garantirà a posteriori la capacità delle armature di resistere a tali sollecitazioni.

• **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
$\epsilon \leq \epsilon_{sp,\theta}$	$\epsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\epsilon_{sp,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)}{a[a^2 - (\epsilon - \epsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\epsilon_{sy,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	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 ^{*)}	$\epsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\epsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\epsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,20$ 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 10 – Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

4.4. 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.

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

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

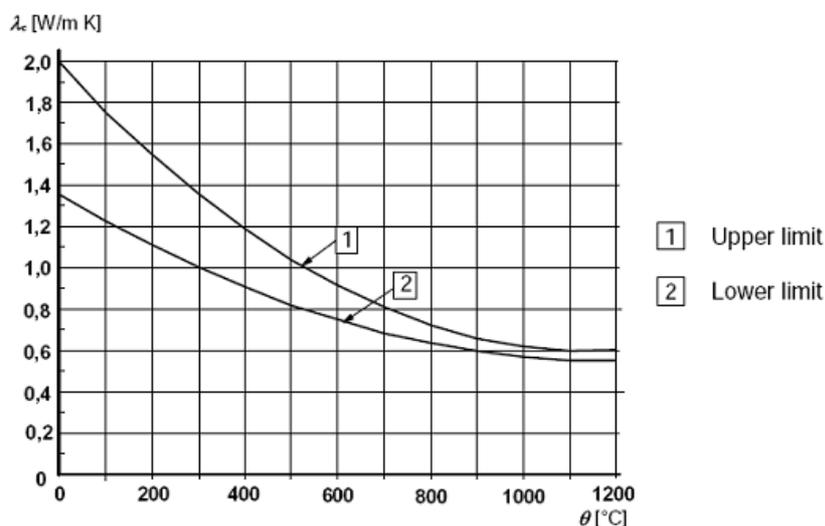


Figura 11 – Legge di variazione della conducibilità termica secondo normativa

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

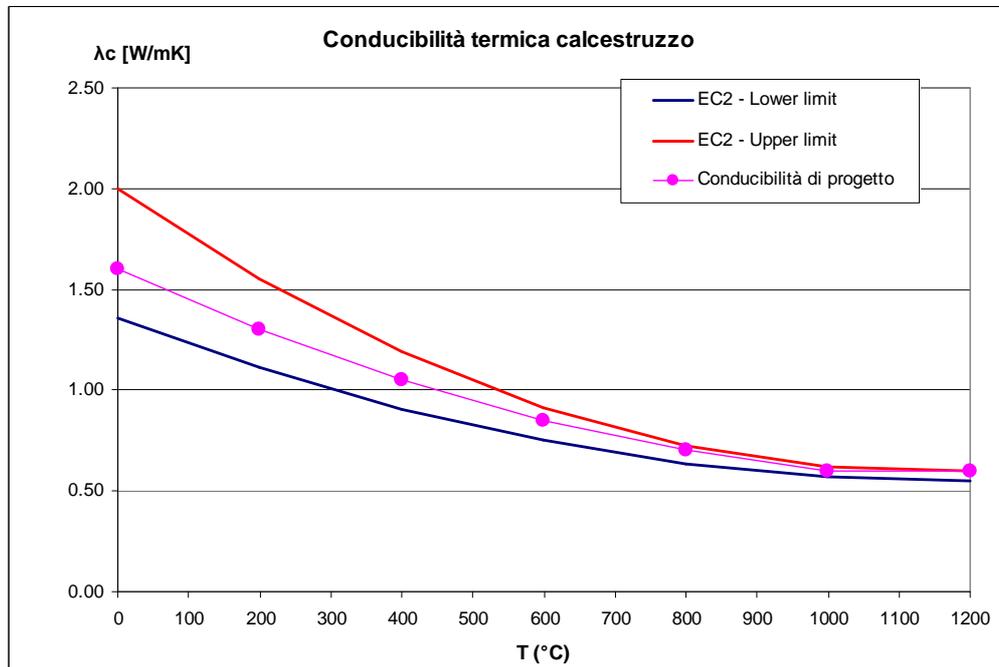


Figura 12 – Conducibilità termica di progetto

- **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 13 – 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

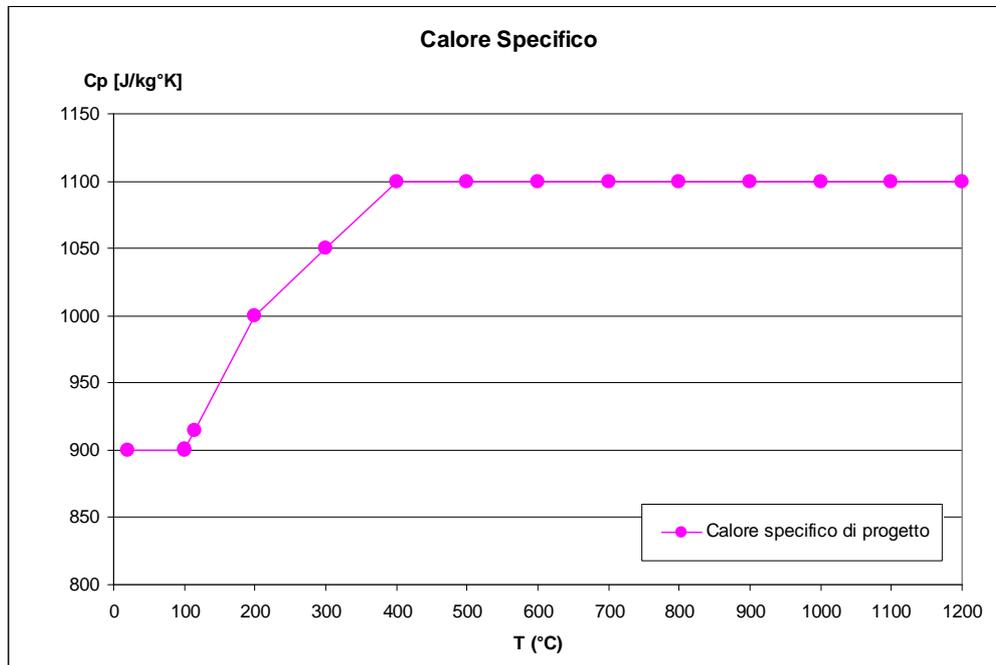


Figura 14 – Calore specifico di progetto

- **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 15 – 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 $\epsilon_{c(T)}$ con riferimento ad una lunghezza iniziale a 20°C. Da tale grandezza è possibile risalire al coefficiente di espansione termica come:

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

Siliceous aggregates:

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

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

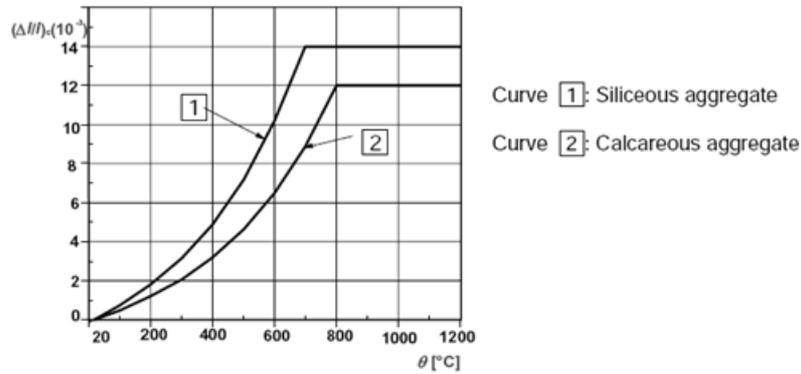


Figura 16 – Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa

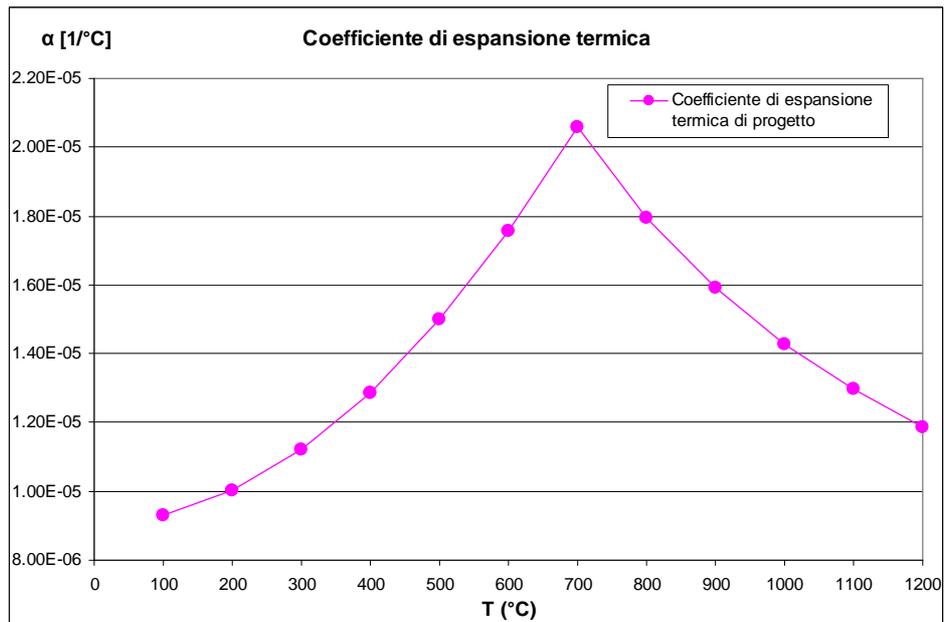


Figura 17 – Coefficiente di espansione termica di progetto

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						
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										

Tabella 9 – Valori della deformazione termica e del coefficiente alfa per calcestruzzi silicei

4.5. Valutazione delle azioni interne

Metodologia impiegata

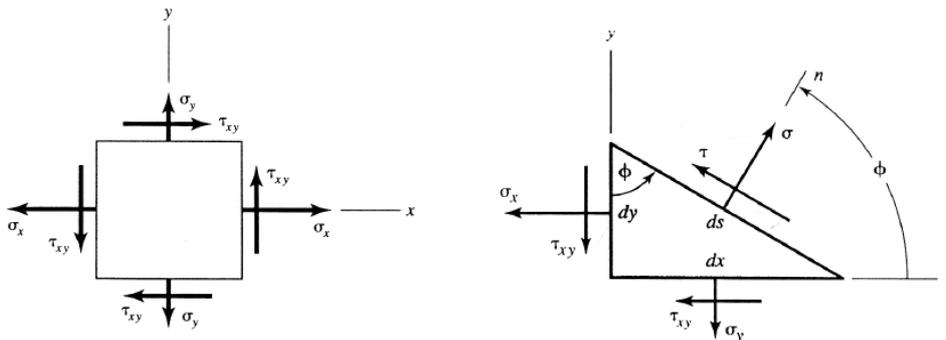
L'utilizzo di elementi quadrangolari per la simulazione delle strutture in cemento armato, necessaria per realizzare l'analisi in condizioni d'incendio, non consente al programma di calcolo impiegato di restituire direttamente le azioni interne M, N, T; per questo è necessario integrare le tensioni σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{xy} fornite in output da FLAC 7.0 lungo opportune sezioni di calcolo 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 ed 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 la reale geometria definite nelle relative tavole di carpenteria.

5. SINTESI DEI RISULTATI

5.1. “Fase 0”: Analisi statica

Nel seguito verranno riportati i principali risultati ottenuti nel calcolo statico senza l'applicazione del carico di incendio. Si sottolinea che i risultati qui ottenuti non sono stati impiegati per il dimensionamento statico, ma servono unicamente a fornire le condizioni iniziali (al tempo $t=0$) per la successiva analisi termica: la struttura risulta infatti dimensionata nella relazione di calcolo dell'imbocco. Si mostrano i risultati ottenuti nell'ultima fase di calcolo, ovvero dopo aver inserito il ritombamento.

Gli spostamenti si sviluppano essenzialmente come una traslazione in verticale dell'opera, mentre gli sforzi indicano tensioni in intradosso calotta ed arco rovescio, mentre risultano tesi le zone in estradosso di piedritti e reni.

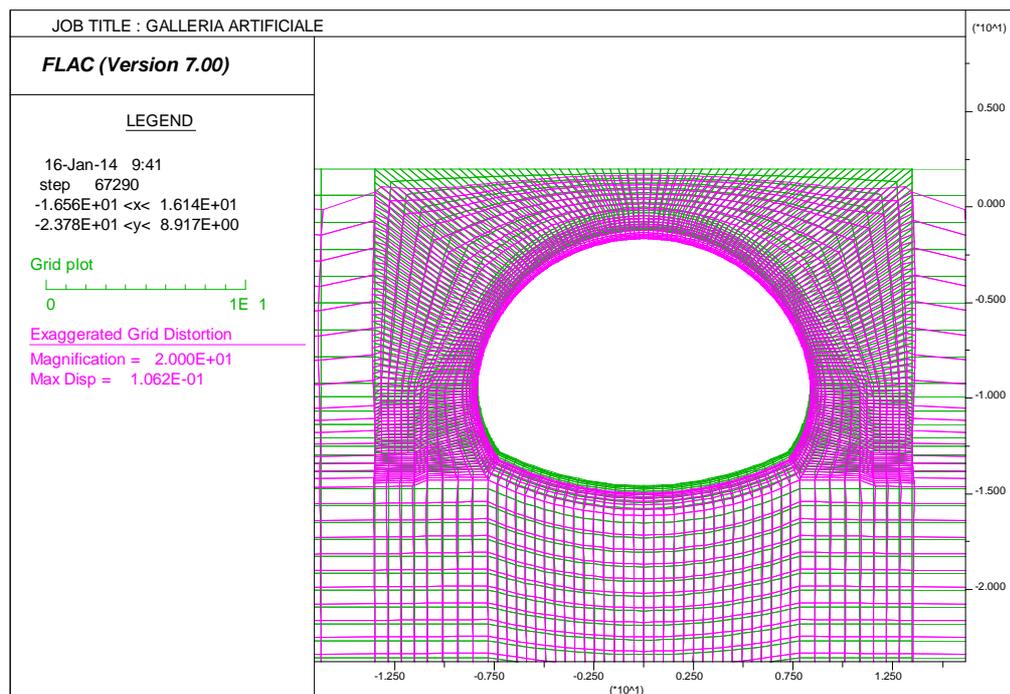


Figura 18 – Spostamenti – “Fase 0”

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

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

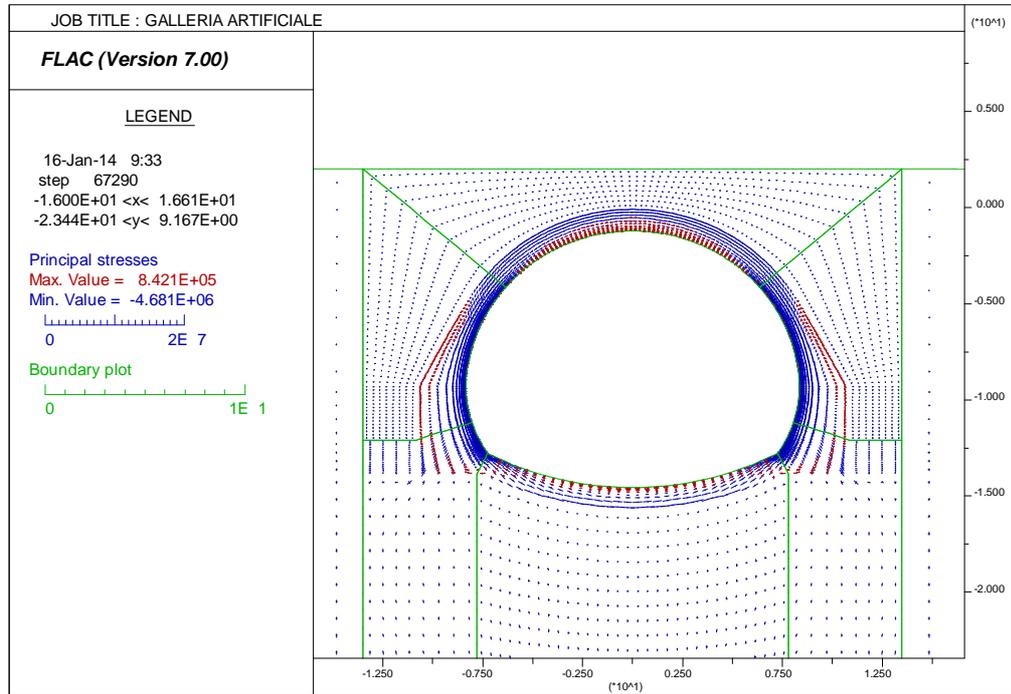


Figura 19 – Sforzi principali – “Fase 0”

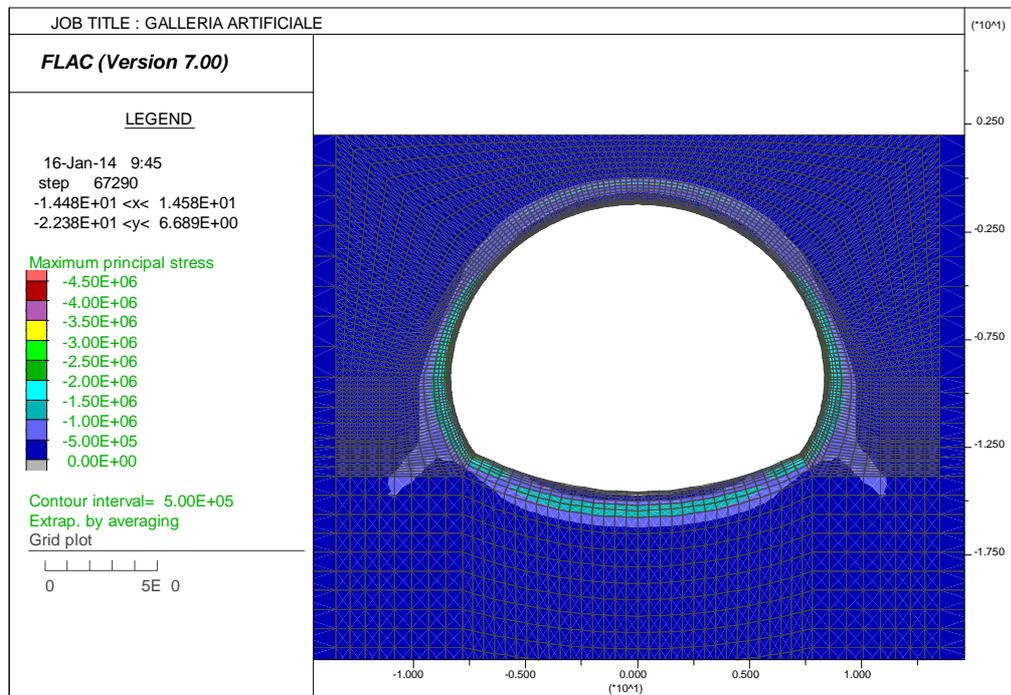


Figura 20 – Sforzo principale σ_1 – “Fase 0”

5.1.1. 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 seguendo la metodologia indicata al paragrafo 4.5.

Risultati delle analisi

Si riportano nel seguito le azioni interne M ed N valutate nell'ultima fase di calcolo prima dell'applicazione del carico di incendio: si rammenta che ai fini del dimensionamento statico non verranno prese in considerazione tali azioni, essendo la struttura dimensionata nella relativa relazione di calcolo impiegando diverse combinazioni di carico.

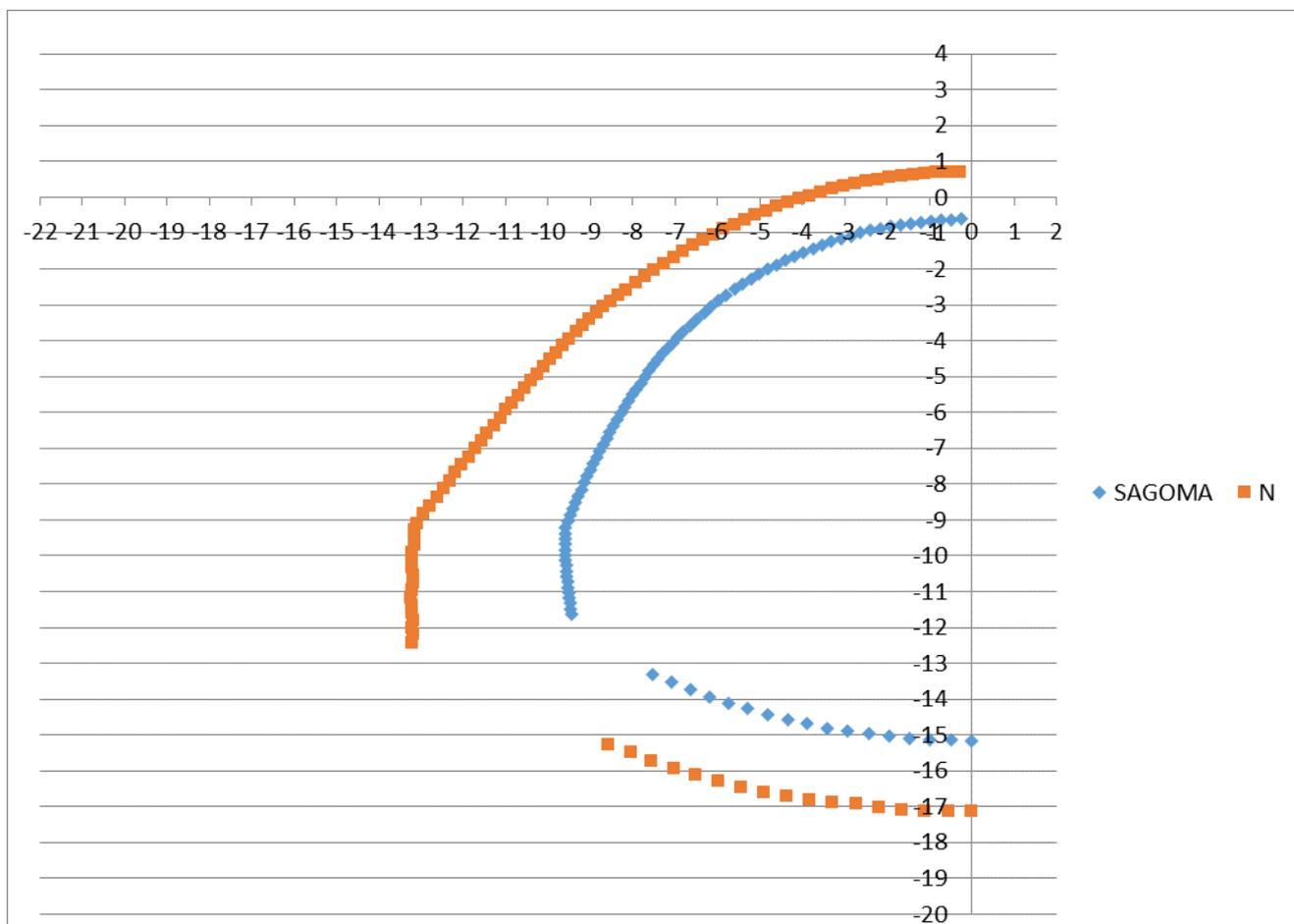


Figura 21 – Azione assiale – Ritombamento (Scala 1m=500KN)

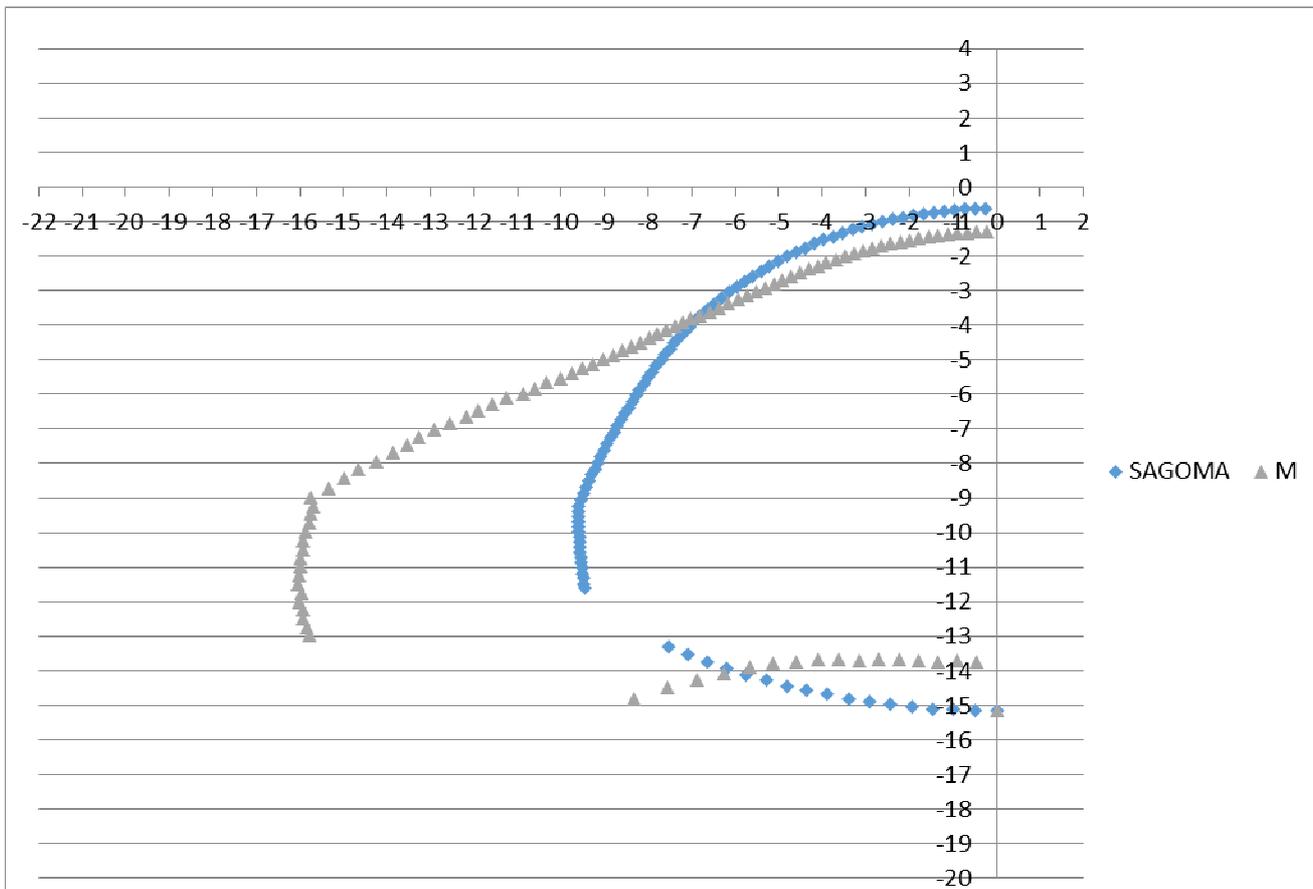


Figura 22 – Momento flettente – Ritombamento (Scala 1m=250kNm)

Tale andamento è in linea con quanto ottenuto dal modello numerico adottato per il dimensionamento statico sviluppando una combinazione di calcolo analoga (carichi verticali di ritombamento, spinte laterali impiegando il coefficiente di spinta k_0 e il peso proprio), nonostante il differente approccio seguito per la modellazione. Nel seguito vengono riportati, unicamente per termine di confronto, i risultati ottenuti con tale combinazione. Si rimanda alla relazione di calcolo "GALLERIA NATURALE SERRAVALLE – IMBOCCO SUD - Relazione geotecnica, di calcolo e di monitoraggio" per maggiori informazioni sulle geometrie del modello di calcolo sviluppato mediante il software SAP 2000.

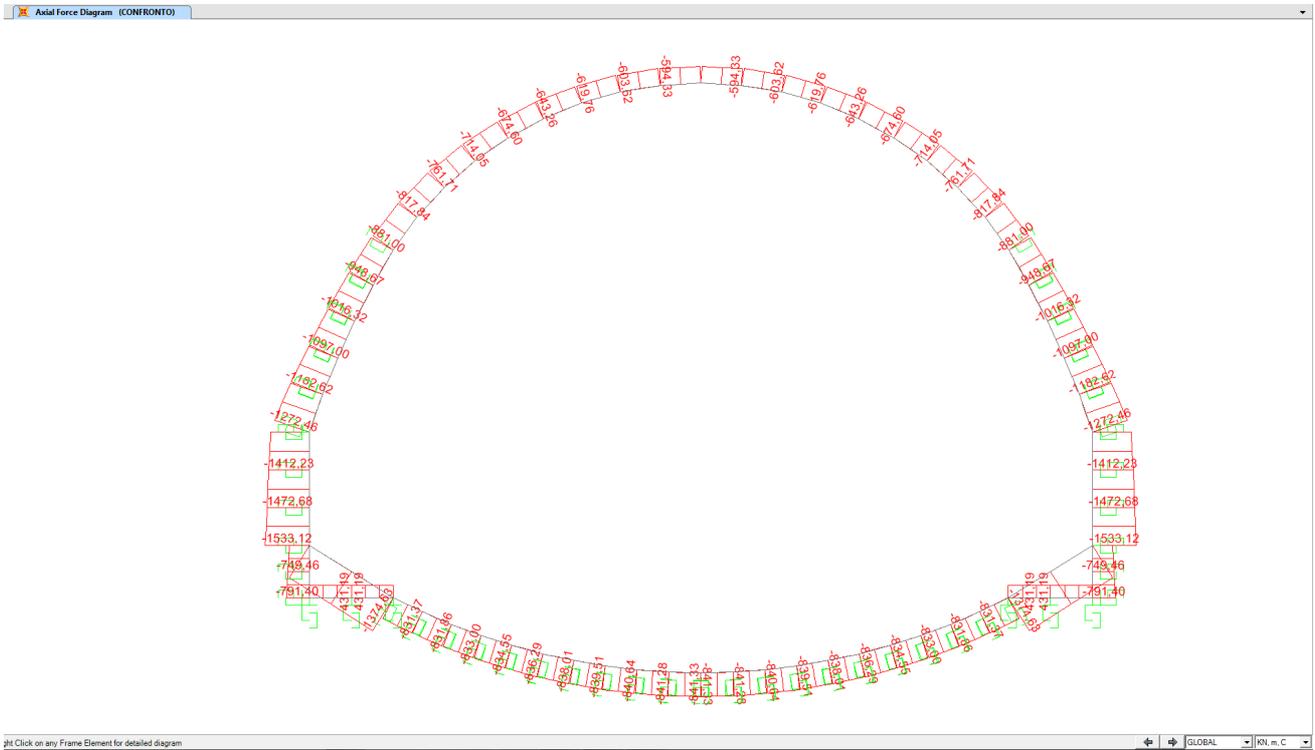


Figura 23 – Azione assiale

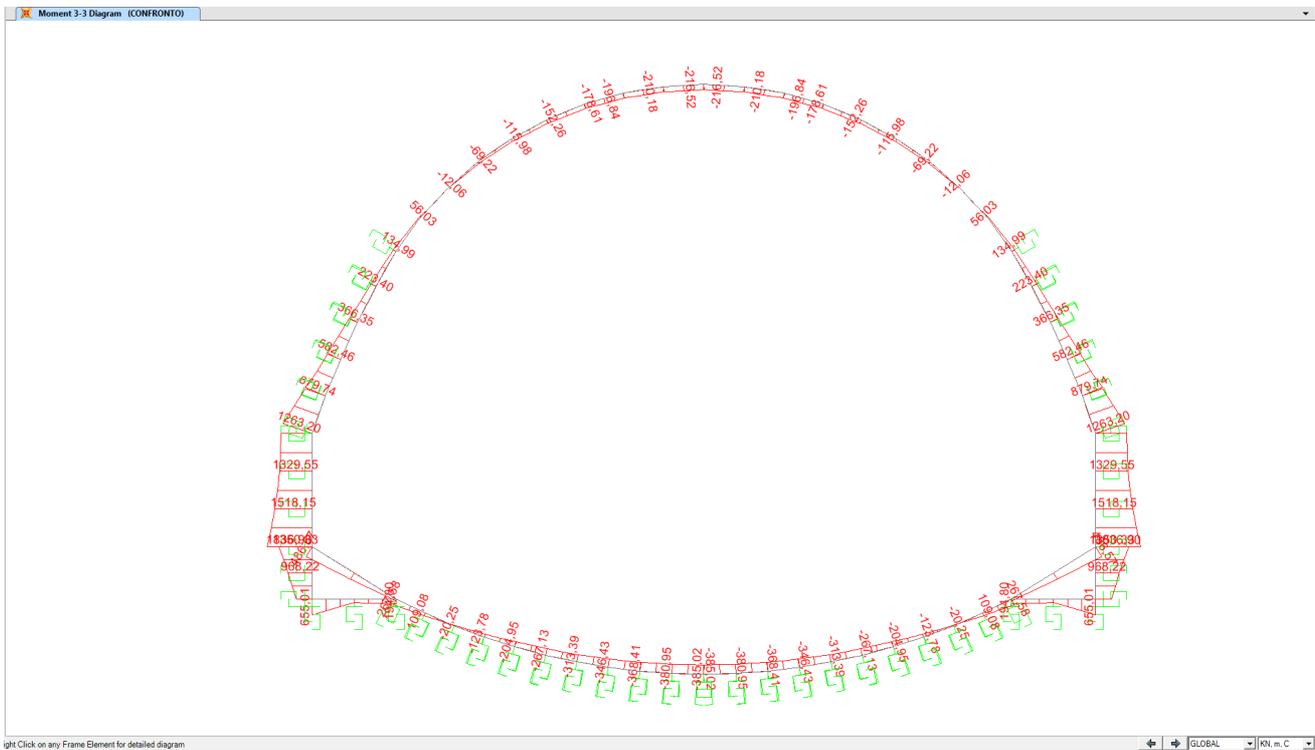


Figura 24 – Momento flettente

5.2. “Fase 1”: Analisi accoppiata termo-meccanica

Nel seguito vengono riportati i risultati delle analisi termiche agenti sul rivestimento definitivo della galleria in esame.

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 ai precedenti paragrafi per un ulteriore approfondimento sulle geometrie e sulla modellazione delle fasi costruttive effettuata nella “FASE 0”.

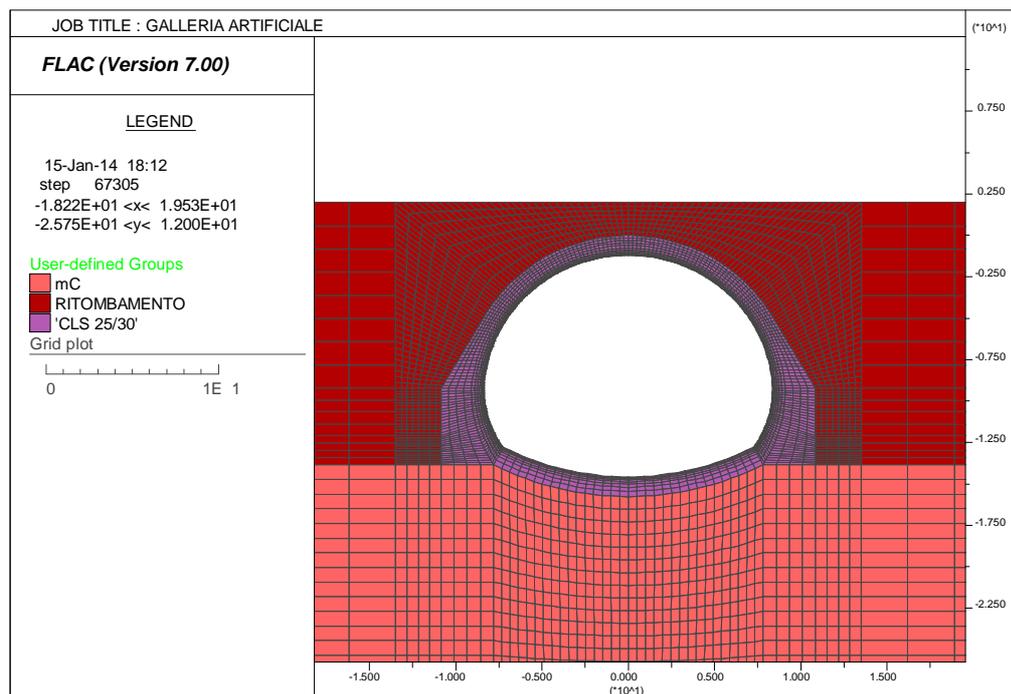


Figura 25 – Mesh di calcolo

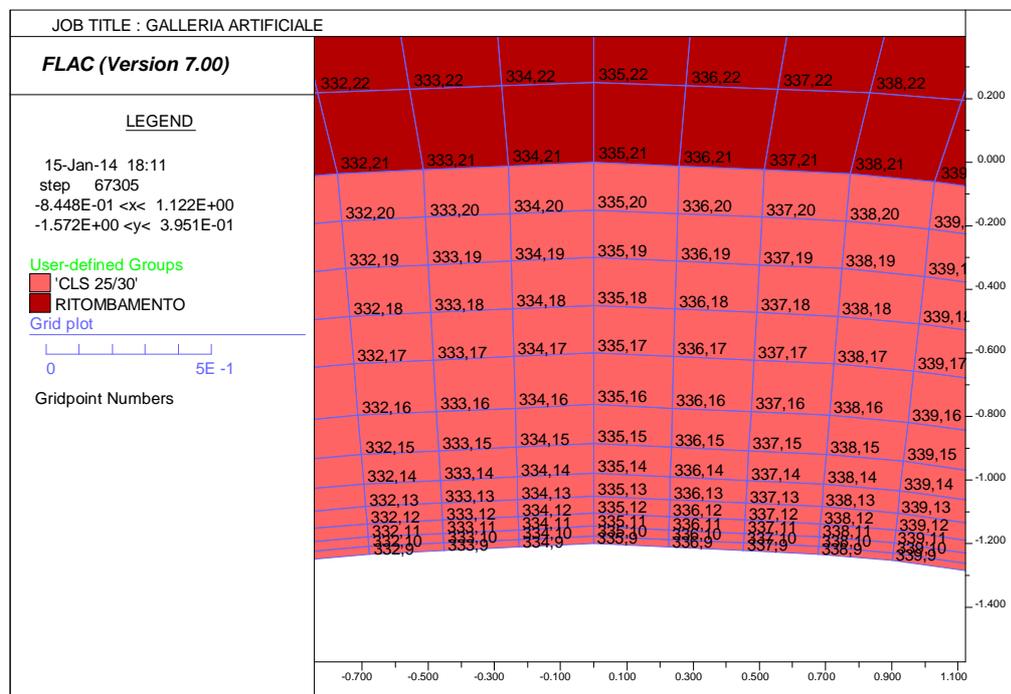


Figura 26 – Mesh di calcolo – Effetto dell’ “Aspect ratio” in intradosso

5.2.1. Distribuzione di temperatura

Nelle seguenti figure è rappresentato l’andamento della temperatura nello spessore del rivestimento della galleria artificiale (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.

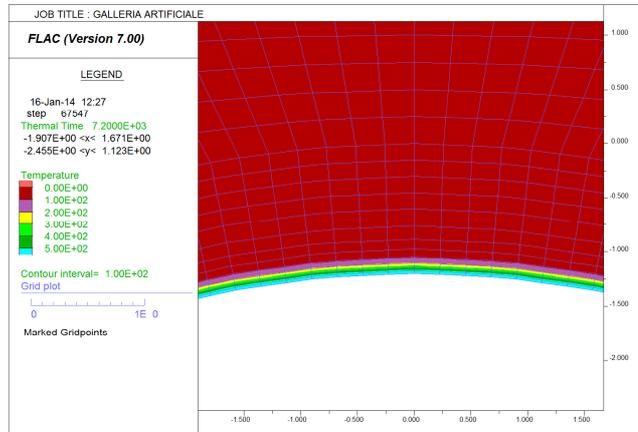
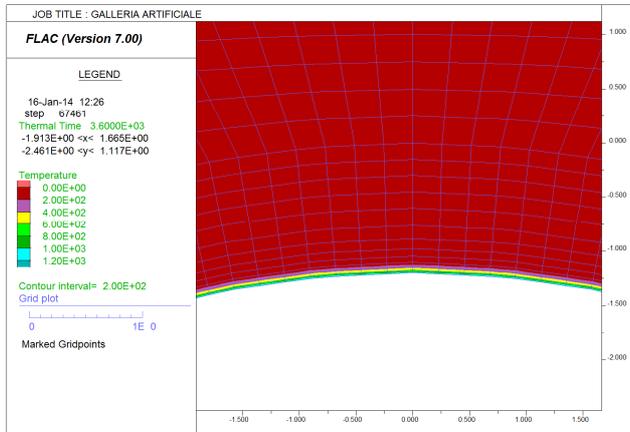


Figura 27 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA

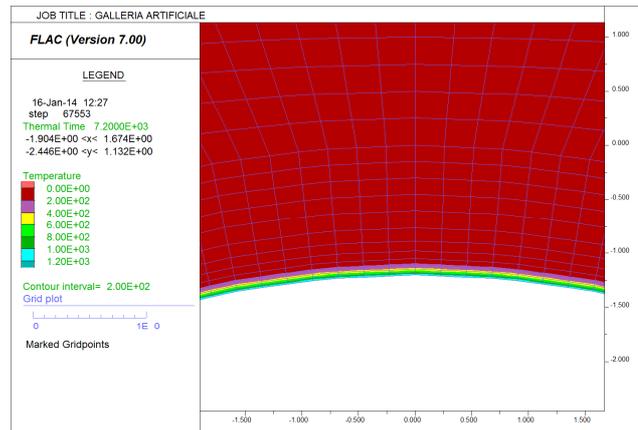
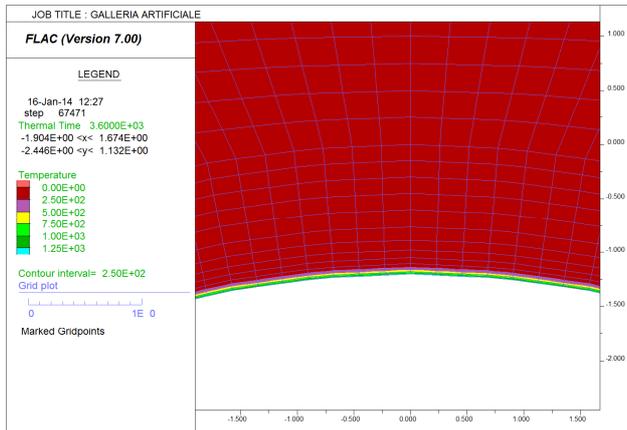


Figura 28 – Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva UNI11076

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	PUNTO	DISTANZA
[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]	[-]	[cm]
1	0	4	9,6	7	31,5	10	75
2	2,4	5	15	8	43,8	11	90
3	5,5	6	22,1	9	60	12	105

Si noti come aver adottato un "aspect ratio" tale da infittire la mesh di calcolo in prossimità dell'intradosso abbia portato ad avere una eccellente discretizzazione, con i primi strati di spessore pari a circa 2.5cm e via via crescenti all'interno della sezione.

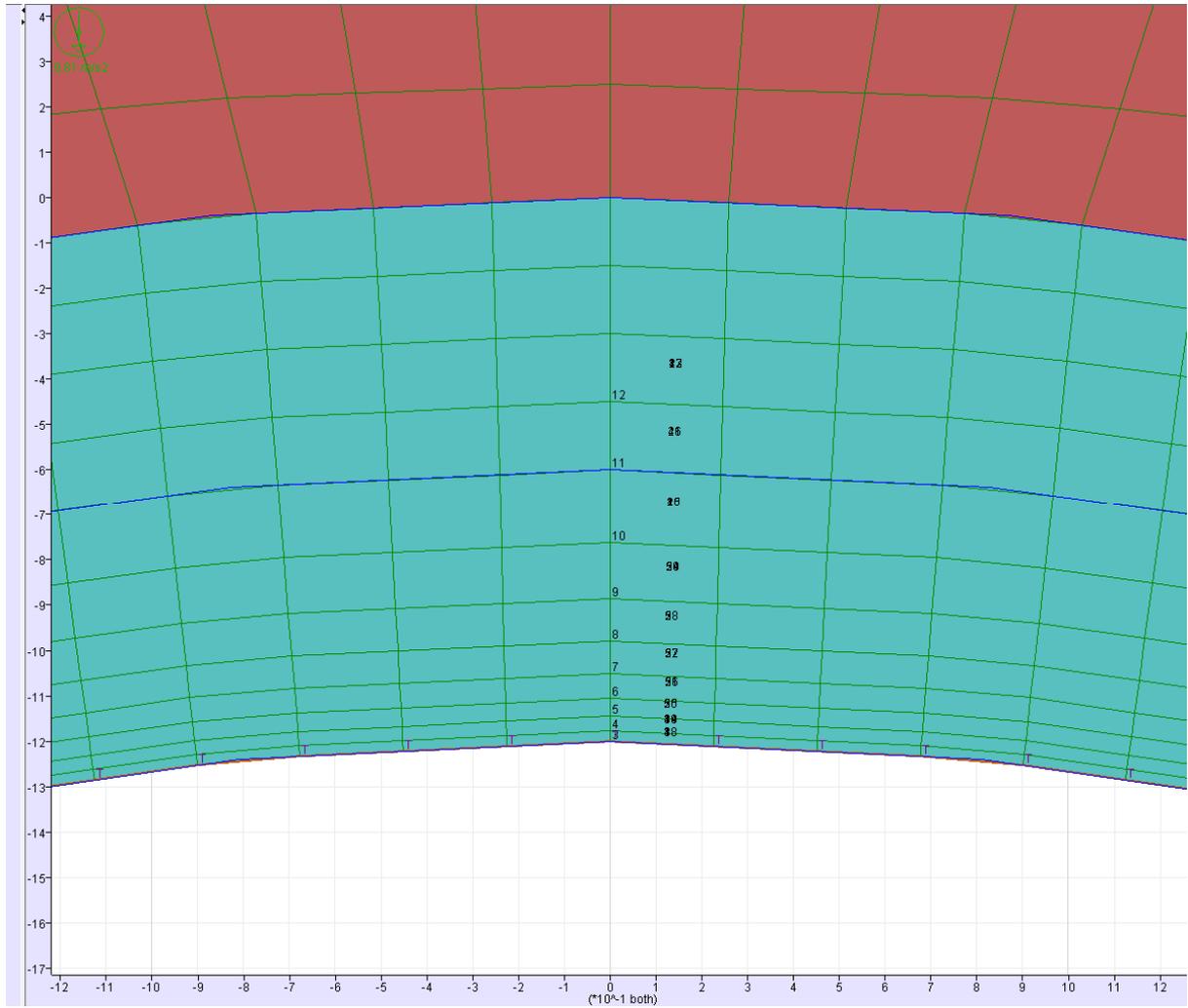


Figura 29 – Punti di controllo per l'evoluzione della temperatura e delle proprietà meccaniche

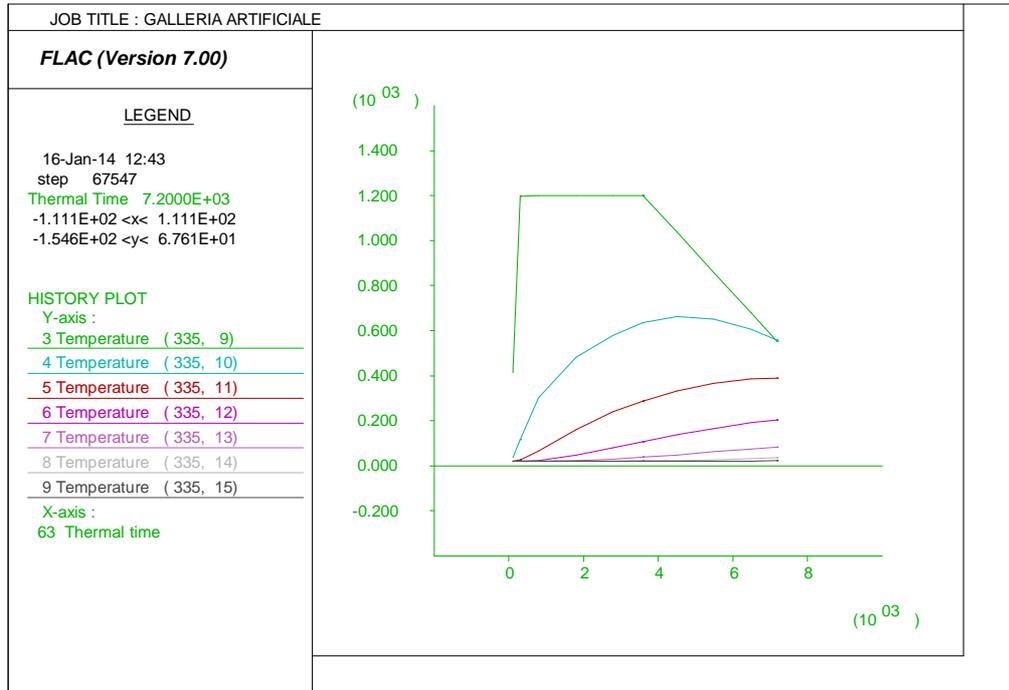


Figura 30 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA

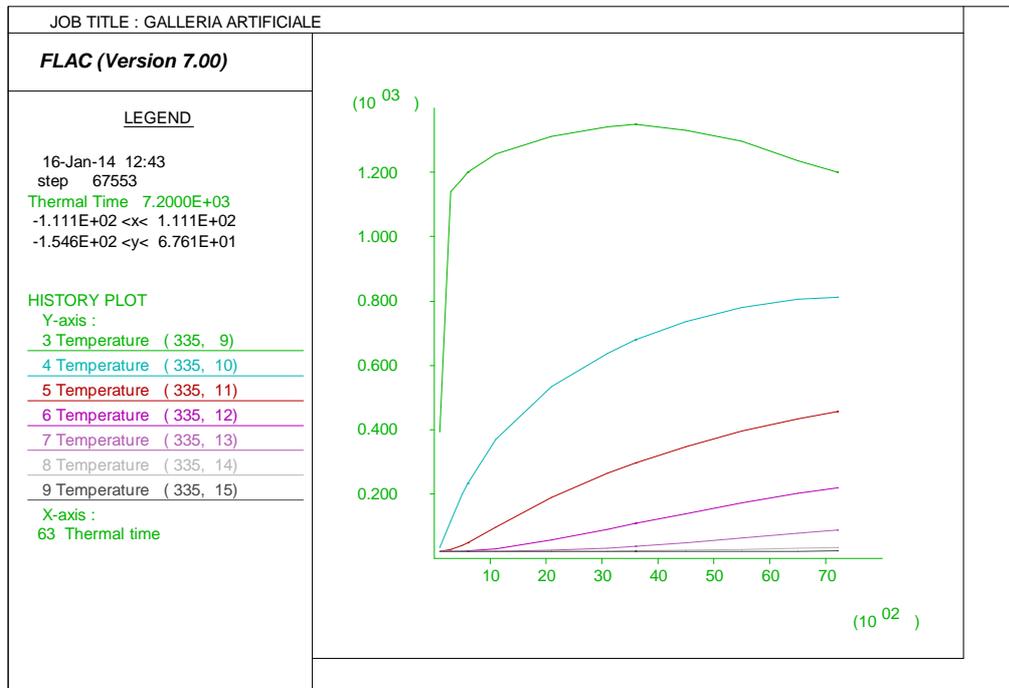


Figura 31 – Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva UNI11076

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) 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.

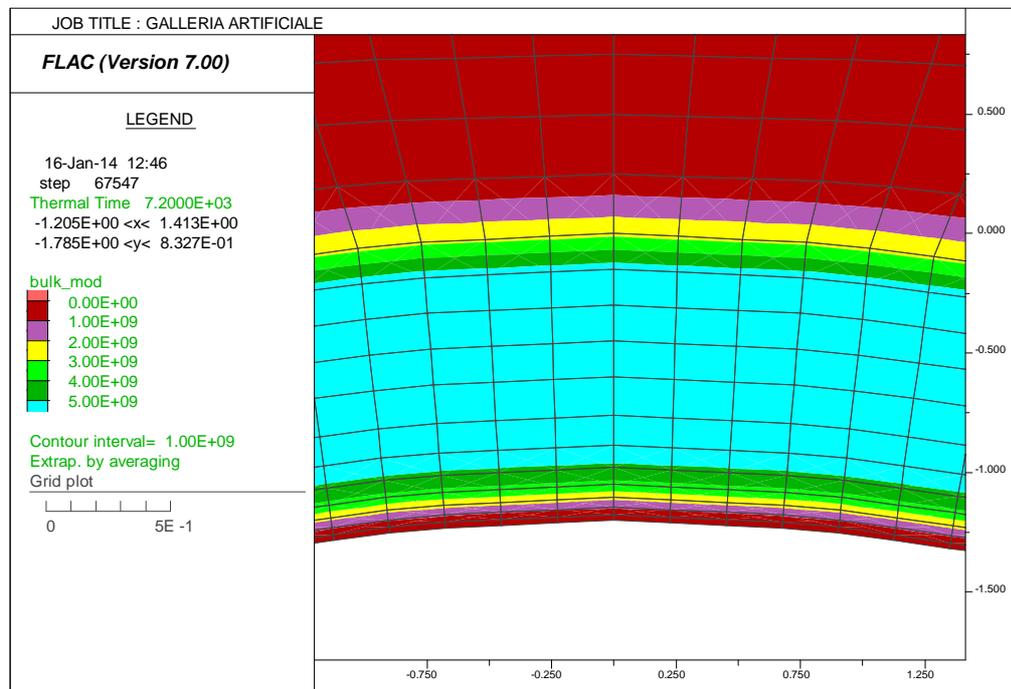


Figura 32 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA (120min)

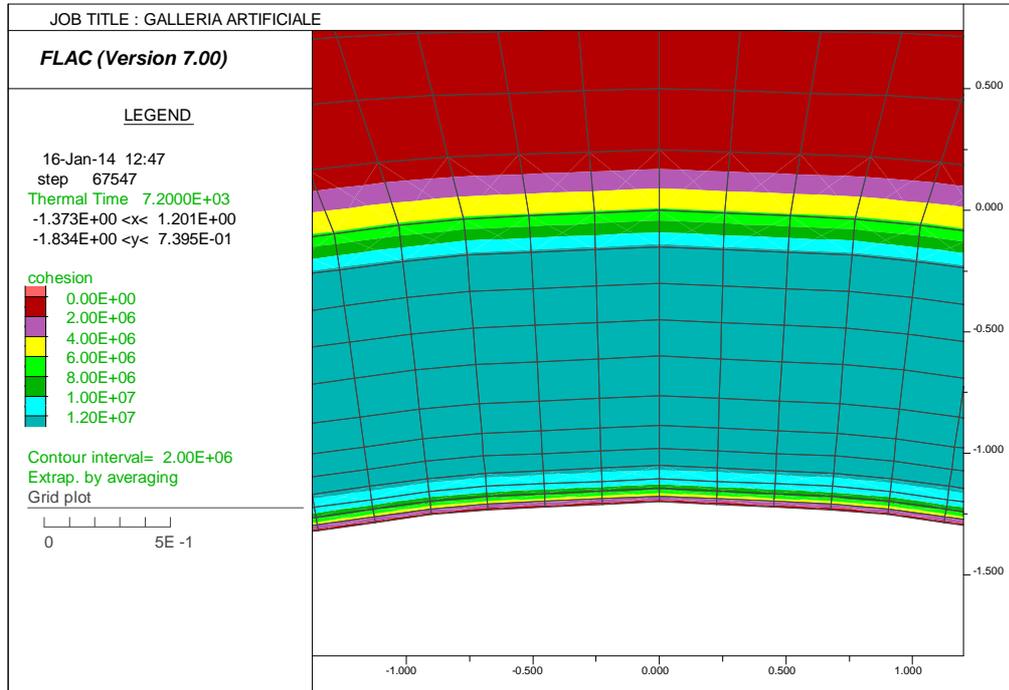


Figura 33 – Evoluzione della coesione c' – Curva EUREKA (120min)

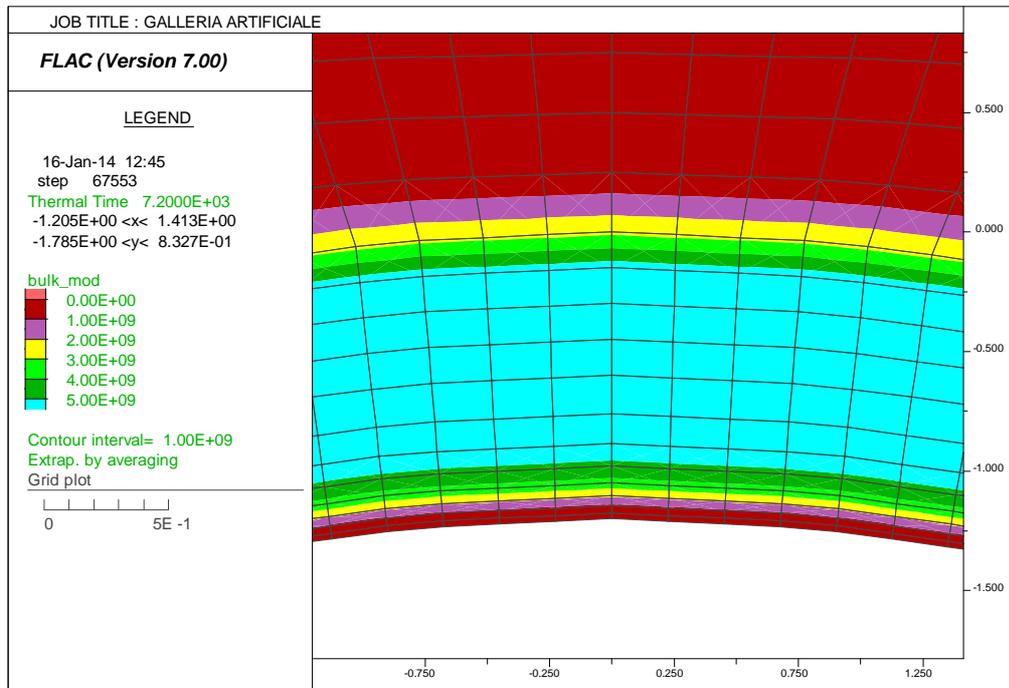


Figura 34 – Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076 (120min)

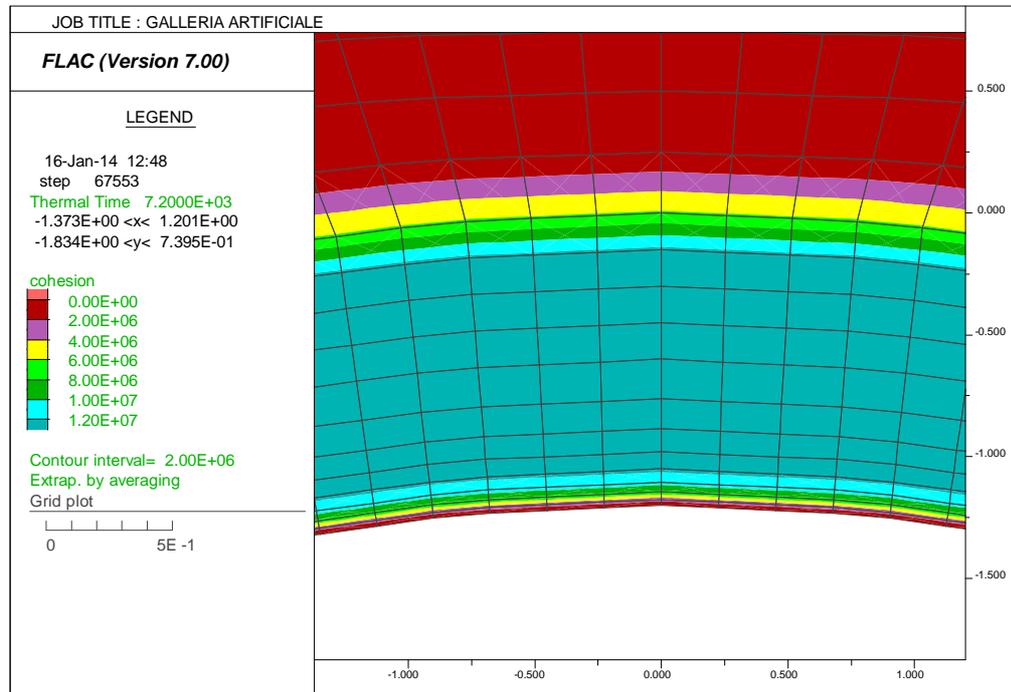


Figura 35 – Evoluzione della coesione c' – Curva UNI11076 (120min)

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

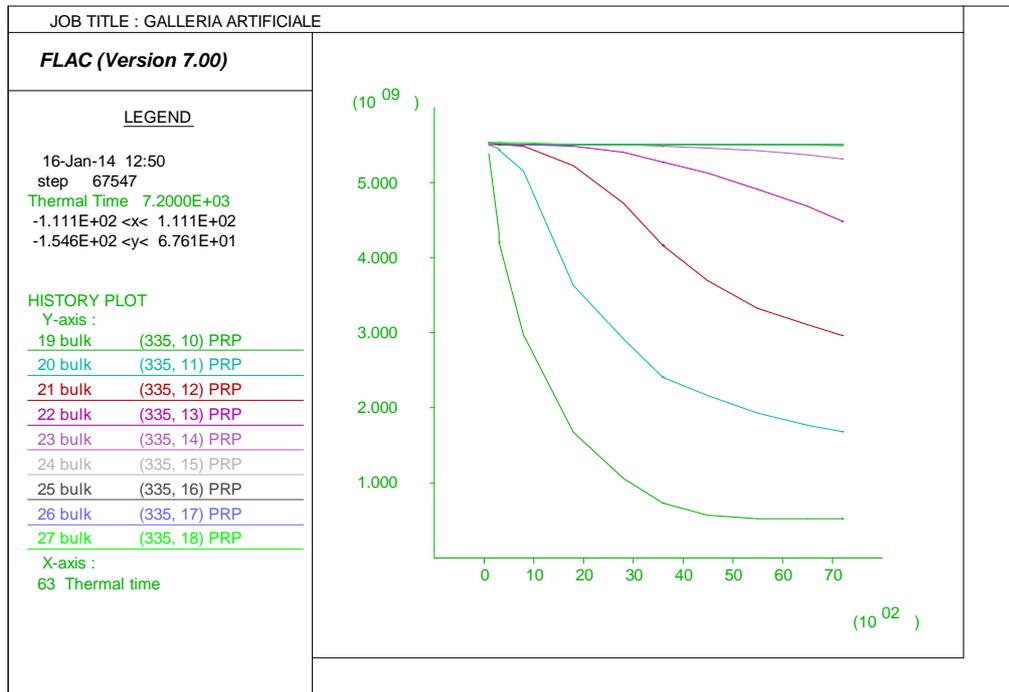


Figura 36 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA

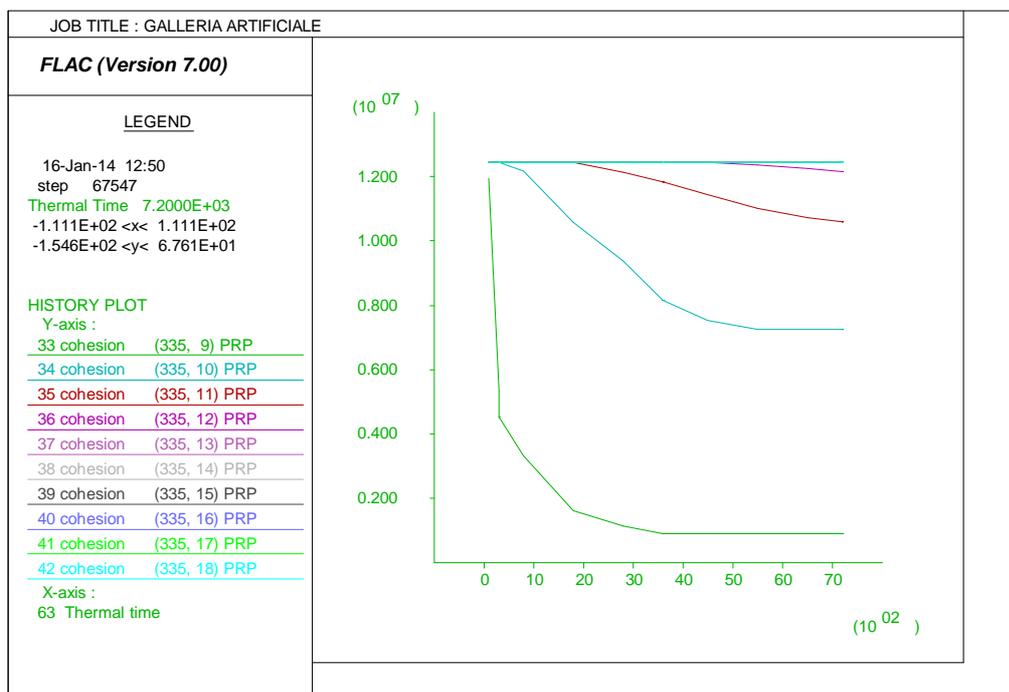


Figura 37 – Evoluzione del valore di coesione c' nel rivestimento – Curva EUREKA

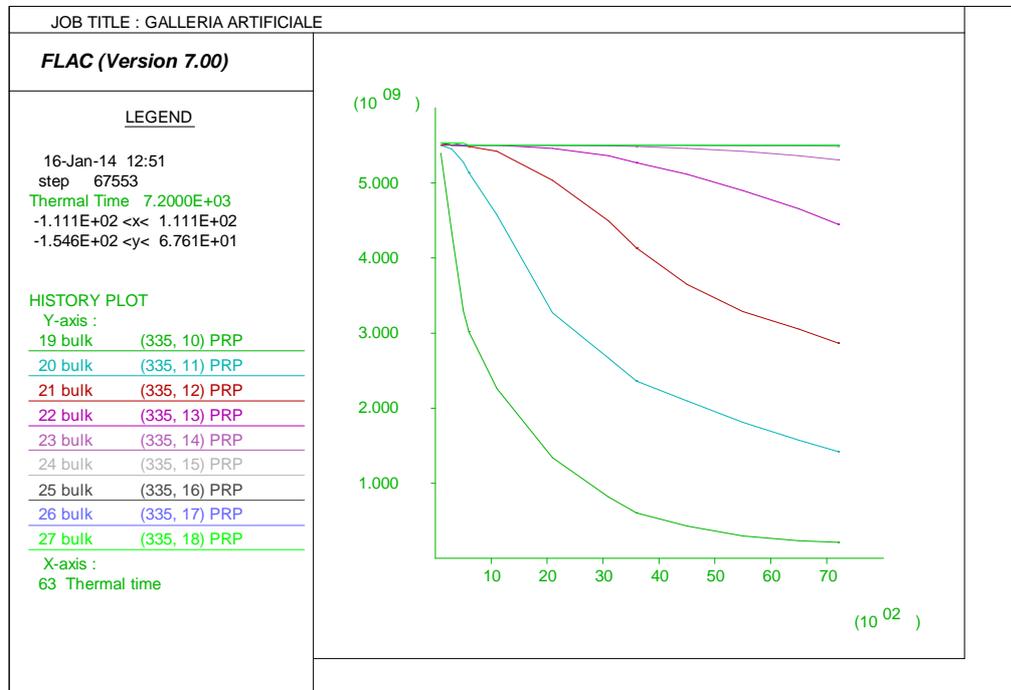


Figura 38 – Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva UNI11076

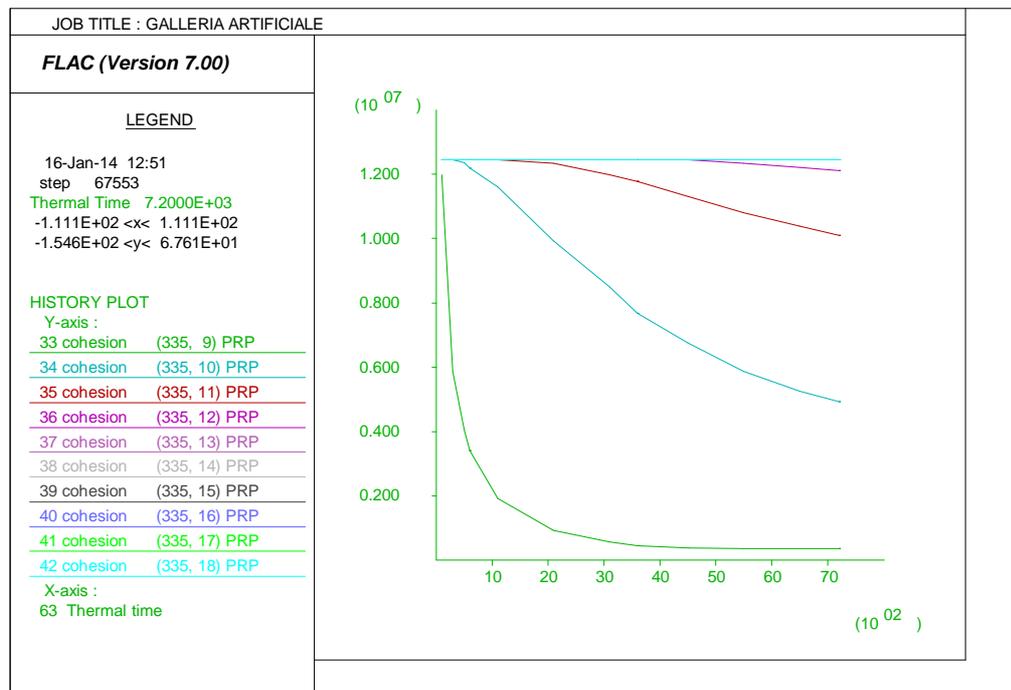


Figura 39 – Evoluzione del valore di coesione c'nel rivestimento – Curva UNI11076

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 286"> <tr> <td>Foglio 41 di 61</td> </tr> </table>	Foglio 41 di 61
Foglio 41 di 61		

5.2.3. Stati tensionali e deformativi

Nelle seguenti figure sono presentati gli stati tensionali e deformativi all'interno della struttura 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 ("FASE 0"). A causa delle deformazioni termiche e dell'evoluzione del modulo elastico nella sezione, per tutto il rivestimento esposto al fuoco si ottengono, nella zona di estradosso, degli sforzi di trazione. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica: le azioni geostatiche dovute al ritombamento non sono infatti tali da contrastare i fenomeni espansivi della struttura. Al contrario, lo sviluppo del calore comporta generalmente una concentrazione di sforzi di compressione nei primi strati in intradosso, la cui distribuzione è fortemente correlata non solo alle variazioni termiche ma anche 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 stata applicata direttamente la curva di incendio, lo stato tensionale rimane qualitativamente più 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) e si nota un'espansione della struttura verso l'alto. Unicamente il primo strato in intradosso, a diretto contatto con l'incendio, ha indicato spostamenti di ordine centimetrico verso l'interno della galleria a causa del forte decadimento delle proprietà meccaniche .

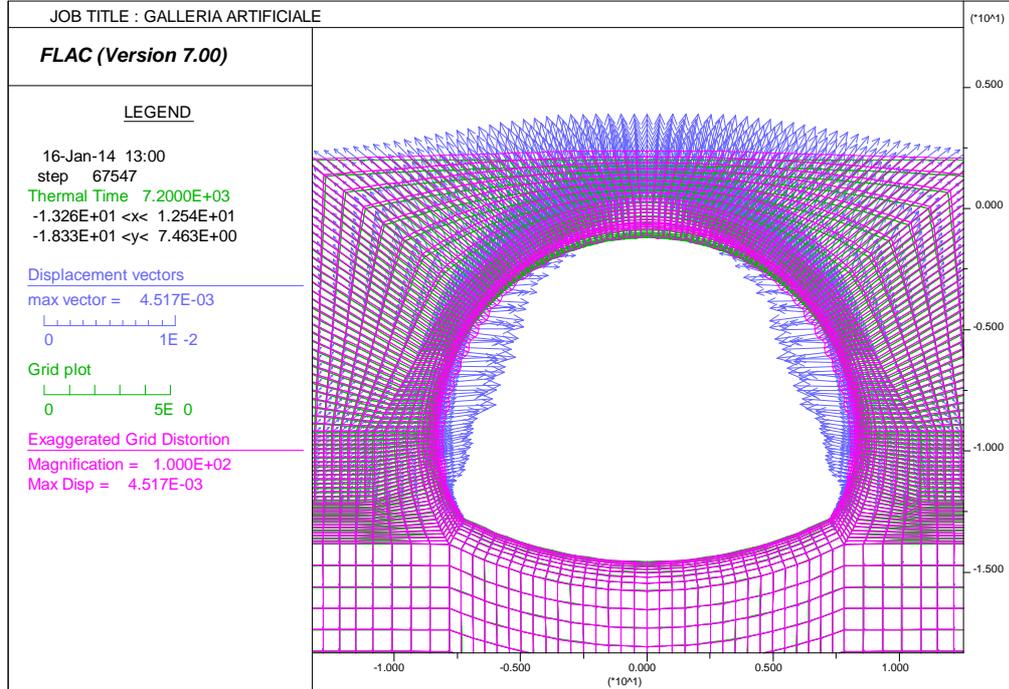


Figura 40 – Deformata – Curva EUREKA – t = 120 min

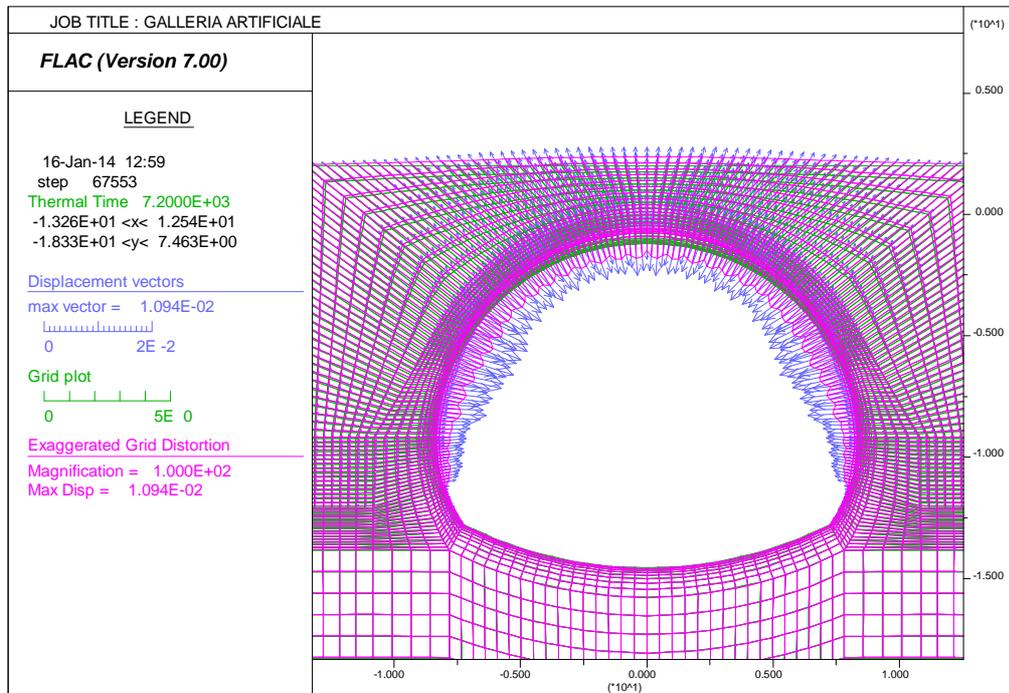


Figura 41 – Deformata – Curva UNI 11076 – t = 120 min

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

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

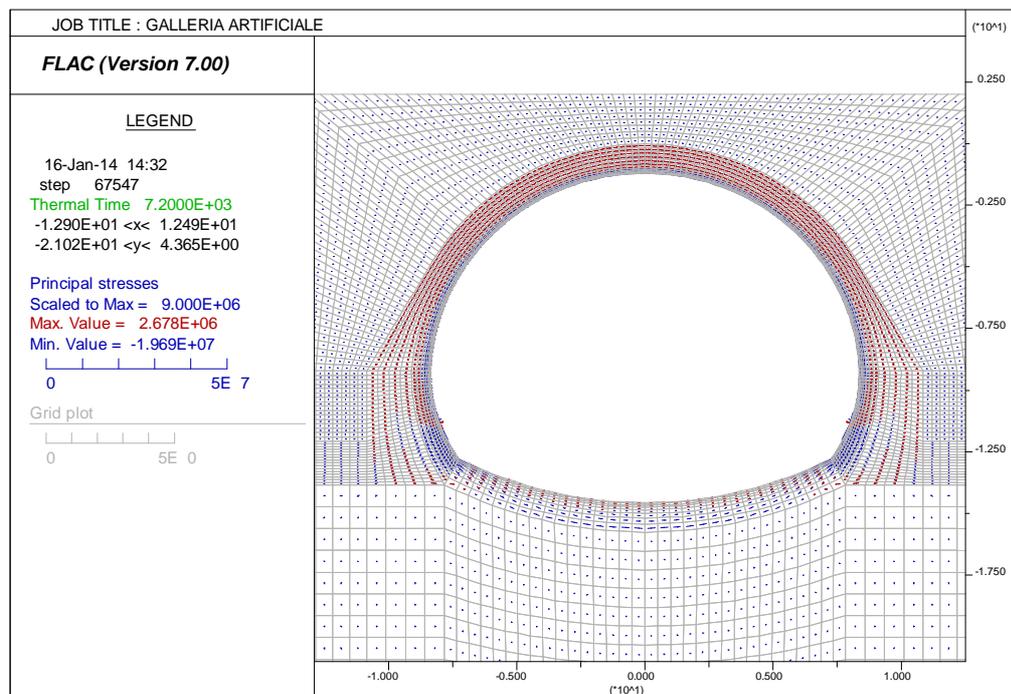


Figura 42 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

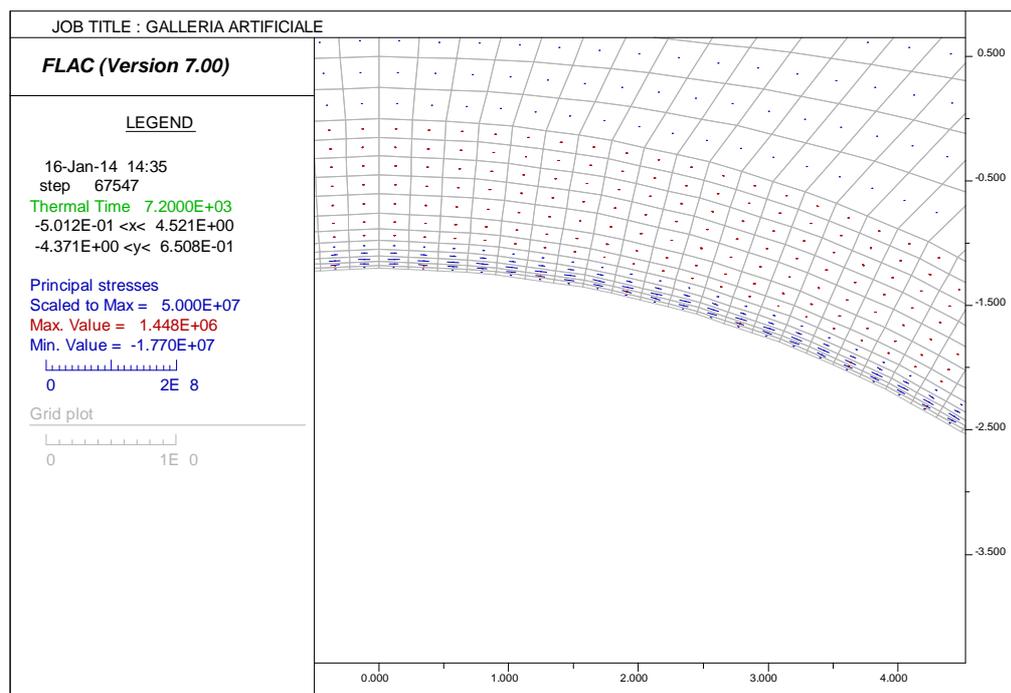


Figura 43 – Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 120 min

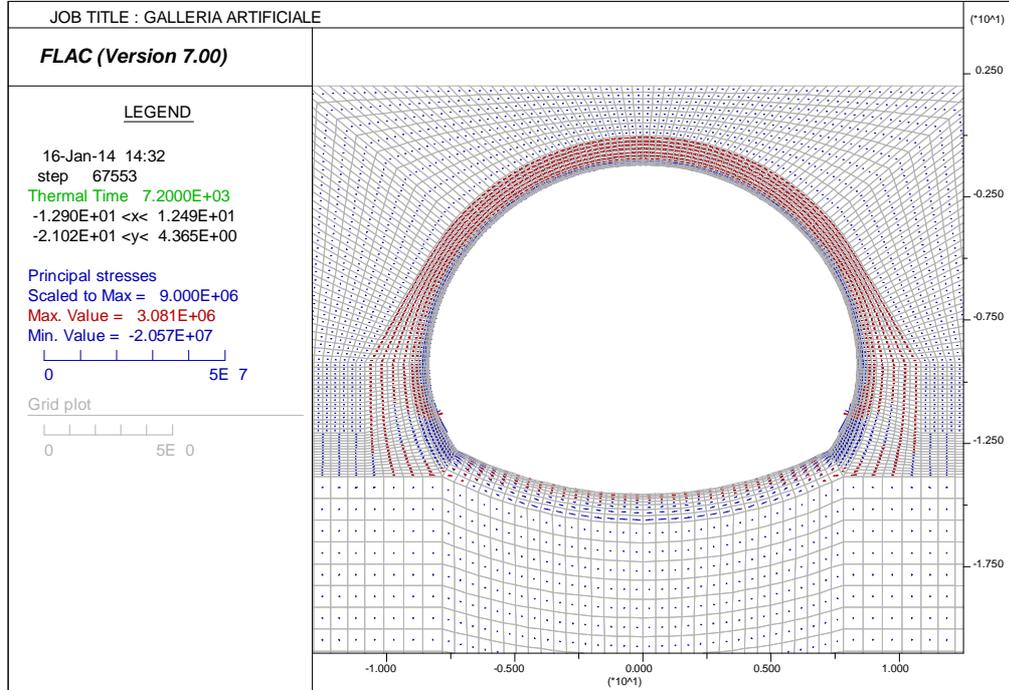


Figura 44 – Stato tensionale – Curva UNI 11076 – t = 120 min

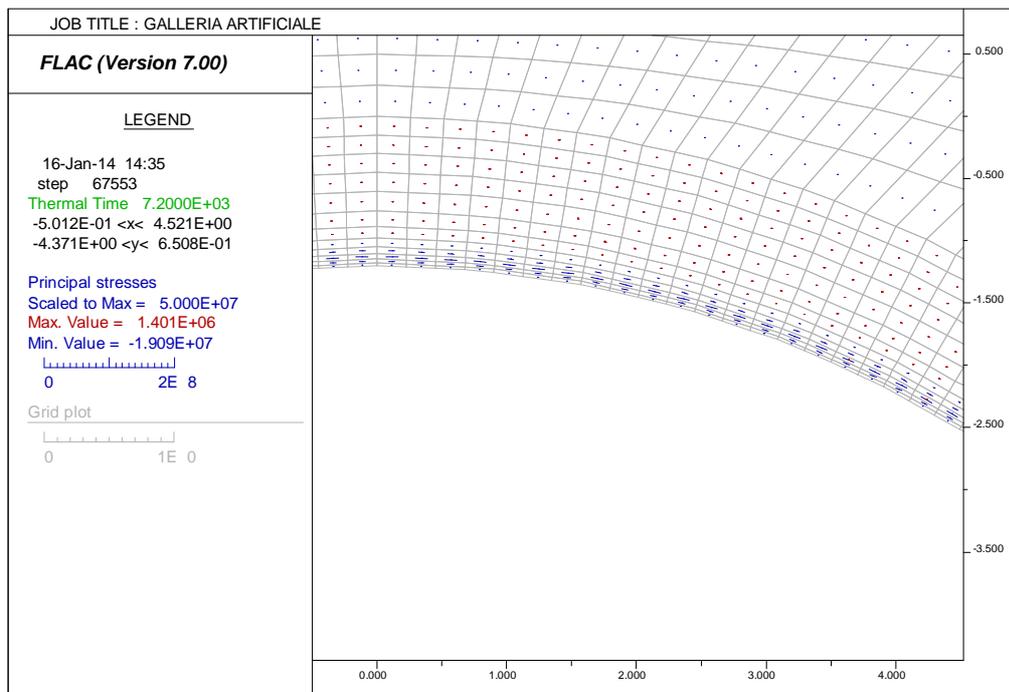


Figura 45 – Stato tensionale – Curva UNI 11076 – t = 120 min

Nella seguente immagine viene fornito un confronto tra lo stato tensionale nella sezione dopo 60 minuti e dopo 120 minuti. Le sollecitazioni in intradosso risultano pressochè costanti in tutta la zona soggetta all'azione diretta del fuoco, ovvero reni e calotta. Si mostrano le azioni in prossimità della calotta, dove si presenta la condizione di minimo spessore del rivestimento definitivo rispetto ai piedritti. Essendo il modello simmetrico sia a livello di carico che di geometria, le sollecitazioni risultano anch'esse perfettamente simmetriche. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a 120 minuti per entrambe le curve di temperatura considerate.

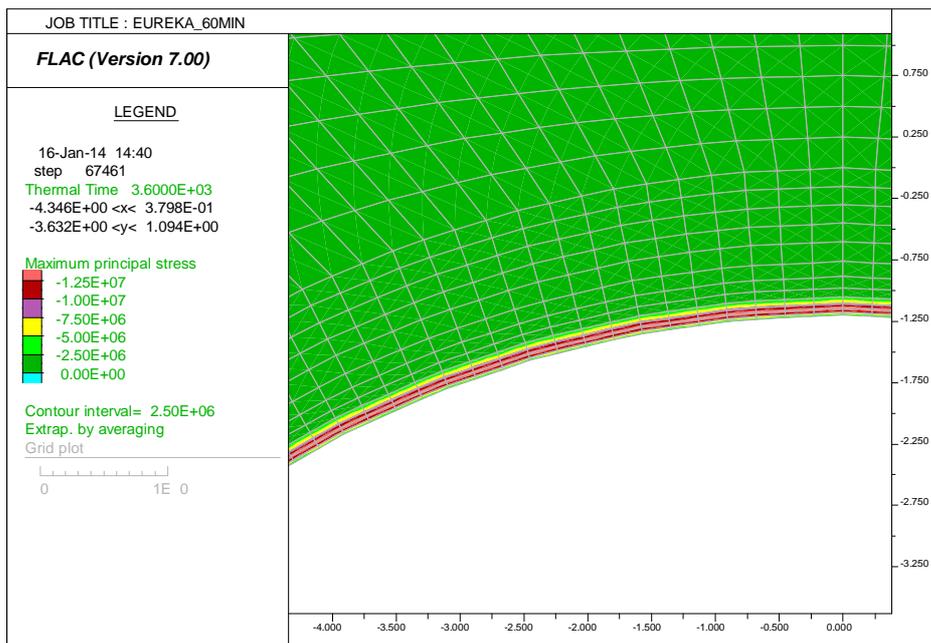


Figura 46 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 60 min

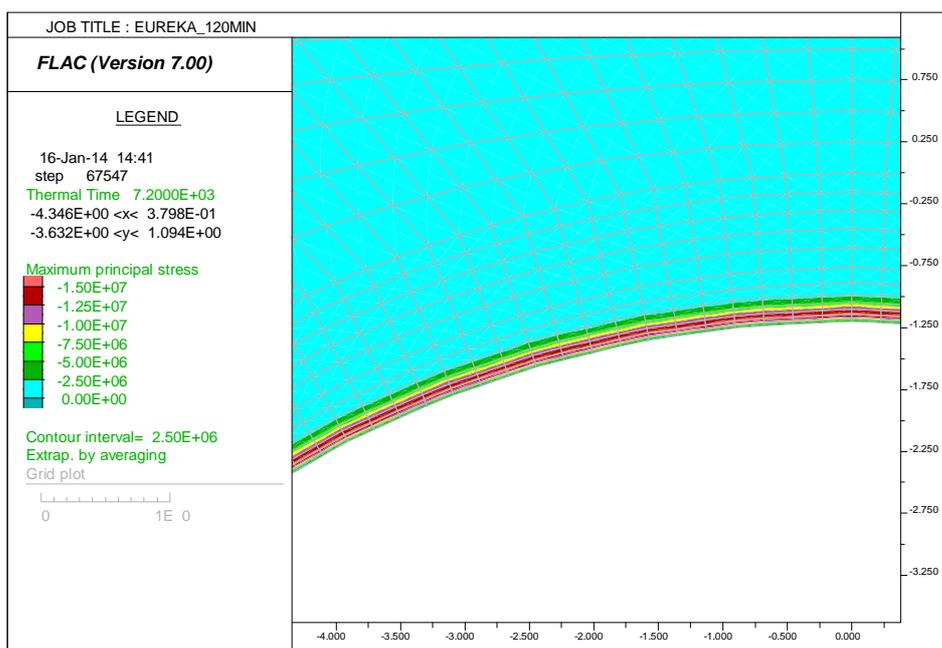


Figura 47 – Sigma 1 – Curva EUREKA – t = 120 min

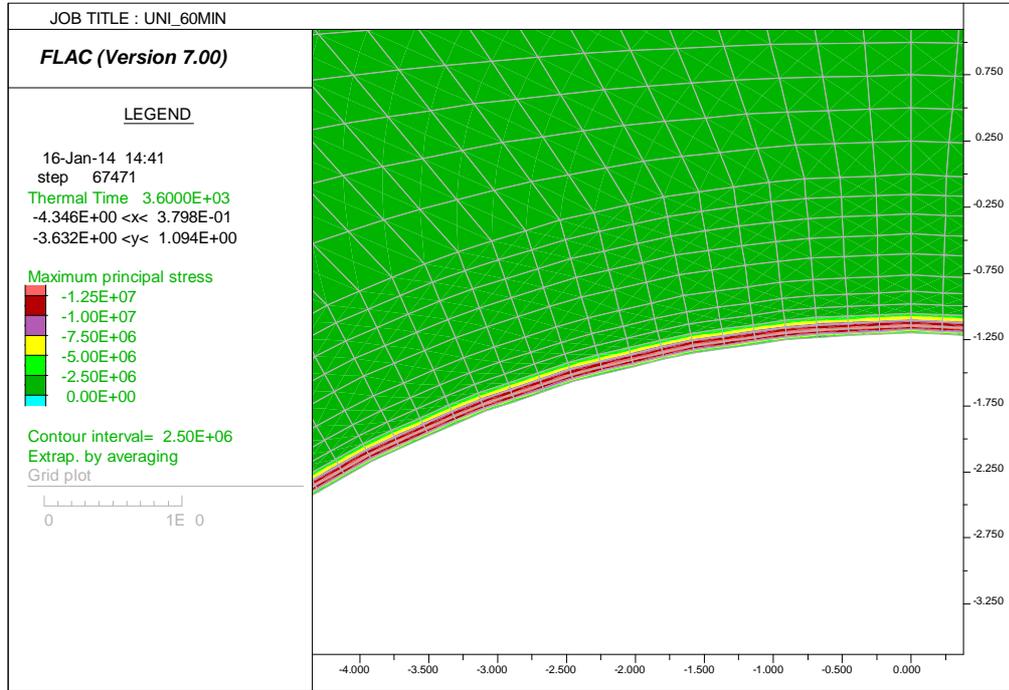


Figura 48 – Sigma 1 – Curva UNI11076 – t = 60 min

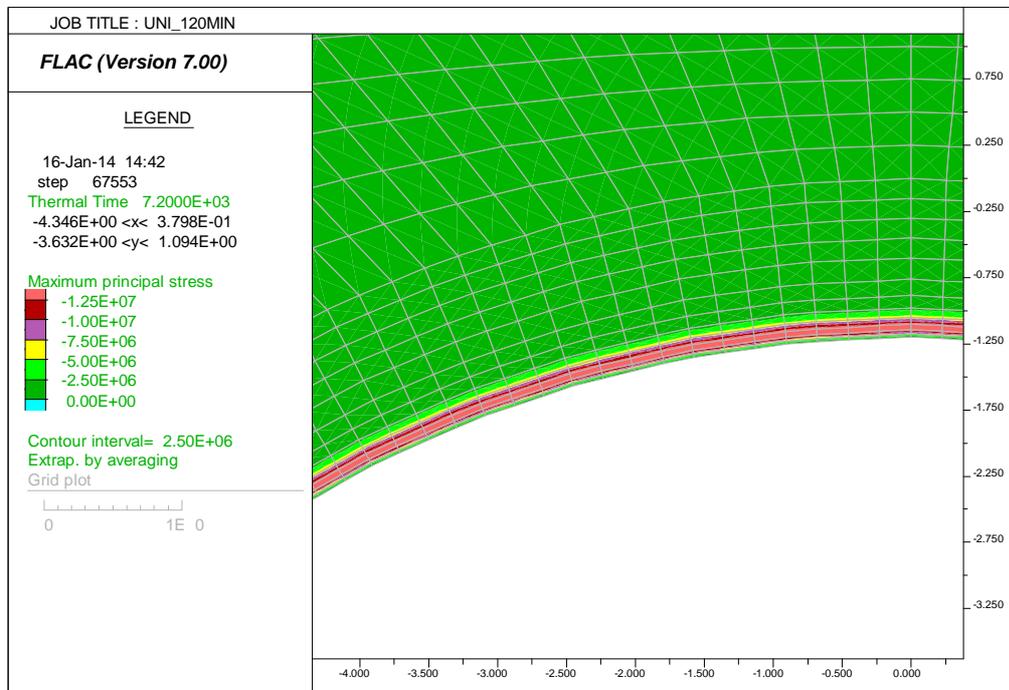


Figura 49 – Sigma 1 – Curva UNI11076 – t = 120 min

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 seguendo la metodologia indicata al paragrafo 4.5. Tali valori verranno verificati nel capitolo 6 effettuando verifiche "a caldo", ovvero tenendo in conto delle caratteristiche resistenti dei materiali al variare della temperatura.

Risultati delle analisi

Nel seguito sono stati riportati per via grafica gli andamenti delle azioni interne N e M. Si noti come l'applicazione del carico termico abbia comportato in chiave calotta 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 la seguente convenzione di segni:

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

I valori registrati mediante l'applicazione delle due curve sono assolutamente comparabili; in entrambe le simulazioni si sono valutate azioni assiali variabili tra 700 KN in chiave calotta e 2000 KN in corrispondenza dei piedritti (si noti che lo spessore varia tra 1.2m a circa 2.8m), mentre i momenti flettenti variano tra circa 1000 KNm a 2700 KNm.

Nelle immagini seguenti si diagrammano le azioni ottenute sia per la curva di incendio "EUREKA" che "UNI11076" impiegando la medesima scala ai fini di consentire il confronto grafico.

In entrambi i casi, effettuando l'analisi con le coppie M/N per tutti i punti della galleria, si sono individuate le due sezioni maggiormente critiche.

- Sezione 1: Massima tensione nell'acciaio in estradosso indipendentemente dallo spessore della sezione in c.a. (tale condizione si verifica in corrispondenza delle reni della galleria)
- Sezione 2: Massima tensione nell'acciaio in estradosso in corrispondenza della zona di calotta (minima altezza della sezione)

Le due situazioni critiche individuate verranno nel seguito verificate, considerando il dominio resistente "a caldo", ai fini del dimensionamento della struttura in condizioni di incendio.

Sezione	Curva	Tempo	H	N	M
[-]	[-]	[min]	[m]	[kN]	[kNm]
1	EUREKA	120	1.28	-1092	1480
	UNI	120	1.28	-1079	1419
2	EUREKA	120	1.2	-701	1086
	UNI	120	1.2	-700	1045

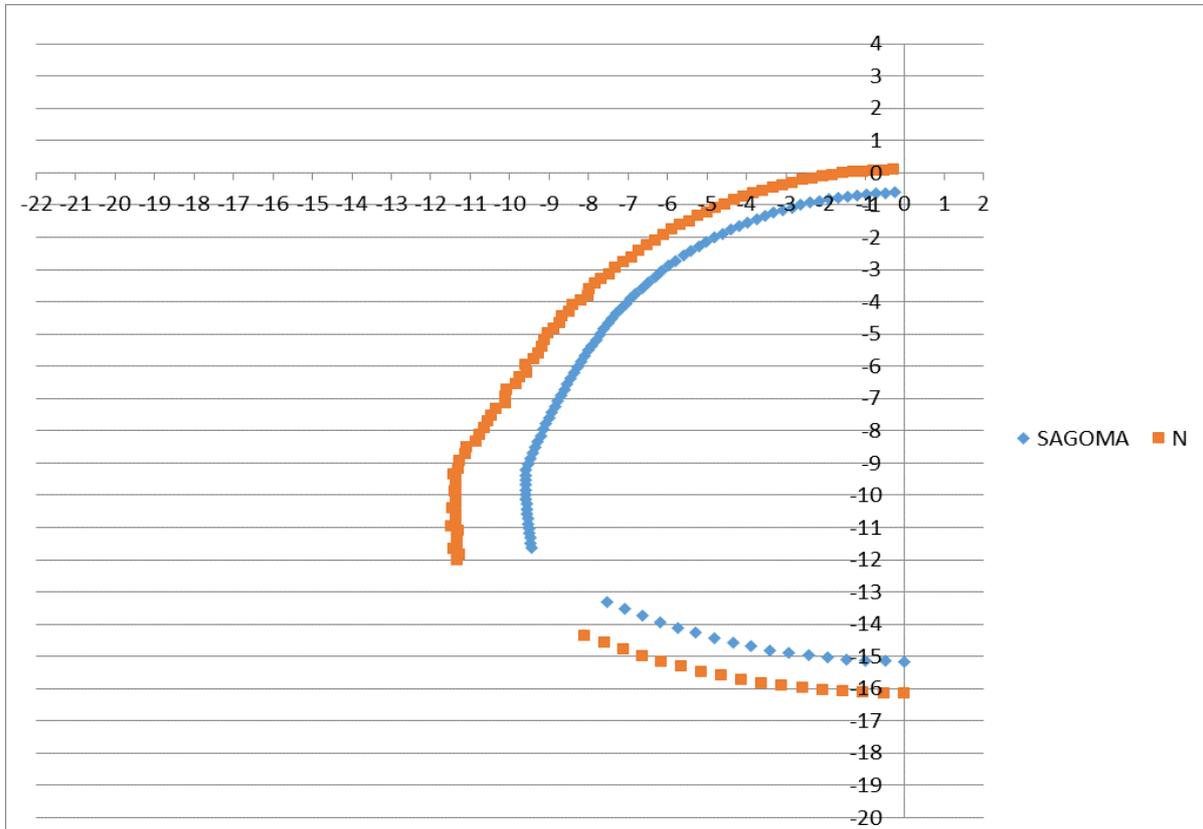


Figura 50 – Azione assiale – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=1000KN)

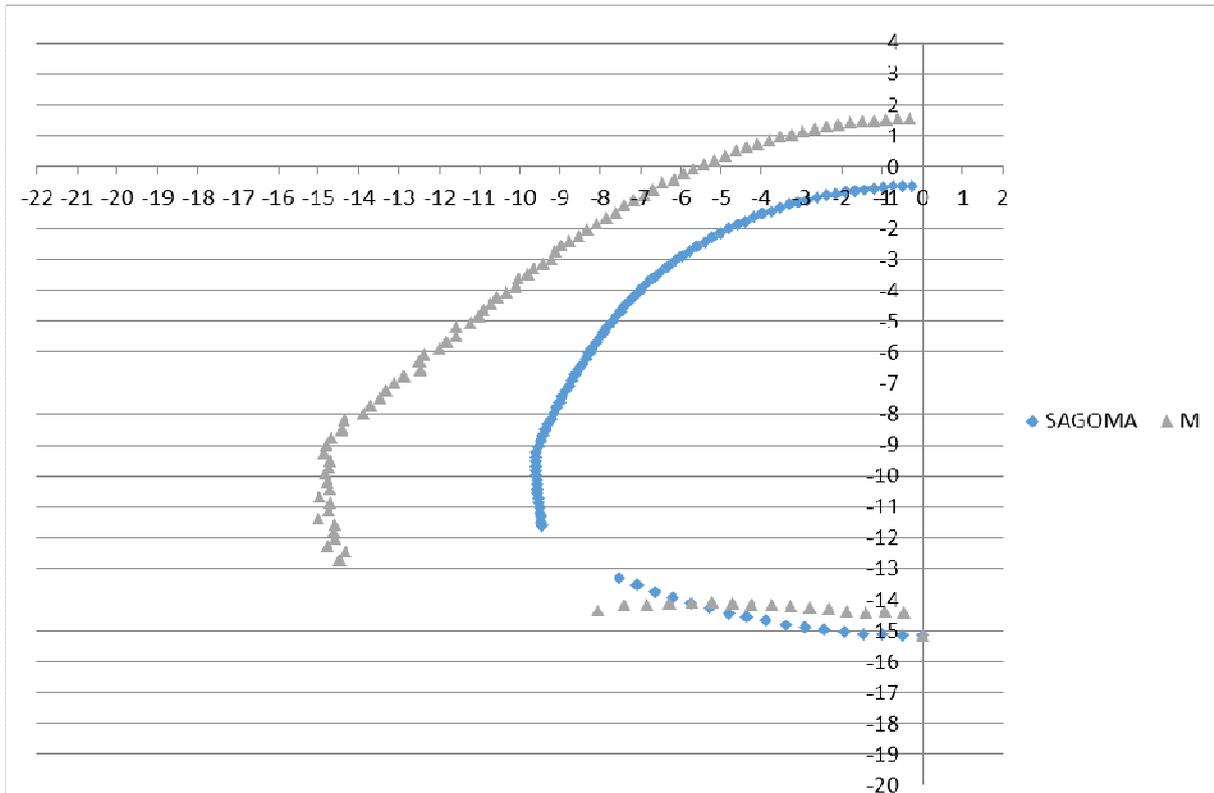


Figura 51 – Azione flettente – Curva EUREKA – t = 120 min (Scala 1m=500KNm)

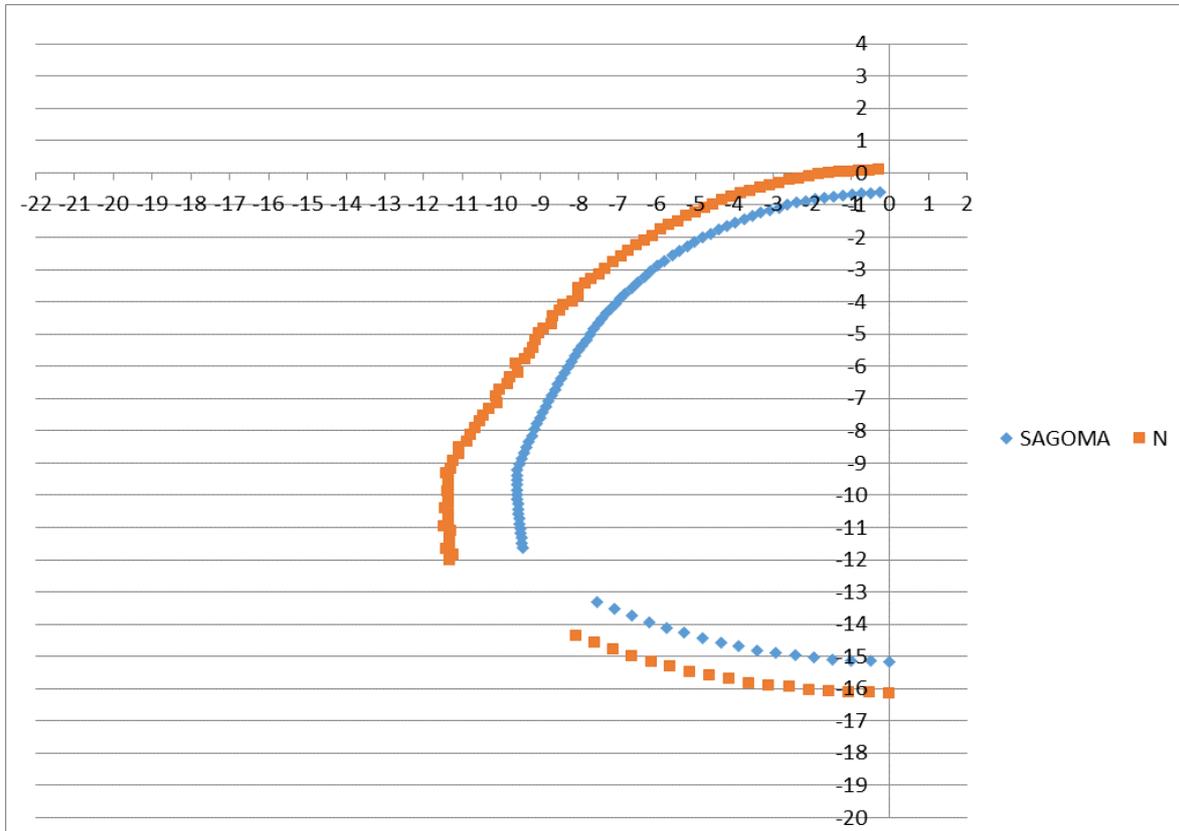


Figura 52 – Azione assiale – UNI11076– t = 120 min (Scala 1m=1000KN)

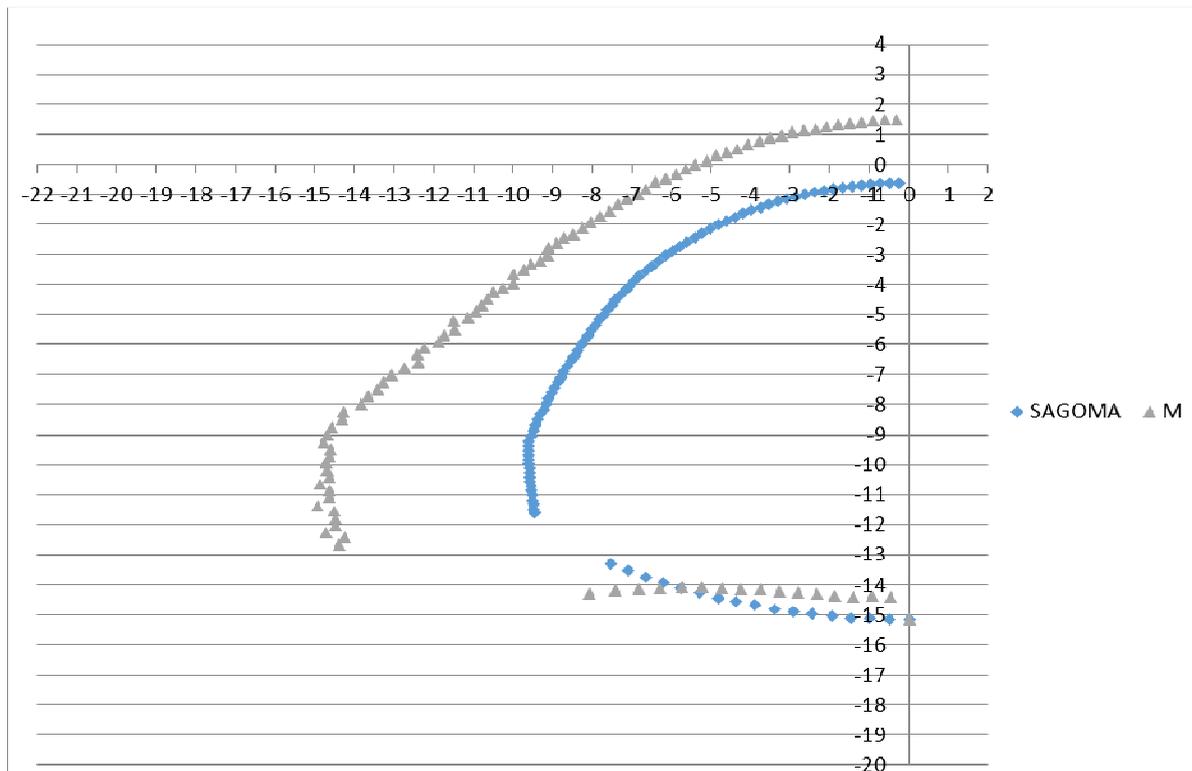


Figura 53 – Azione flettente – UNI11076– t = 120 min (Scala 1m=500KNm)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 Foglio 50 di 61

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.

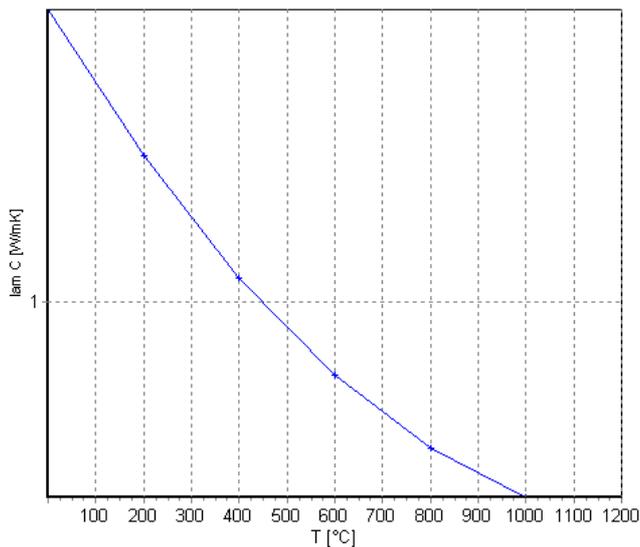


Figure 1: Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

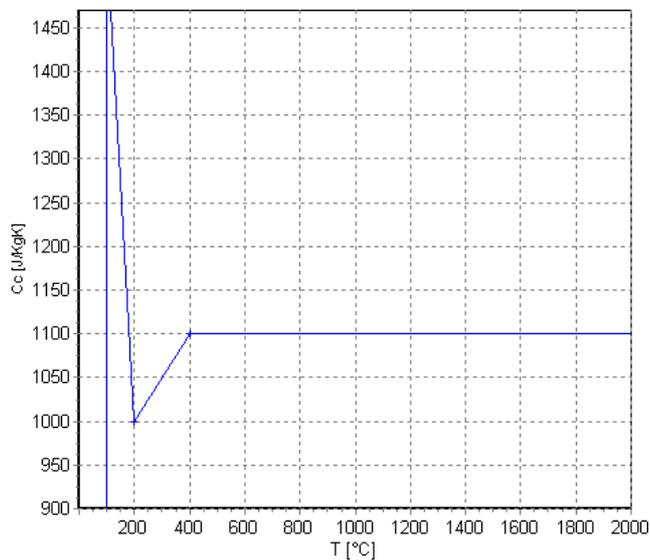


Figure 2: Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

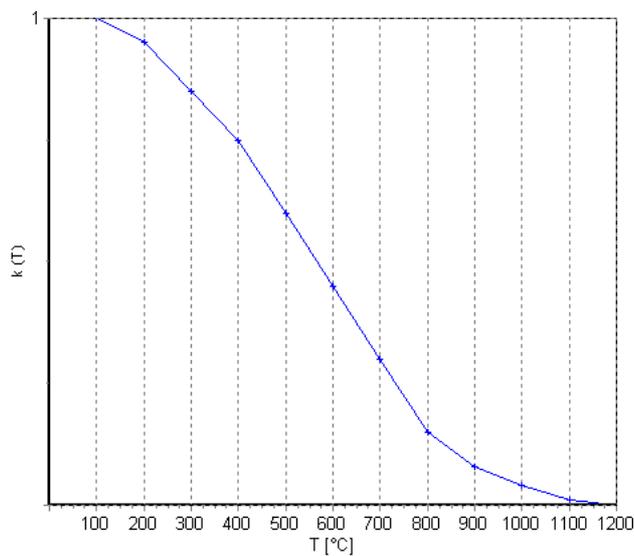


Figure 3: Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{ck} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

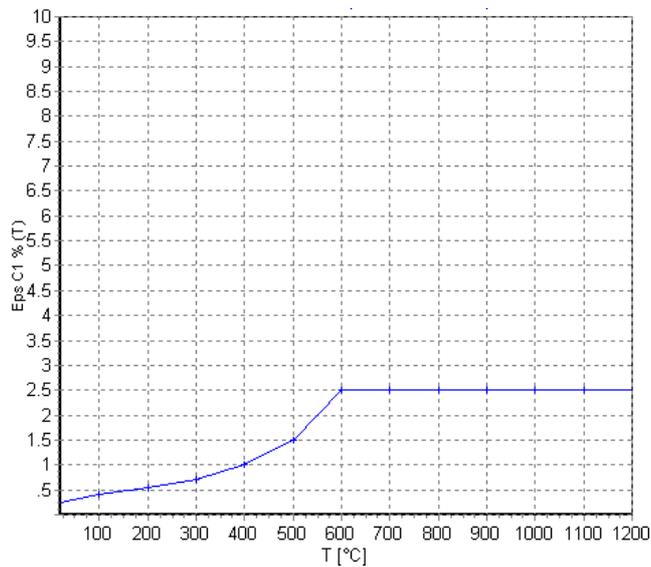


Figure 4: Fattore di riduzione del valore $di\epsilon_{c1}$ per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

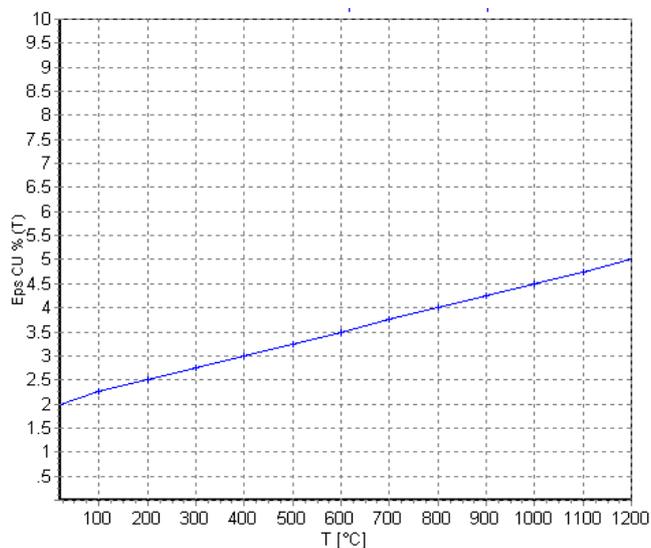


Figure 5: Fattore di riduzione del valore di ϵ_{cu} per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

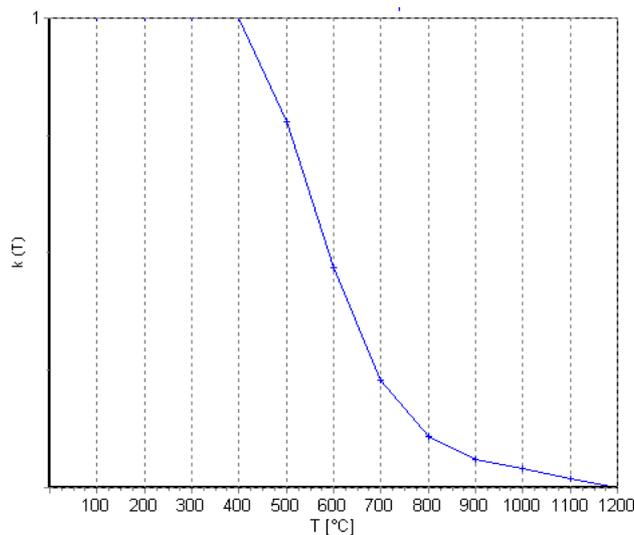
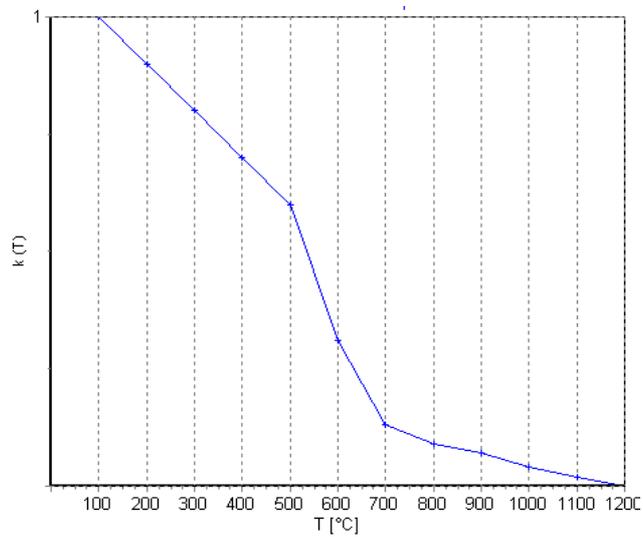


Figure 6: Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{yk} per per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)



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

6.4. Modello di calcolo e condizioni al contorno

La sezione di calcestruzzo è stata modellata utilizzando elementi finiti triangolari a sei nodi. Le condizioni più gravose si sono verificate in calotta e in corrispondenza dei reni, dove i rivestimenti hanno spessore minimo pari a 120cm; le sollecitazioni verranno verificate sulla sezione di altezza minima in tale settore. La sezione tipica di verifica ha quindi base 100 cm ed altezza pari a 117cm eliminando 3cm in intradosso. Questo accorgimento è stato fatto, a favore di sicurezza, per tenere in conto dei fenomeni di espulsione di calcestruzzo che potrebbero avvenire alle alte temperature: l'ipotesi cautelativa è quindi che le fiamme, già dai primi istanti, possano lambire la struttura più internamente rispetto all'effettivo intradosso. L'armatura su entrambi i lati è costituita da $\Phi 24$ passo 20, con copriferro netto pari a 4 cm in estradosso e ridotto quindi a 2cm in intradosso, dove il copriferro è previsto pari a 5cm sulla sezione non ridotta.

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.

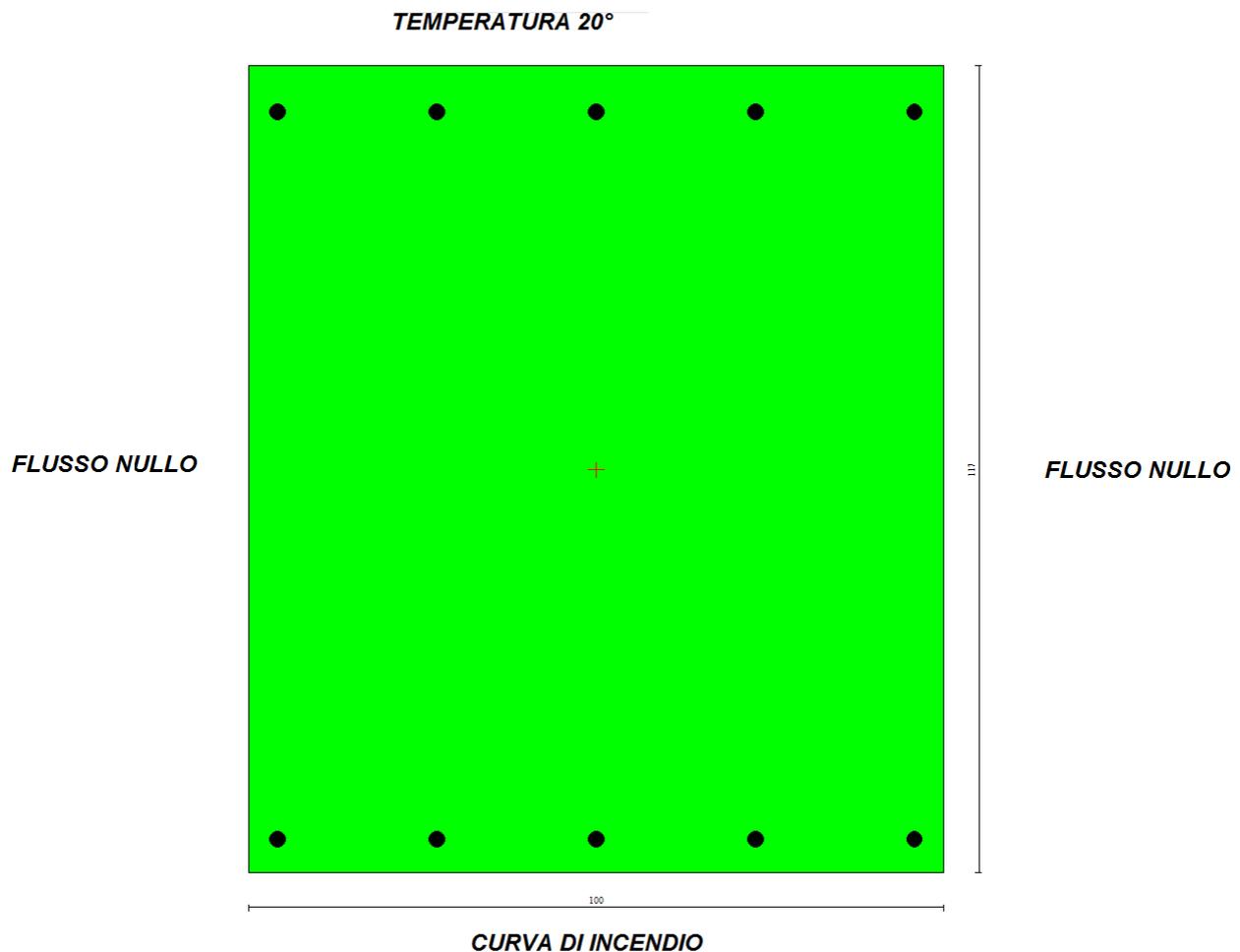


Figure 8: Schematizzazione della sezione e condizioni al contorno

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 286"> <tr> <td>Foglio 56 di 61</td> </tr> </table>	Foglio 56 di 61
Foglio 56 di 61		

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: il valore ottenuto è prossimo a 19 cm.

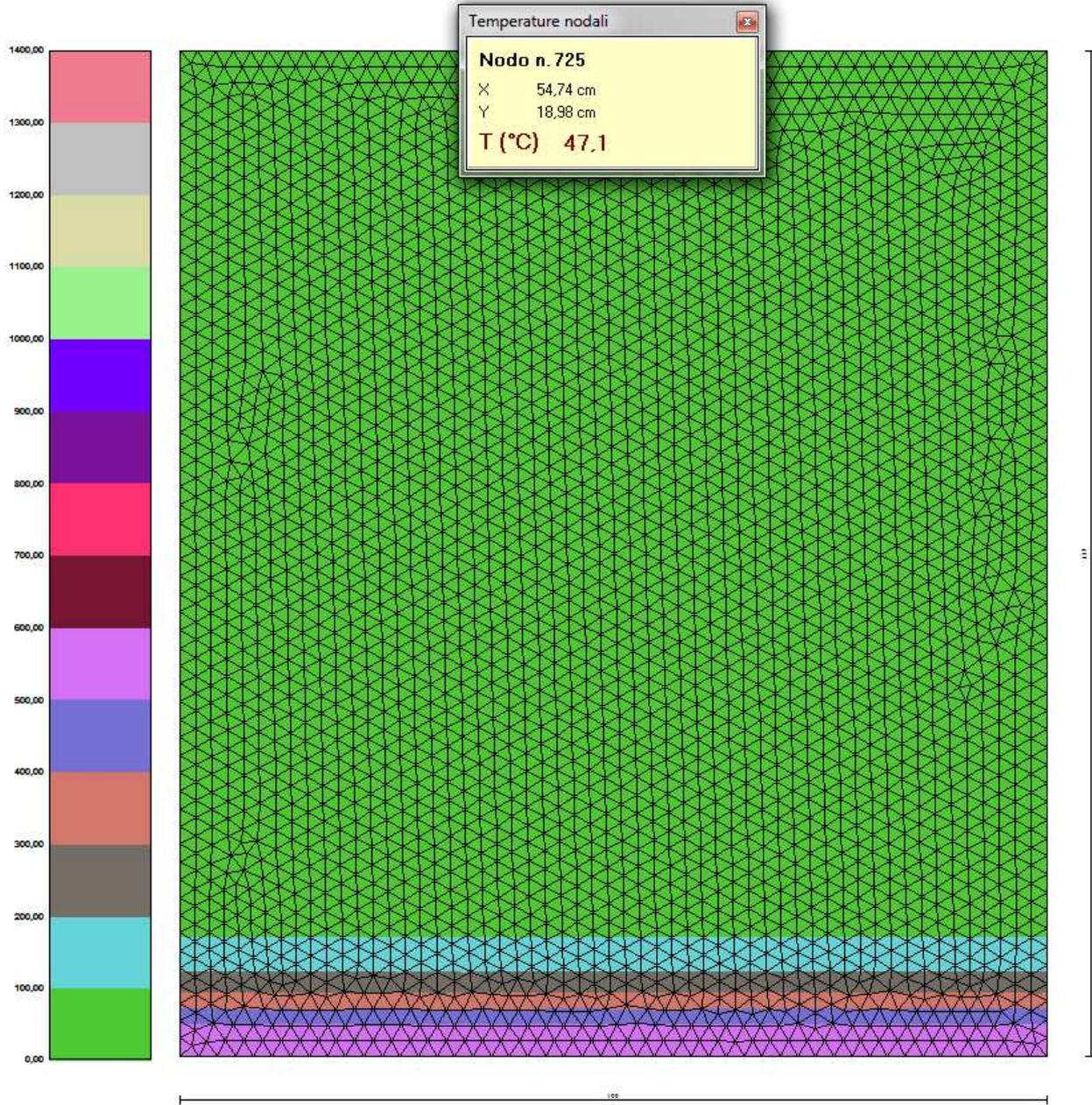


Figure 9: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (T=120 min curva EUREKA)

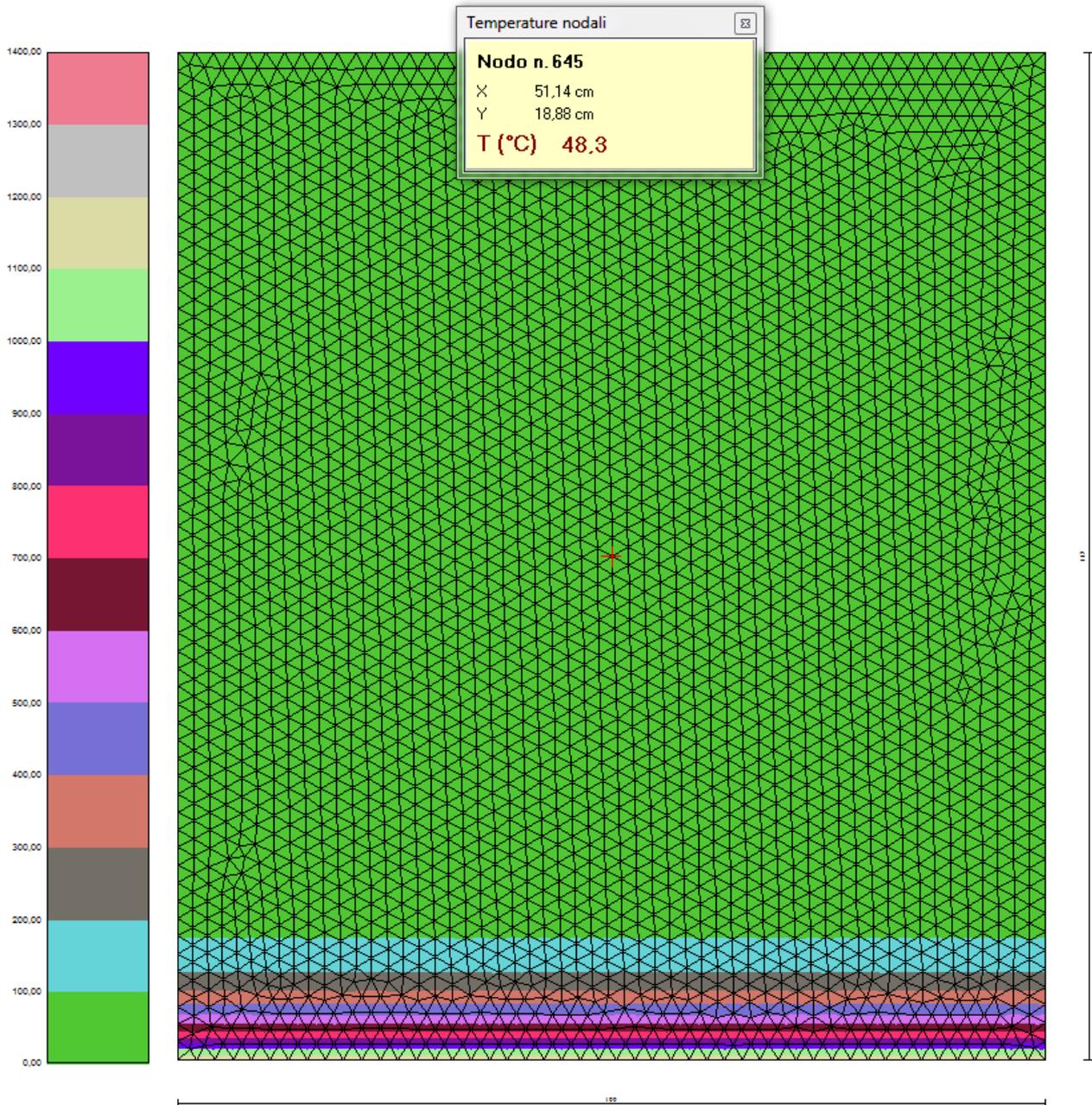


Figure 10: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (t = 120 min curva UNI)

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*	N	M	Armatura	FS
[-]	[-]	[m]	[kN]	[kNm]	[mm]	[-]
1	EUREKA	1.17	-1092	1480	Φ24/200	1.11
	UNI	1.17	-1079	1419	Φ24/200	1.14
2	EUREKA	1.17	-701	1086	Φ24/200	1.33
	UNI	1.17	-700	1045	Φ24/200	1.37

*altezza di calcolo impiegata

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

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG5102ECVRHGA1K00001A00 <div style="float: right;">Foglio 60 di 61</div>

7. CONCLUSIONI

Oggetto del presente elaborato è l'analisi del comportamento in condizioni di incendio della galleria artificiale *“Imbocco Sud – Galleria Serravalle”*. 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 di massima altezza del ritombamento. Tali verifiche sono state condotte in conformità a quanto indicato nell'Eurocodice 2 (UNI EN 1992:2005).

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG5102ECVRHGA1K00001A00

Foglio
61 di 61

ALLEGATI DI CALCOLO