

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 DEFINITIVO

INTERCONNESSIONE DI NOVI LIGURE ALTERNATIVA ALLO SHUNT GALLERIA ARTIFICIALI

Relazione di verifica di resistenza al fuoco

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI
Consorzio Cociv Ing. E. Pagani	

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
A 3 0 1	0 X	D	C V	R H	G A 0 0 0 0	0 0 1	A

Progettazione :								
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione per istruttoria	Rocksoil <i>A. Mancarella</i>	22/07/2015	Rocksoil <i>A. Mancarella</i>	24/07/2015	A.Mancarella <i>A. Mancarella</i>	24/07/2015	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:	File: A3010XDCVRHGA000001A00
-----------	------------------------------

CUP: F81H92000000008

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">A3010XDCVRHGA000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 3 di 49</p>

INDICE

INDICE.....		3
1. INTRODUZIONE.....		4
2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....		5
3. MATERIALI IMPIEGATI.....		5
4. INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE.....		6
5. VERIFICHE AL FUOCO - GALLERIA ARTIFICIALE		7
5.1. Modello costitutivo del calcestruzzo.....		10
5.2. Isoterme all'interno del calcestruzzo per le condizioni d'incendio.....		12
5.3. Spalling		14
5.3.1. Il fenomeno dello spalling		14
5.3.2. Considerazioni tecnico-progettuali sullo spalling		16
5.4. Modello 4 – Sezione 1 (WBS GAVA e GA41).....		17
5.4.1. Modello di calcolo e condizioni di carico		17
5.4.2. Analisi SAP2000 in caso di incendio.....		23
5.4.3. Risultati dell'analisi a freddo: combinazione "STATIC-1"		25
5.4.4. Risultati dell'analisi: curva incendio UNI 11076 t = 120 min		27
5.4.5. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA t = 120 min.....		28
5.4.6. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA t = 80 min.....		29
5.4.7. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA t = 60 min.....		30
5.4.8. Riassunto azioni interne in condizioni d'incendio.....		31
5.4.9. Verifiche sezionali a caldo		32
6. CONCLUSIONI		48
ALLEGATI DI CALCOLO		49

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	A3010XDCVRHGA000001A00 Foglio 4 di 49

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è lo studio del comportamento al fuoco del rivestimento definitivo delle tratte di galleria artificiale del Raccordo Tecnico III Valico-Novì Ligure.

Si è impiegato un apposito modello di calcolo ritenuto rappresentativo delle gallerie artificiali, opere afferenti alle WBS GAVA e GA41. Nella seguente tabella vengono sintetizzate le analisi svolte.

MODELLO	SEZIONE TIPO	WBS
1	1	GAVA – GA41

Tabella 1 – sintesi delle analisi svolte

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 alle relative relazioni di calcolo afferenti ciascuna WBS.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A3010XDCVRHGA000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 286"> <tr> <td>Foglio 5 di 49</td> </tr> </table>	Foglio 5 di 49
Foglio 5 di 49		

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

Nella seguente tabella vengono riepilogati i materiali impiegati e sottoposti a verifica di resistenza a seguito dell'applicazione del fuoco. Tali materiali sono rappresentativi sia dei rivestimenti definitivi delle gallerie naturali sia delle strutture delle gallerie artificiali.

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

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>A3010XDCVRHGA000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 6 di 49</p>

4. INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE

Per quanto riguarda le gallerie artificiali, afferenti alle WBS GA41 e GAVA, tali opere presentano due differenti sagome interne: la prima presenta una larghezza interna pari a 9.36m, la seconda invece di 6.30m. Il massimo ricoprimento previsto per la struttura risulta essere pari ad 1m e tale riempimento viene eseguito simmetricamente ai lati della struttura.

Ai fini del dimensionamento strutturale lo studio del comportamento al fuoco verrà svolto nelle seguenti condizioni:

- Sez. Tipo 1, La sezione 1 è riferita al primo tratto realizzato mediante metodo Milano, nella zona in cui lo scatolare presenta la massima larghezza interna. Il calcolo viene effettuato nella condizione di massima altezza della struttura stessa. Si ritiene che tale sezione risulti dimensionante anche per il tratto successivo realizzato con il metodo Milano, date le dimensioni inferiori della struttura e i medesimi carichi applicati.

Considerando il ricoprimento massimo ed il contesto geologico – idrogeologico di applicazione delle sezioni tipo simile tra i due binari, i modelli qui presentati si ritengono rappresentativi e dimensionanti sia per la WBS GA41 che per la GAVA.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	A3010XDCVRHGA000001A00	Foglio 7 di 49

5. VERIFICHE AL FUOCO - GALLERIA ARTIFICIALE

Nel presente capitolo vengono presentate le verifiche di resistenza al fuoco per le tratte di galleria artificiale. In particolar modo è stato sviluppato un unico modello di calcolo relativo alla sezione 1 rappresentativa delle WBS GAVA e GA41. Per maggiori dettagli relativi al dimensionamento statico della sezione, alle sue caratteristiche geometriche e alla sua ubicazione si rimanda alla relazione di calcolo delle gallerie artificiali.

Casi analizzati

Al fine di schematizzare i differenti scenari di incendio valutati dimensionanti per la struttura si sono impiegati differenti combinazioni di carico, applicando oltre ai carichi già considerati in fase statica “a freddo” anche le azioni termiche riferite alle condizioni di incendio. Si precisa che gli istanti di verifica sono stati scelti in funzione dell’andamento delle curve di incendio nel seguito riportate e alle temperature raggiunte nel tempo all’interno della sezione per gli scenari d’incendio considerati.

Combinazione	DESCRIZIONE
STATIC - 1	Combinazione delle sole azioni “a freddo”
UNI – 120min	Combinazione azioni a freddo + carichi di incendio curva UNI 120 min
EUR – 120min	Combinazione azioni a freddo + carichi di incendio curva EUR 120 min
EUR – 80min	Combinazione azioni a freddo + carichi di incendio curva EUR 80 min
EUR – 60min	Combinazione azioni a freddo + carichi di incendio curva EUR 60 min

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 SAP 2000 ©, prodotto dalla Computers and Structures Inc. di Berkeley, 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 tre fasi nel seguito descritte.

FASE 1 – Valutazione isoterme per una sezione di calcestruzzo con diverse curve di incendio

Le analisi in caso di incendio, in accordo a quanto stabilito dalla normativa e sulla base delle evidenze sperimentali sul materiale calcestruzzo, comportano una modifica dei parametri di rigidità per il calcestruzzo. A seconda della temperatura infatti, cambiano per il calcestruzzo sia il modulo elastico tangente sia il legame costitutivo sforzo/deformazione.

La prima fase ha previsto la valutazione, tramite RAF, delle isoterme all’interno di una sezione di calcestruzzo soggetta all’esposizione dell’incendio su un lato. Tale dato è stato ricavato per ciascuna delle 4 curve di incendio definite nel seguito.

FASE 2 – Sviluppo delle modellazioni numeriche in caso di incendio

In questa fase, sono stati sviluppati i modelli numerici agli elementi finiti al fine di cogliere lo stato di sollecitazione agente nelle diverse configurazioni in condizioni di incendio.

I modelli, come meglio dettagliato nei capitoli relativi, sono stati sviluppati a partire dalla medesima condizione di carico “a freddo”, 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.

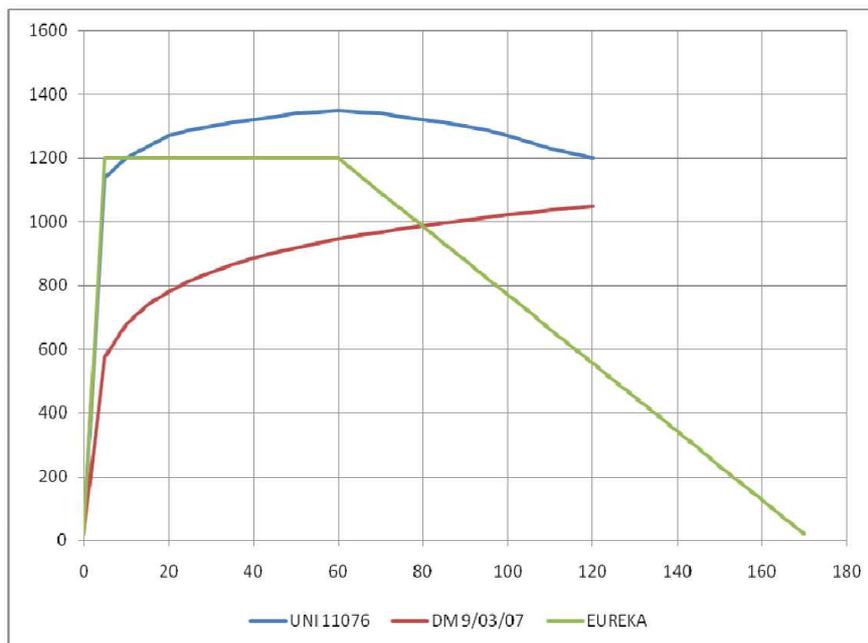


Figura 1 – Comparazione tra le curve d'incendio

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 relativi a 60, 80 minuti 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 120 minuti, 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

FASE3 – Verifiche sezionali “a caldo”

I risultati delle analisi precedenti sono 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. La diffusione del calore all’interno del calcestruzzo è valutata attraverso un’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 utilizzate che sono state inserite per via tabellare.

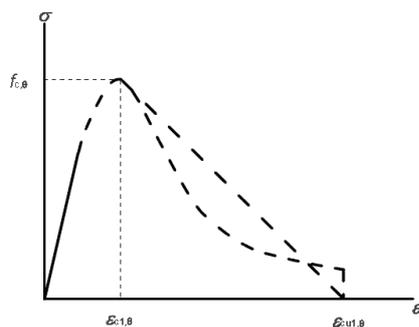
5.1. Modello costitutivo del calcestruzzo

Il calcestruzzo in presenza delle azioni termiche è stato modellato in base a quanto indicato nell'Eurocodice 2 (UNI-EN-1992-1-2) in tabella 3.1 e seguenti. In particolare si sono valutati i valori considerando un calcestruzzo costituito da aggregati silicei in modo da considerare la situazione peggiore dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche del materiale. Per quanto riguarda il ramo discendente si è scelta l'opzione prevista dall'Eurocodice di modellare il materiale come lineare.

Table 3.1: Values for the main parameters of the stress-strain relationships of normal weight concrete with siliceous or calcareous aggregates concrete at elevated temperatures.

Concrete temp. θ [°C]	Siliceous aggregates			Calcareous aggregates		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Figura 3 – Relazione sforzi/deformazioni per il calcestruzzo



Range	Stress $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1(\theta)} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	For numerical purposes a descending branch should be adopted. Linear or non-linear models are permitted.

Figure 3.1: Mathematical model for stress-strain relationships of concrete under compression at elevated temperatures.

Figura 4 – Comportamento a compressione del calcestruzzo

Infine, per quanto riguarda la resistenza a trazione del materiale si è utilizzata la riduzione lineare di tale valore nell'intervallo tra 100 e 600 °C come indicato nella successiva figura, mentre per temperature superiori a quest'ultimo valore il calcestruzzo non offre alcuna resistenza a trazione.

EN 1992-1-2:2004 (E)

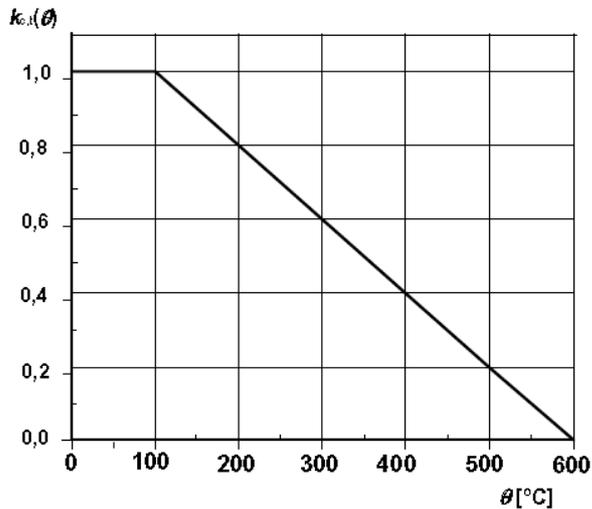


Figure 3.2: Coefficient $k_{c,t}(\theta)$ allowing for decrease of tensile strength ($f_{ct,t}$) of concrete at elevated temperatures

Figura 5 - riduzione lineare della resistenza a trazione del calcestruzzo (intervallo di temperatura tra 100°C e 600°C)

I modelli costitutivi impiegati nel modello di calcolo alle varie temperature saranno riportati nei successivi paragrafi. La formulazione adottata per il materiale, fortemente differente da un comportamento elastico lineare, ha fatto sì che per ottenere il corretto andamento degli sforzi all'interno della sezione nel caso delle analisi "a caldo" sia stato necessario utilizzare un tipo di analisi non lineare differenziando le caratteristiche meccaniche in base alla temperatura.

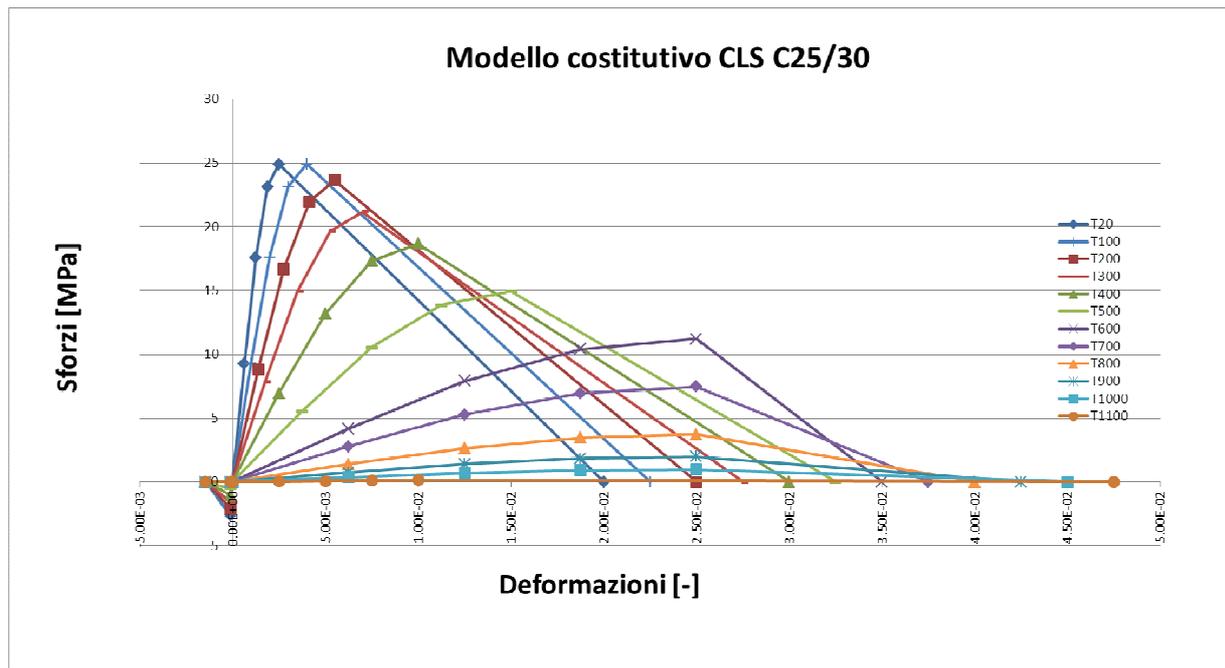


Figura 6 – Modello costitutivo del calcestruzzo C28/35

5.2. Isotherme all'interno del calcestruzzo per le condizioni d'incendio

Una sezione di calcestruzzo, soggetta alle diverse curve d'incendio definite in precedenza, subisce un aumento della temperatura al suo interno. Le condizioni di esposizione standard prevedono che un solo lato sia soggetto all'azione diretta del fuoco.

Con il software RAF è stato possibile ricavare le curve isoterme della temperatura all'interno di una sezione di calcestruzzo, per un tempo fissato, in funzione della distanza dal bordo soggetto all'azione diretta del fuoco. I grafici che seguono riassumono i risultati di tali analisi svolte con RAF.

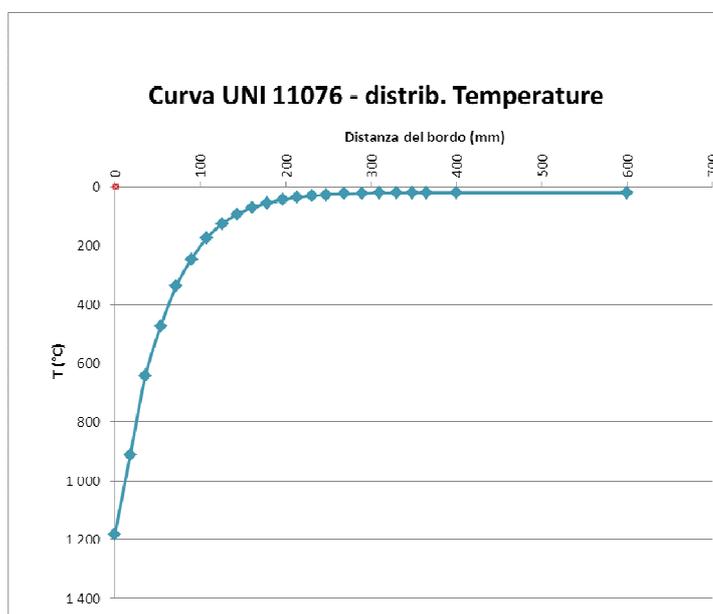


Figura 7 – Isotherme per curva UNI 11076

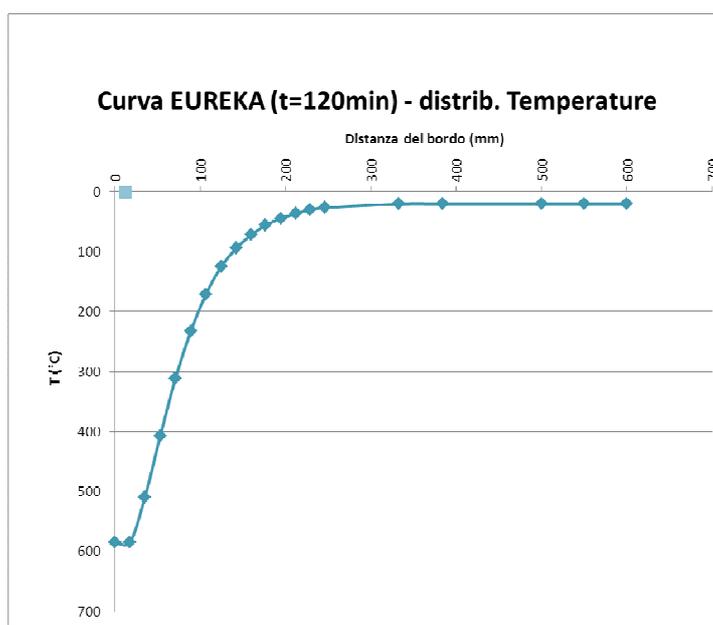


Figura 8 – Isotherme per curva EUREKA (t = 120 min)

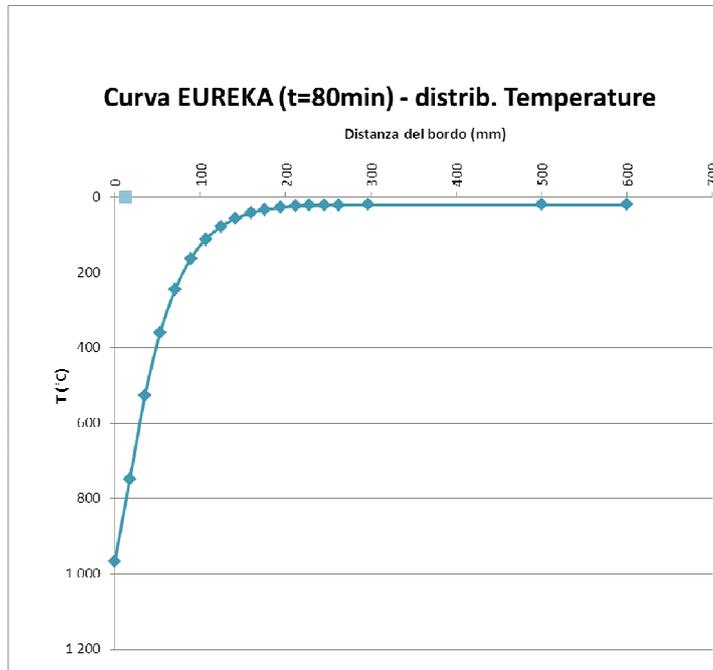


Figura 9 – Isotherme per curva EUREKA (t = 80 min)

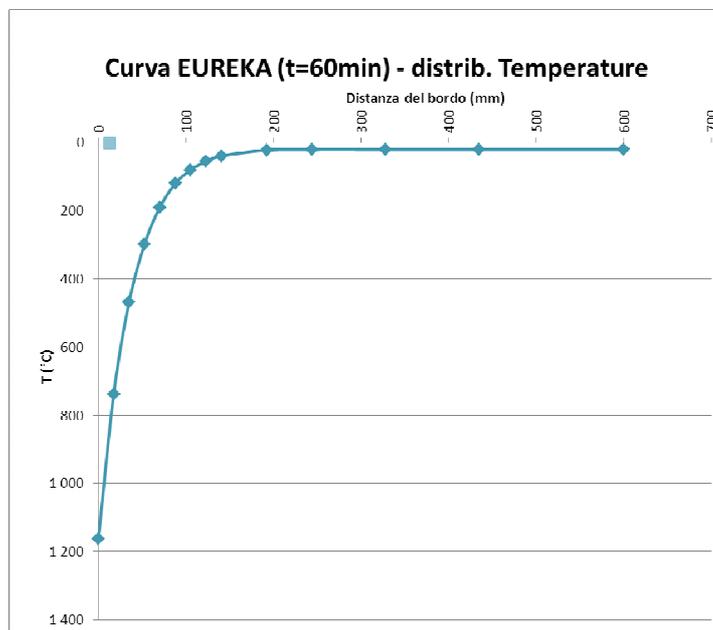


Figura 10 – Isotherme per curva EUREKA (t = 60 min)

A partire da tali curve risulterà possibile assegnare la corretta temperatura ai nodi della struttura in funzione della distanza dal bordo e della condizione di incendio considerata.

5.3. Spalling

5.3.1. Il fenomeno dello spalling

Lo spalling consiste in un danneggiamento localizzato del calcestruzzo, con riduzione della sezione resistente, dovuto alla compresenza di alta temperatura e trasferimento di massa di vapore all'interno del materiale, che concentrandosi, può innalzare la pressione fino alla rottura e distacco di parte della struttura.

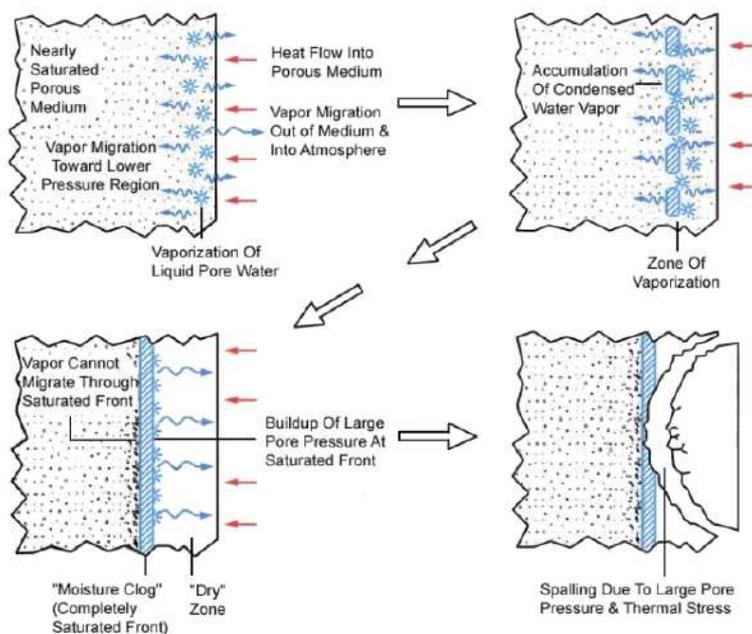
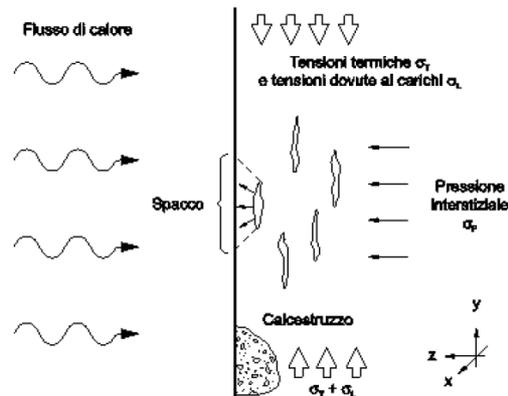


Figura 11 - Spalling: spiegazione del fenomeno

Lo spalling può verificarsi in due principali modalità:

- non violento, in cui il materiale si distacca in modo graduale dalla faccia esposta dell'elemento strutturale; mediamente le parti dislocate hanno dimensioni massime di circa 20-30mm ("surface spalling"). Il fenomeno può essere associato alla propagazione di microfratture per espansione termica degli aggregati;
- violento, in cui il distacco del materiale avviene in modo repentino, con un notevole dissipamento di energia ("explosive spalling"). Il fenomeno dello spalling esplosivo è, usualmente, attribuito all'azione combinata di due processi: un processo termo-meccanico e un processo termo-igrometrico.



L'esposizione progressiva di nuove parti di struttura all'azione del fuoco può portare l'estensione del fenomeno anche ad alcune decine di centimetri, compromettendo l'integrità statica della struttura.

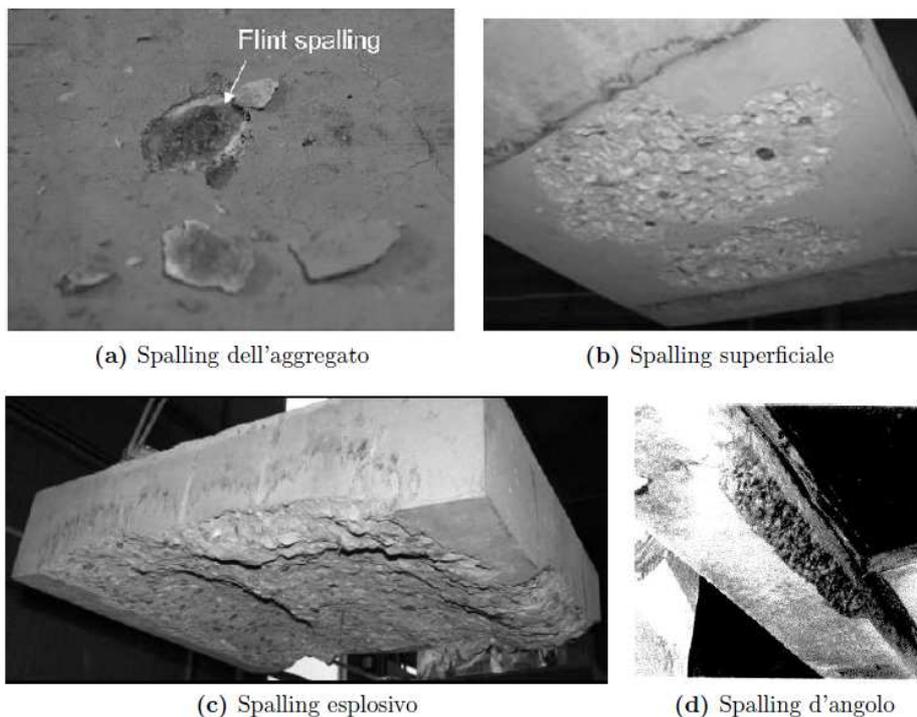


Figura 12 – Diverse manifestazioni del fenomeno

A riguardo sono stati condotti numerosi studi, volti alla valutazione dell'influenza che fattori interni al materiale (contenuto di umidità, porosità, resistenza a trazione, contenuto di fibre) e ad esso esterni (velocità di riscaldamento, carichi applicati e condizioni di vincolo) esercitano sui due principali meccanismi responsabili del fenomeno. Da un lato il riscaldamento genera dei gradienti di temperatura, che inducono sforzi di compressione a ridosso della superficie esposta (a causa delle dilatazioni termiche impedito) e sforzi di trazione nelle regioni interne più fredde (processo termo-meccanico). Dall'altro induce il trasporto di massa umida e la vaporizzazione dell'acqua (processo termo-igrometrico), causando la crescita della pressione di vapore all'interno dei pori, che contribuisce, specialmente per i calcestruzzi ad alte prestazioni, in modo significativo alla natura

esplosiva del fenomeno (explosive spalling). Quest'ultima evidenza giustifica la maggiore attenzione rivolta, in tempi relativamente recenti, al comportamento termo-igrometrico del calcestruzzo esposto al fuoco, **riconoscendo nello sviluppo della pressione di vapore il principale meccanismo governante il fenomeno dello spalling.**

La predizione dello spacco esplosivo durante il riscaldamento è valutabile attraverso alcuni nomogrammi in grado di individuare in modo immediato le zone di spacco e non spacco tenendo in conto il contenuto di umidità e altri fattori, come ad esempio il tasso di lavoro della struttura (es. in Figura 13).

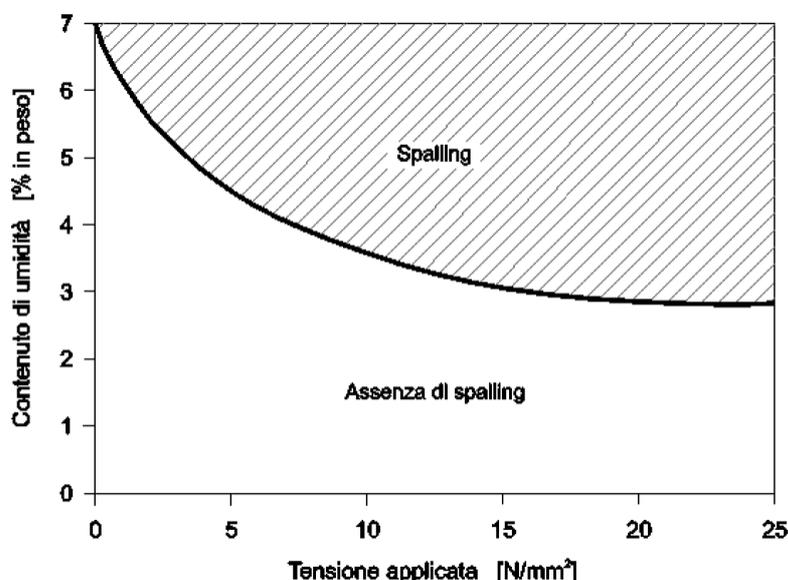


Figura 13 – Tipico dominio umidità-tensione applicata, sezioni a rischio di spacco esplosivo (Khoury 2000).

In tal senso, con riferimento anche a quanto riportato nell'Eurocodice (EN 1992-1-2:2005, par. 4.5.1) è improbabile che la frantumazione esplosiva si verifichi con contenuto di umidità del calcestruzzo minore di $k\%$ in peso, raccomandando il valore di $k\%=3$.

Al di sopra di tale valore percentuale la normativa indica di procedere ad una più attenta valutazione del contenuto di umidità stesso, del tipo di aggregato, della permeabilità del calcestruzzo e della velocità di riscaldamento.

5.3.2. Considerazioni tecnico-progettuali sullo spalling

L'opera in esame prevede l'utilizzo di calcestruzzo armato gettato in opera avente R_{ck} pari a 30 MPa. A causa delle modalità di getto, alla bassa classe di resistenza del calcestruzzo e alle caratteristiche degli inerti si ritiene che il contenuto di umidità non possa essere superiore al limite precedentemente indicato ($k\%=3$) e che quindi l'opera in oggetto non sia suscettibile al rischio di spacco precedentemente illustrato. Nelle elaborazioni numeriche svolte in caso di incendio si terrà comunque conto, a titolo cautelativo, della possibilità che si verifichi il fenomeno del "surface spalling", attuando le verifiche delle sollecitazioni ottenute dal modello "a caldo" su una sezione ridotta di 30 mm (dominio a caldo su sezione ridotta), da considerarsi quale limite superiore in base a quanto presentato nel paragrafo precedente.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>A3010XDCVRHGA000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 17 di 49</p>

5.4. Modello 4 – Sezione 1 (WBS GAVA e GA41)

5.4.1. Modello di calcolo e condizioni di carico

Il modello di calcolo di riferimento è costituito da elementi finiti bidimensionali. Le condizioni di vincolo sono le medesime rispetto al modello statico: per il dettaglio sulla tipologia dei vincoli elastici al contorno si rimanda alla relazione di calcolo specifica.

L'analisi in caso d'incendio è stata svolta considerando i carichi "a freddo" relativi alla combinazione di lungo termine, denominata "STATIC-1" in relazione di calcolo.

Tale combinazione considera:

- la presenza del peso proprio (carico denominato "DEAD"): il peso proprio è valutato direttamente dal programma di calcolo considerando il calcestruzzo con peso specifico 25 kN/mc.
- il peso del terreno di ricoprimento di altezza pari a 1 m (carico denominato "RITOMBAMENTO")
- la sottospinta dell'acqua agente sull'estradosso del solettone (carico denominato "SOTTOSPINTA")
- la presenza di acqua fra le contropareti e i diaframmi in calcestruzzo (carico denominato "FALDA")

Le combinazioni di carico a "caldo" considera quindi oltre ai carichi sopra richiamati i carichi termici propri della situazione analizzata, descritti nei paragrafi successivi.

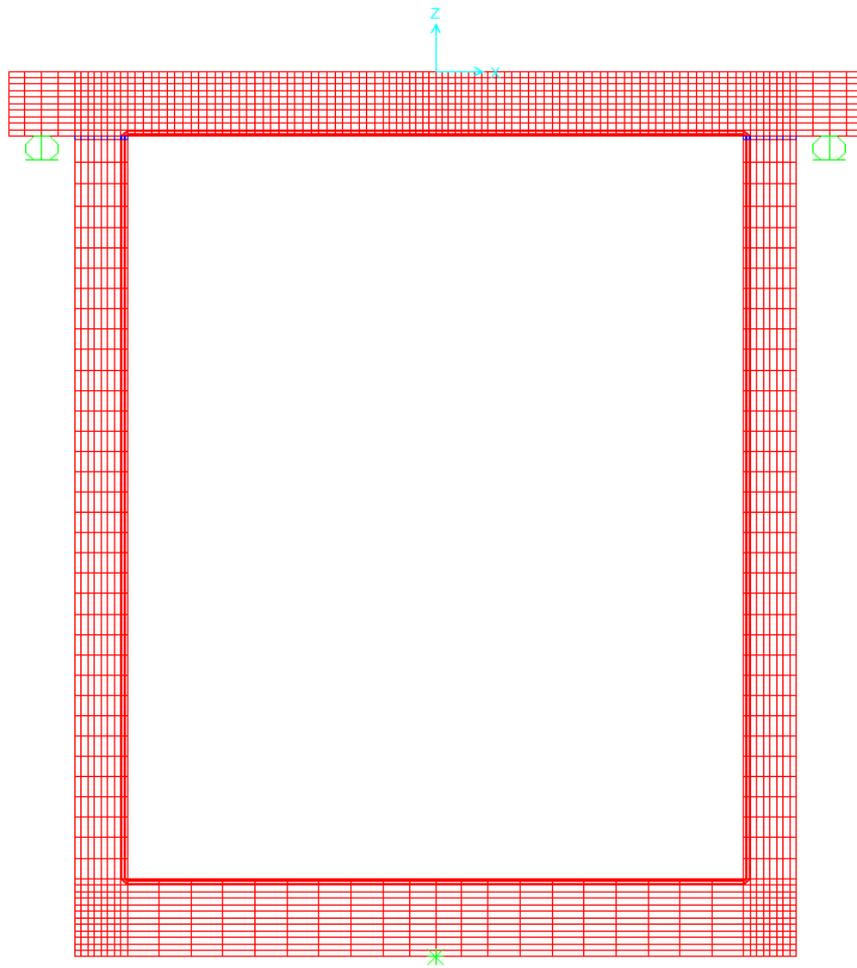


Figura 14 – Modello di calcolo

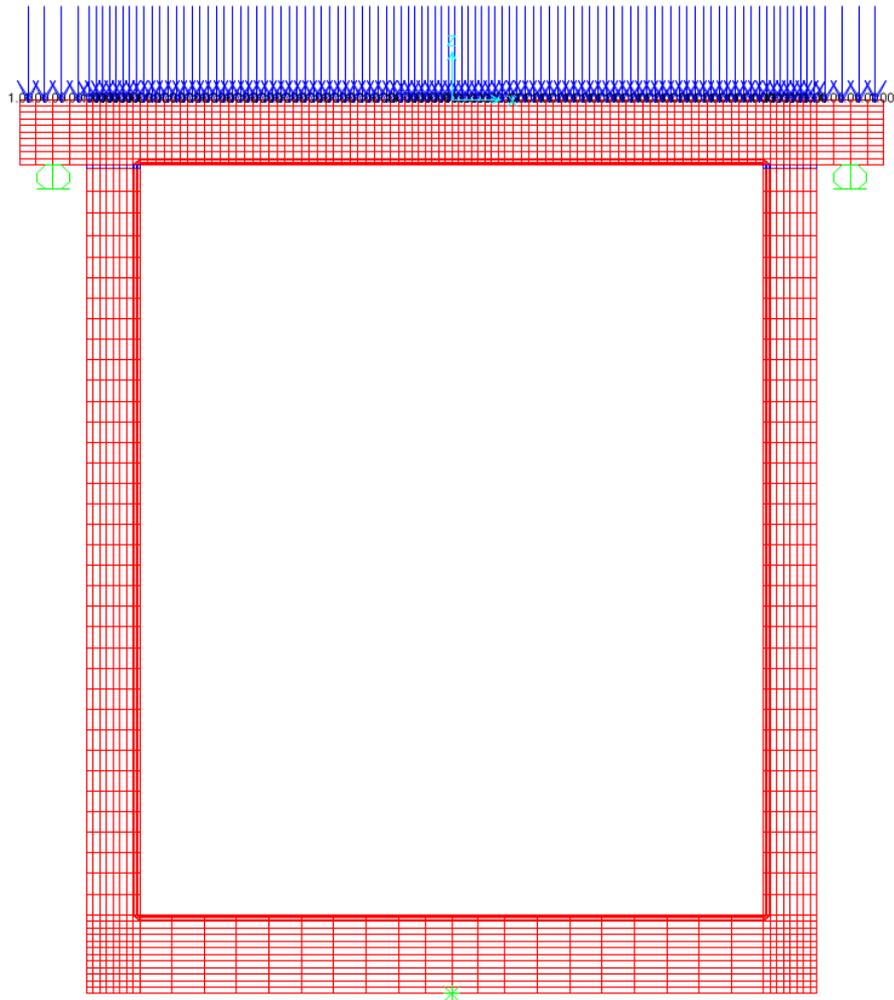


Figura 15 – Condizione di carico “RITOMBAMENTO”

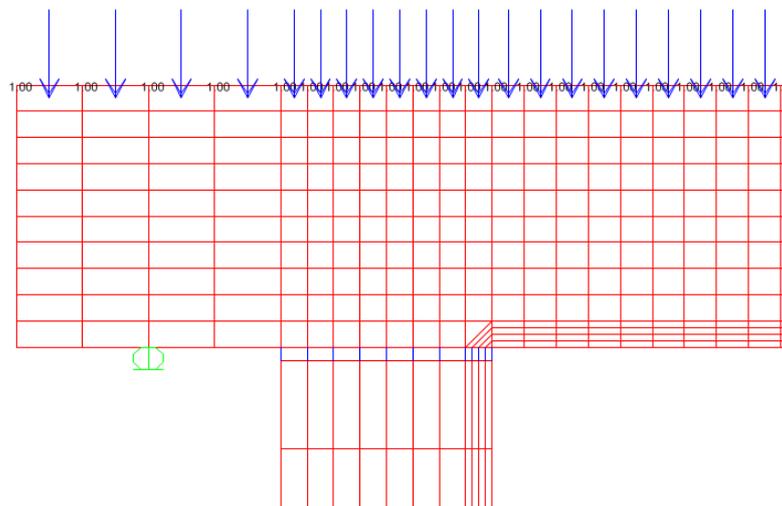


Figura 16 – Dettaglio condizione di carico “RITOMBAMENTO”

Il carico RITOMBAMENTO, considerato pari a 1 kN/m è stato moltiplicato nella combinazione di carico di riferimento per il coefficiente 20.

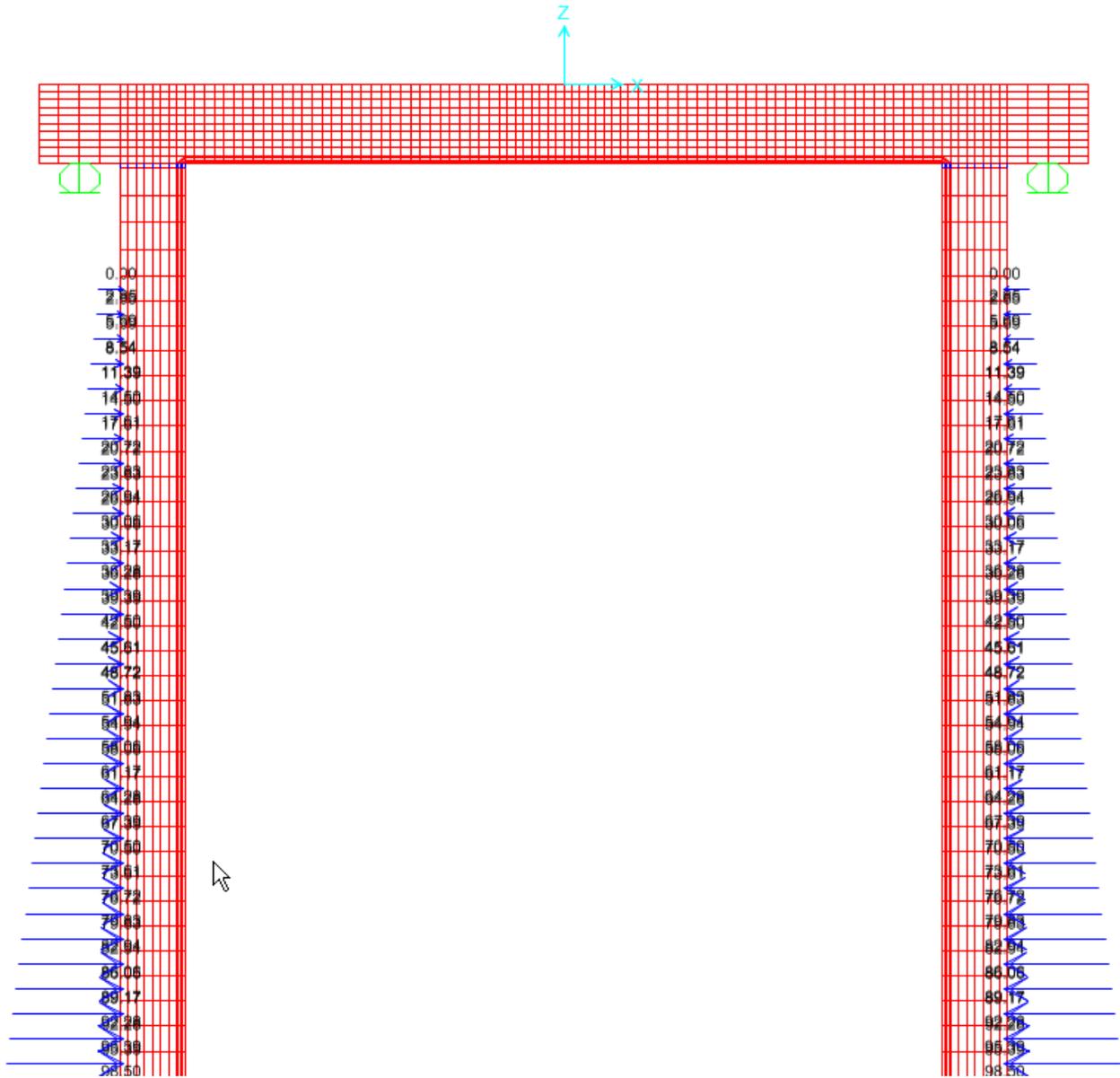


Figura 19 - Condizioni di carico "FALDA"

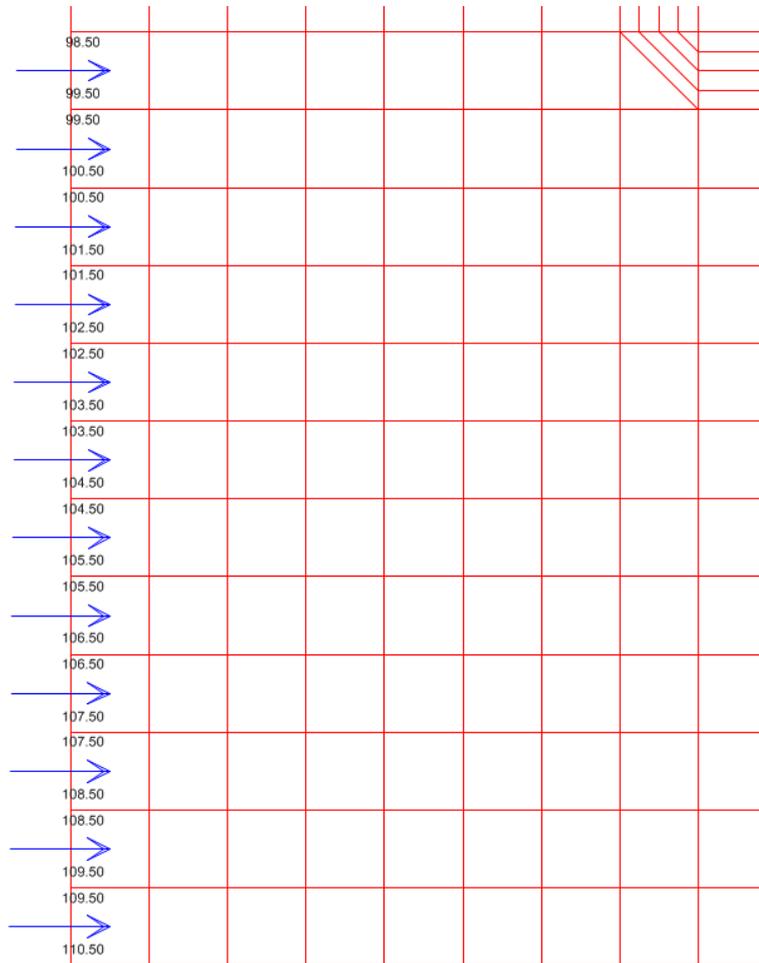


Figura 20 - Dettaglio condizione di carico "FALDA"

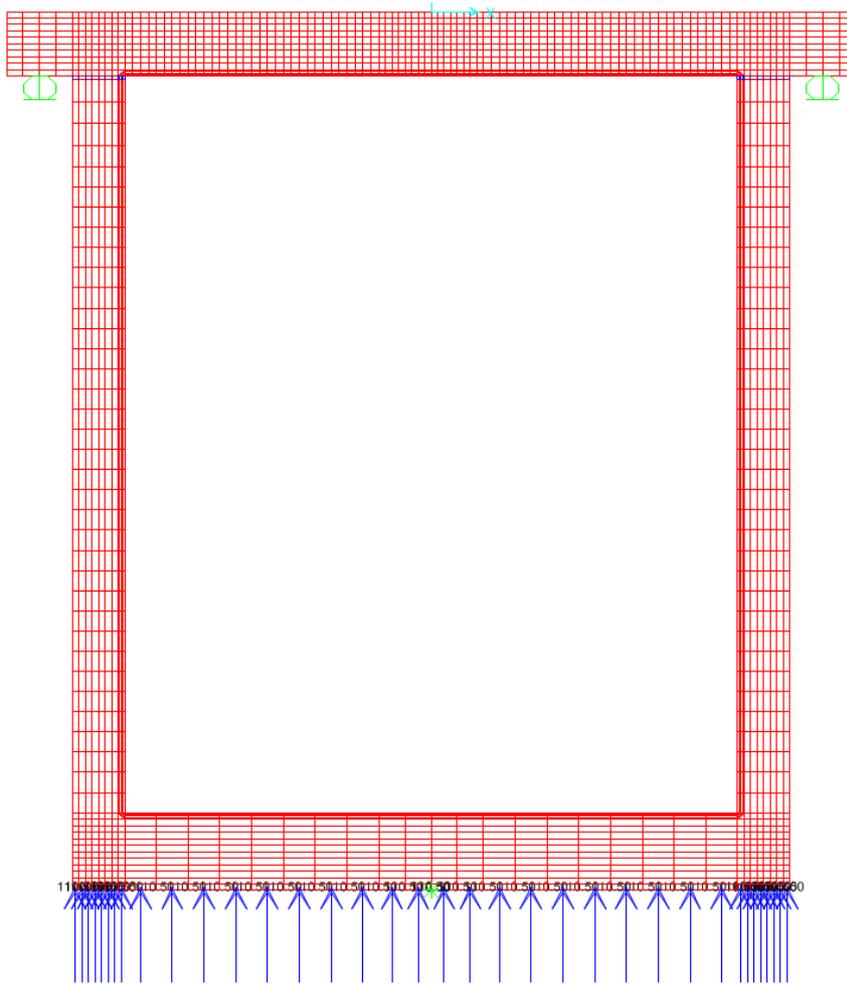


Figura 21 – Condizione di carico “SOTTOSPINTA”

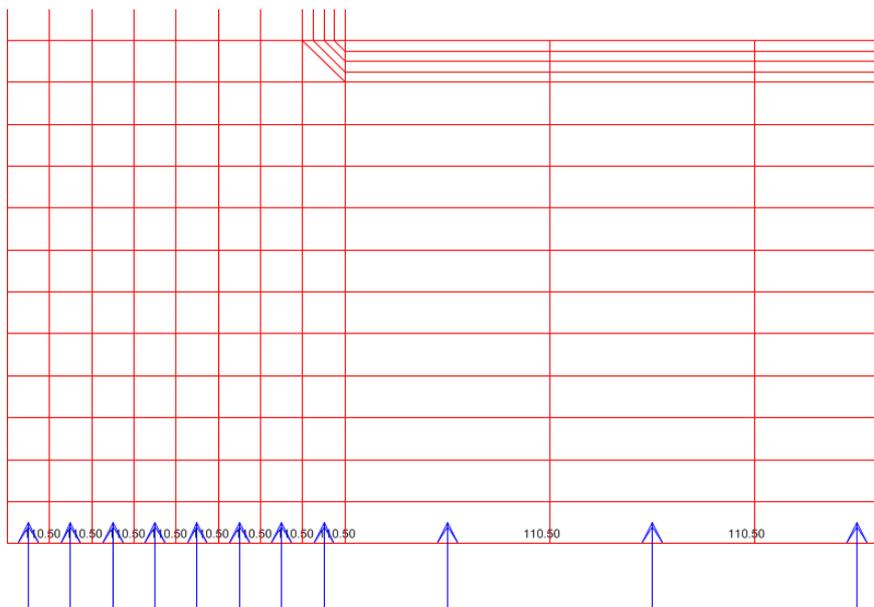


Figura 22 – Dettaglio condizione di carico “SOTTOSPINTA”

5.4.2. Analisi SAP2000 in caso di incendio

In accordo alla procedura definita in precedenza, sono stati elaborati 4 modelli di calcolo SAP2000, identici per geometria, condizioni di vincolo e azioni "a freddo", ai quali sono state applicate 4 condizioni di incendio di progetto:

- Curva incendio UNI 11076 t = 120 min
- Curva incendio EUREKA t = 120 min
- Curva incendio EUREKA t = 80 min
- Curva incendio EUREKA t = 60 min

Nella modellazione SAP le 4 condizioni di progetto si traducono nell'applicazione di 4 variazioni di temperatura negli elementi bidimensionali che costituiscono la trave, i piedritti e la soletta di fondazione della galleria artificiale scatolare.

Nel modello di calcolo, data l'elevata variabilità delle temperature nei primi centimetri di calcestruzzo a diretto contatto con l'incendio, è stata aumentata la discretizzazione della mesh di calcolo, considerando strisce di elementi finiti da 2.5 cm.

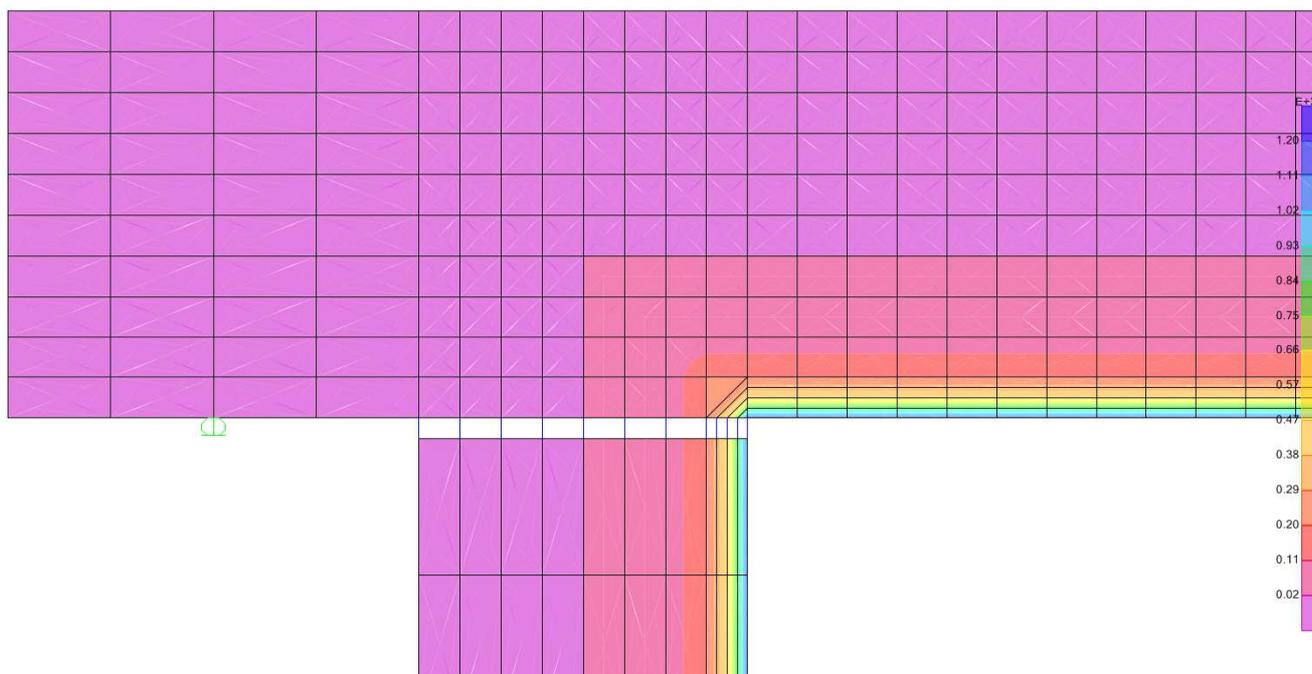


Figura 23 – Carico termico (curva UNI11076 t = 120 min)

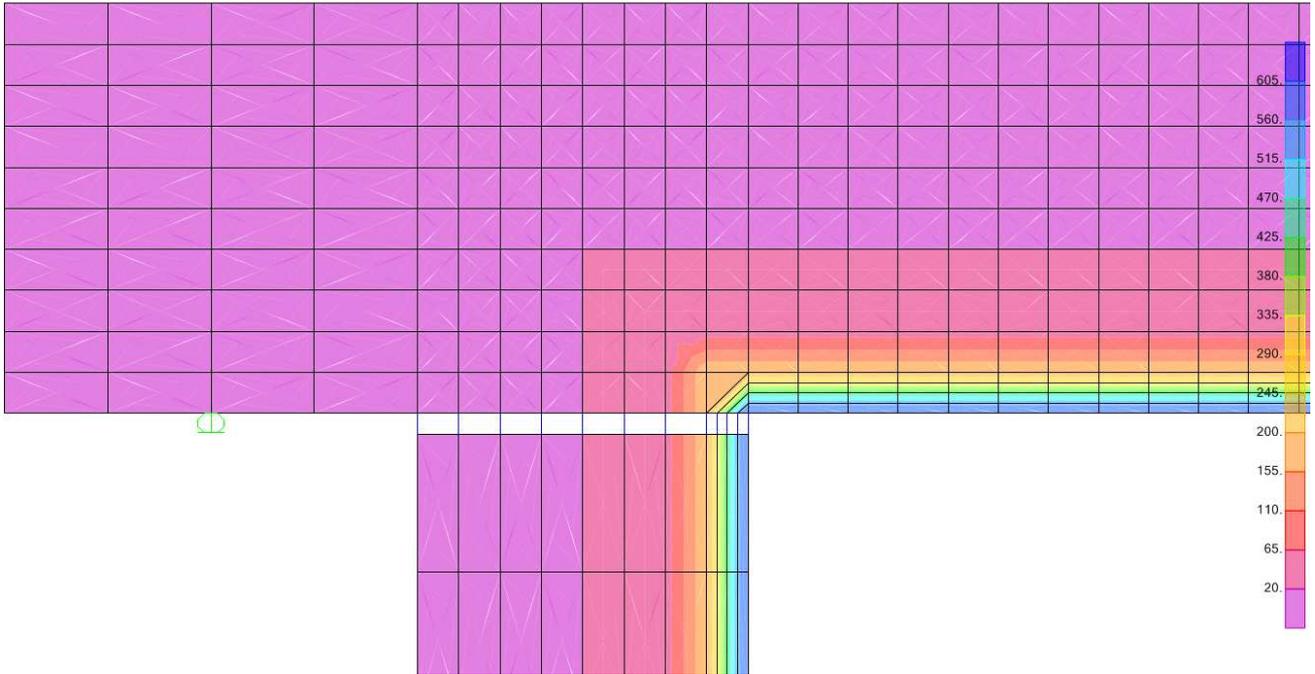


Figura 24 – Carico termico (curva EUREKA t = 120 min)

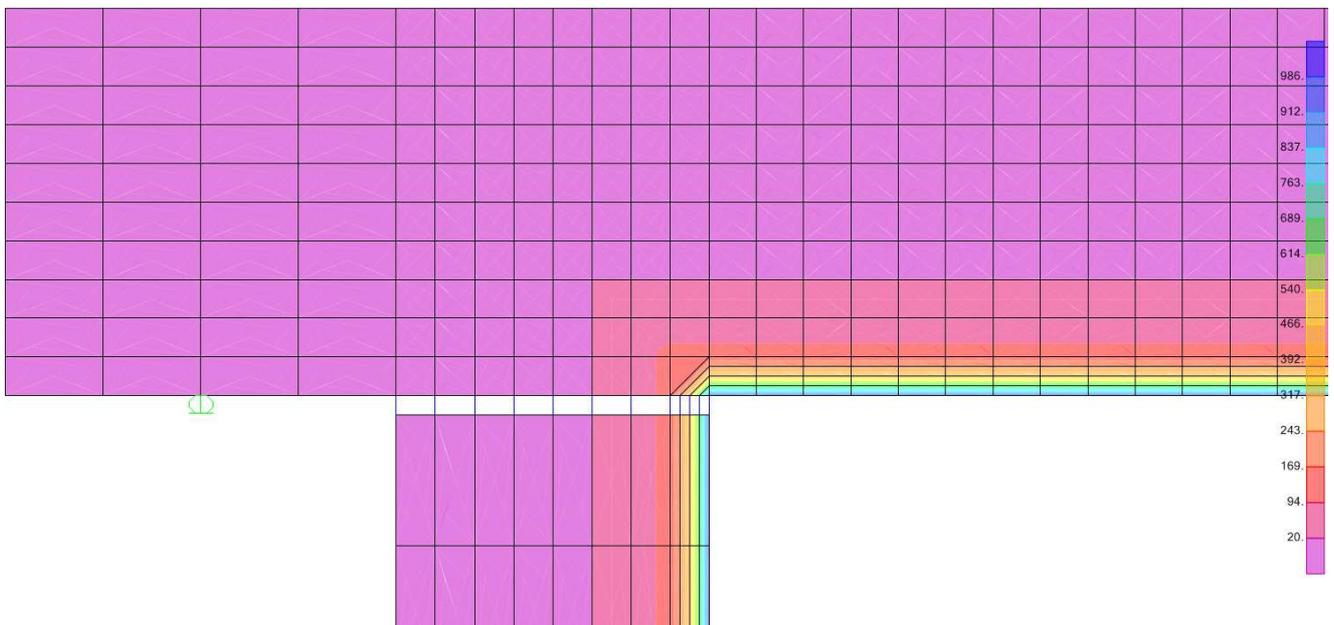


Figura 25 – Carico termico (curva EUREKA t = 80 min)

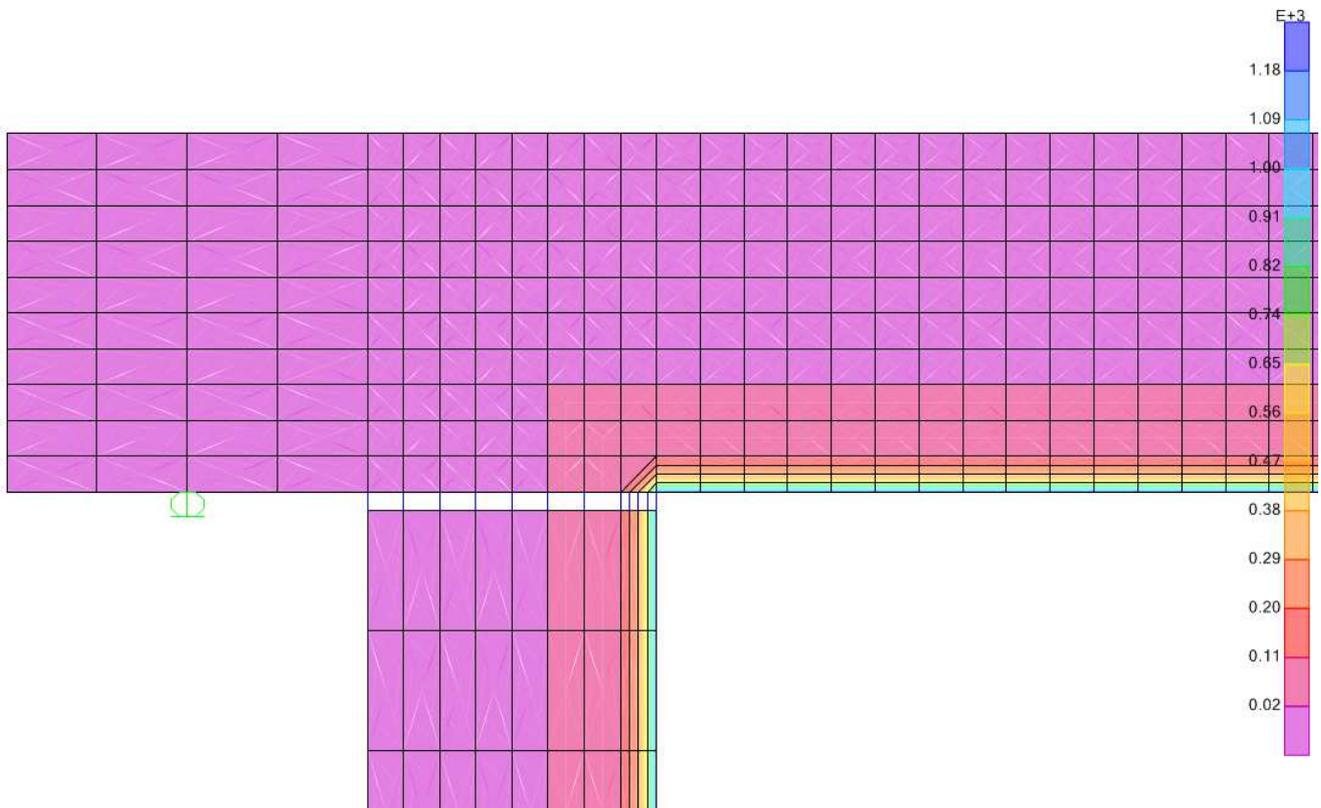


Figura 26 – Carico termico (curva EUREKA t = 60 min)

5.4.3. Risultati dell'analisi a freddo: combinazione "STATIC-1"

Per una maggiore facilità di lettura si riportano nel seguito i principali risultati in termini tensionali ottenuti considerando la sola condizione statica di progetto a lungo termine. Per maggiori dettagli si rimanda a quanto presentato nelle relazioni di calcolo relative alle WBS GA41 e GAVA.

Nella tabella che segue sono state riportate le azioni interne per le sezioni più significative: le sezioni di incastro e di mezzzeria della trave di copertura e del solettone di fondo, oltre alla sezione di incastro fra piedritto e fondazione

Convenzione:

- Azione assiale di compressione se negativa
- Momento flettente che tende le fibre interne alla galleria se positivo

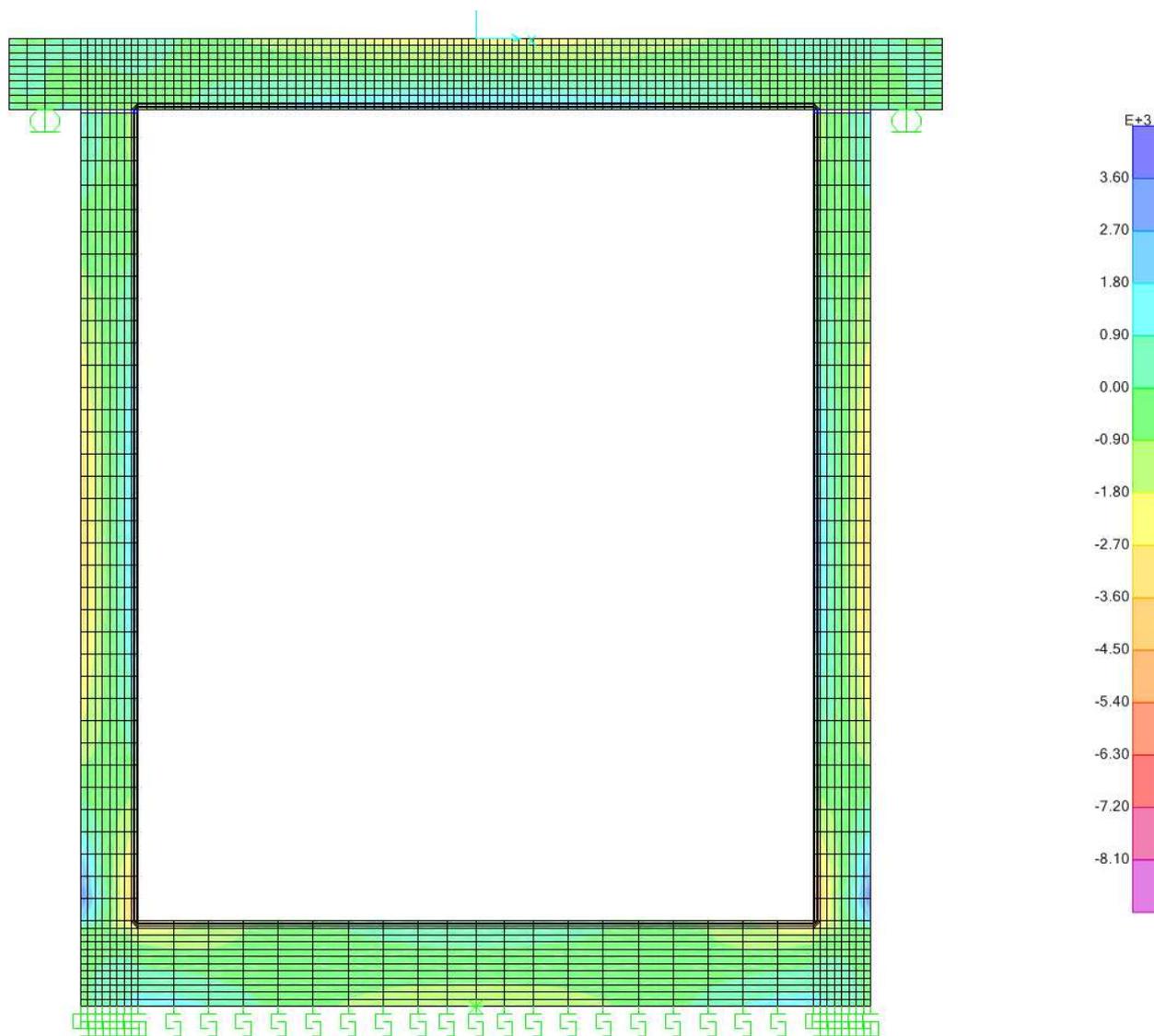


Figura 27 – Stato tensionale σ_{11} – Combinazione di carico “STATIC-1” [kN/mq]

	Sezione	N	M	V
	[-]	[KN]	[KNm]	[KN]
A	Soletta - mezzeria	-105.9	370.2	0.0
B	Soletta - appoggio sx	-105.9	-122.7	210.6
C	Piedritto sx - incastro sup	-230.8	-163.8	105.9
D	Piedritto sx - incastro inf	-456.8	-565.8	-379.8
E	Solettone - incastro sx	-505.2	636.5	-388.3
F	Solettone - mezzeria	505.2	268.4	0.3

Figura 28 – Azioni interne – combinazione di carico “STATIC-1”

5.4.4. Risultati dell'analisi: curva incendio UNI 11076 $t = 120$ min

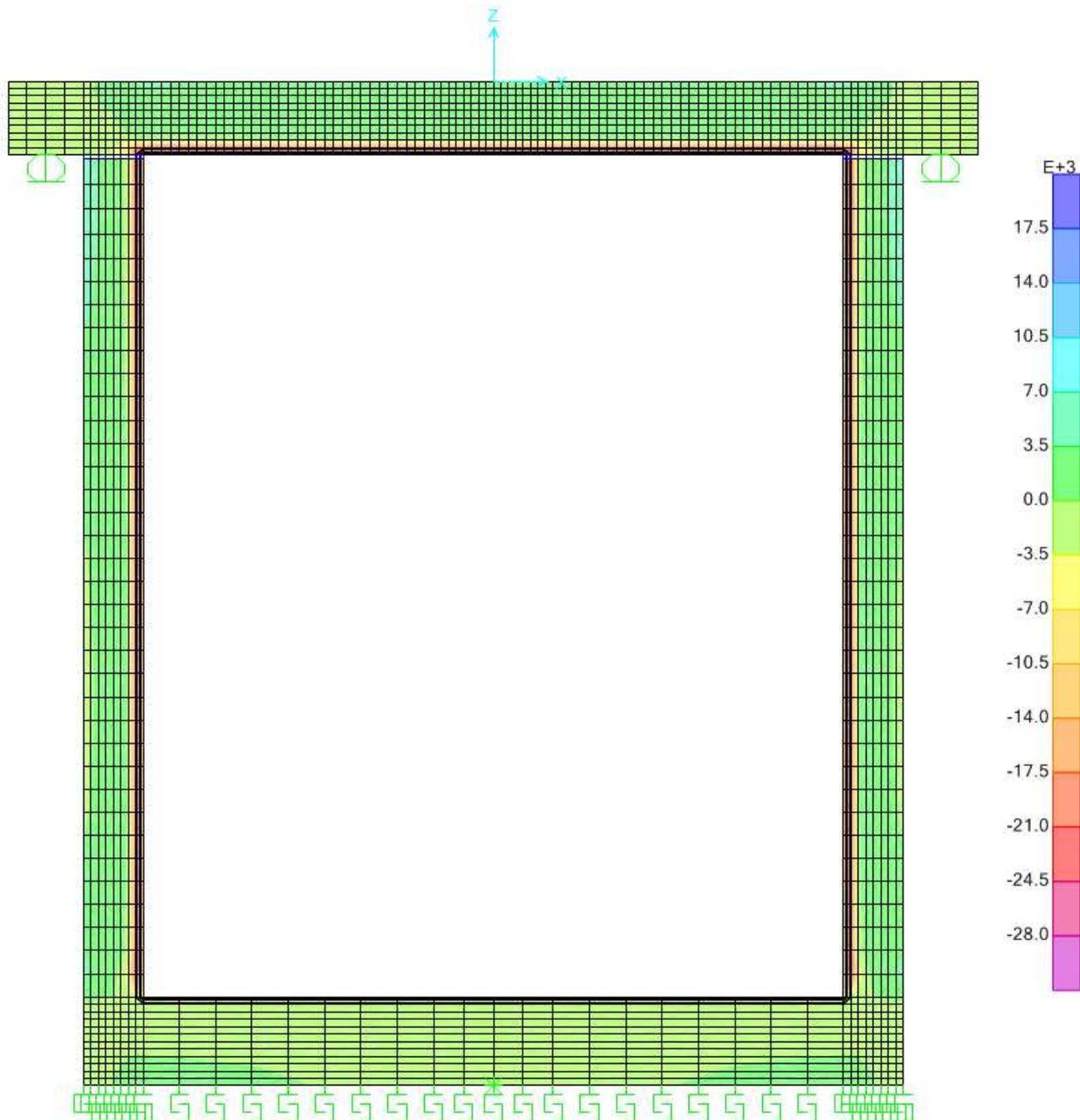


Figura 29 – Stato tensionale σ_{II} – Combinazione di carico “INCENDIO” [kN/mq]

5.4.5. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA $t = 120$ min

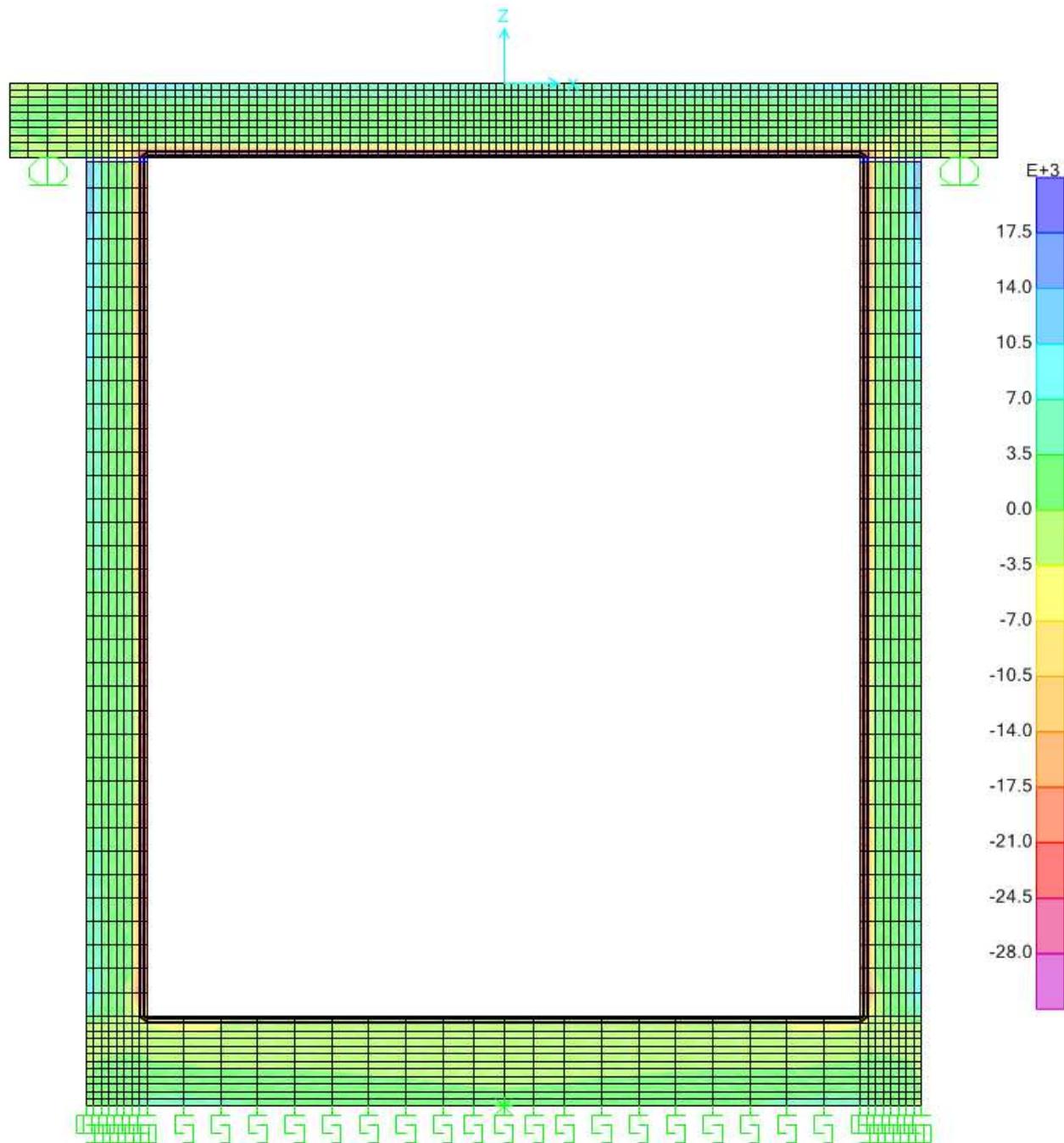


Figura 30 – Stato tensionale σ_{II} – Combinazione di carico “INCENDIO” [kN/mq]

5.4.6. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA $t = 80 \text{ min}$

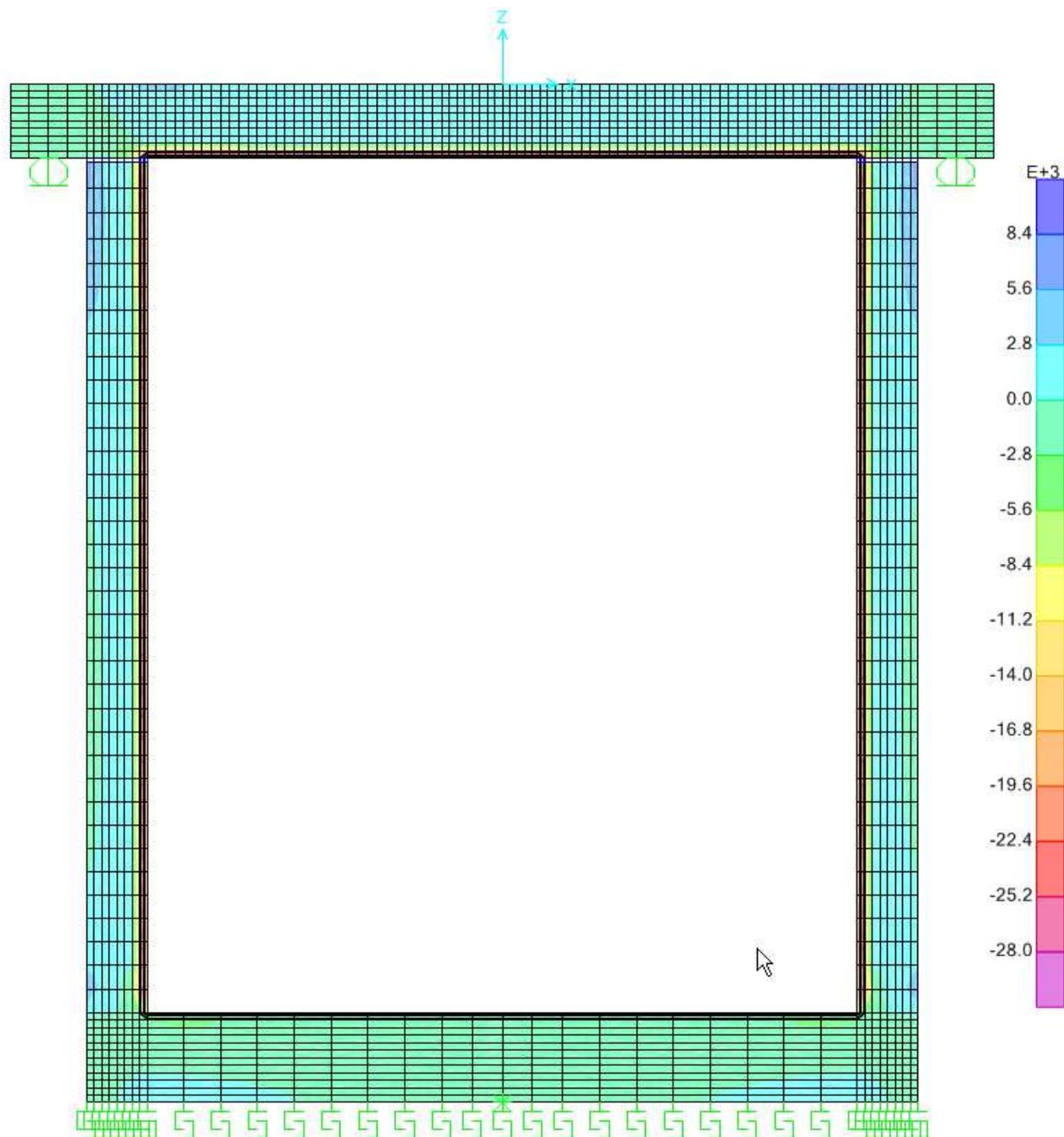


Figura 31 – Stato tensionale σ_{11} – Combinazione di carico “INCENDIO” [kN/mq]

5.4.7. Risultati dell'analisi: curva incendio EUREKA $t = 60 \text{ min}$

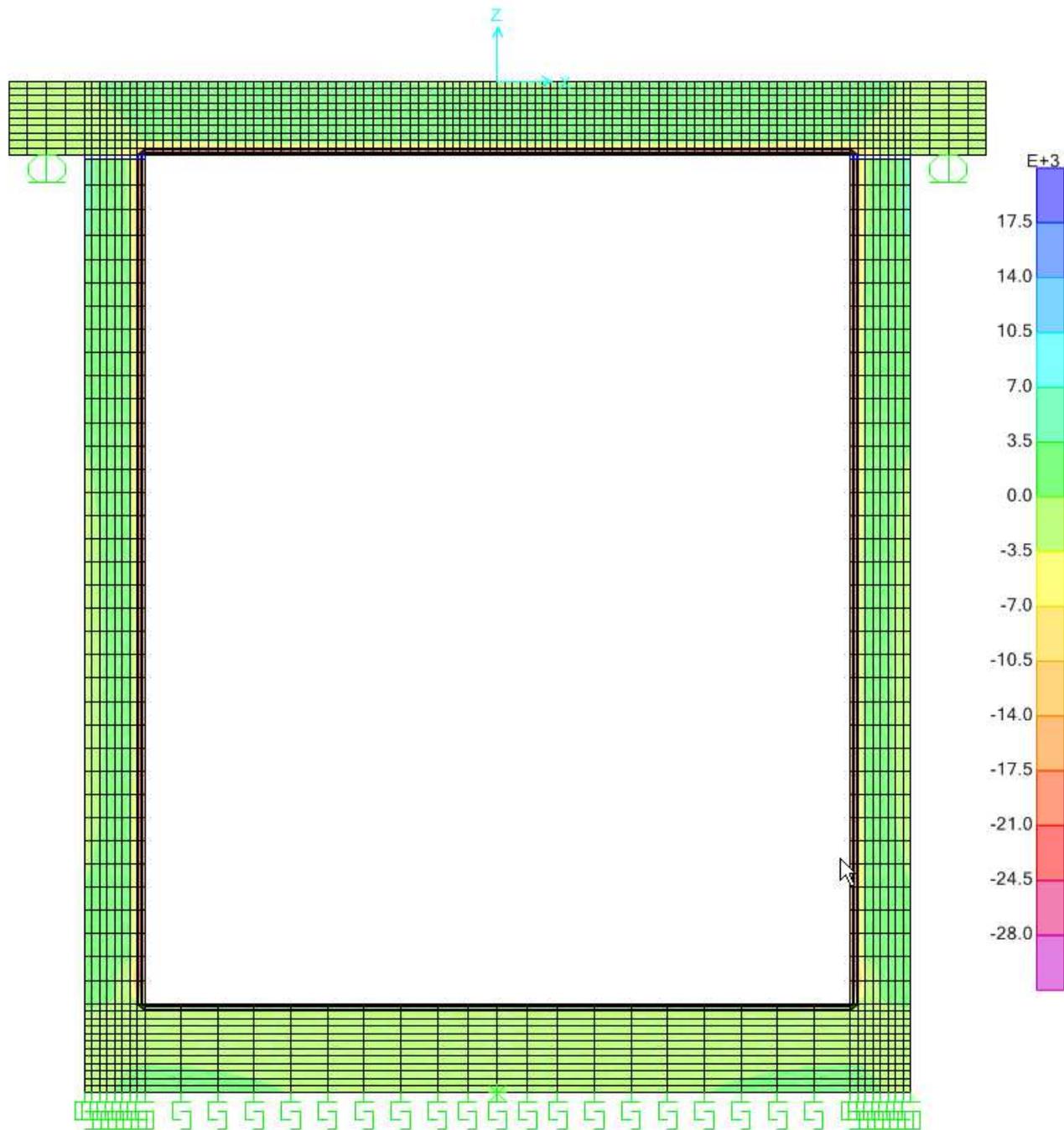


Figura 32 – Stato tensionale σ_{11} – Combinazione di carico “INCENDIO” [kN/mq]

5.4.8. Riassunto azioni interne in condizioni d'incendio

Gli stati tensionali negli elementi finiti di piastra sono stati integrati eseguendo delle *Section Cuts* per le sezioni più rappresentative.

Per tali sezioni, nelle verifiche eseguite con RAF, è stato considerato anche il fenomeno dello spalling rimuovendo il primo strato di 2.5 cm dalle sezioni di verifica.

Nella tabella che segue sono state riportate le azioni interne per le sezioni più significative: le sezioni di incastro e di mezzzeria della trave di copertura e la sezione di incastro fra piedritto e fondazione. Per tali sezioni sono state svolte in seguito le verifiche a caldo con RAF.

Convenzione:

- Azione assiale di compressione se negativa
- Momento flettente che tende le fibre interne alla galleria se positivo

	SEZIONE	CURVA INCENDIO	t	N	M	V
			[min]	[kN]	[kNm]	[kN]
A	Soletta - mezzzeria	UNI 11076	120	-1689	-1247	4
		EUREKA	120	-333	-1379	4
			80	-1341	-947	4
			60	-1238	-756	4
B	Soletta - appoggio sx	UNI 11076	120	-1266	-1536	154
		EUREKA	120	107	-1741	128
			80	-1015	-1277	154
			60	-945	-1096	156
C	Piedritto sx - incastro sup	UNI 11076	120	-1162	-1343	146
		EUREKA	120	-12	-1597	143
			80	-859	-1151	139
			60	-782	-1005	133
D	Piedritto sx - incastro inf	UNI 11076	120	-1093	-1012	253
		EUREKA	120	-75	-1286	247
			80	-887	-884	264
			60	-827	-796	273

Figura 33 – Azioni interne nelle sezioni di verifica in caso d'incendio

5.4.9. Verifiche sezionali a caldo

5.4.9.1. Sezione di mezzeria della soletta di copertura

La sezione di mezzeria della soletta di copertura è armata con barre $\phi 26/10$ all'intradosso e con barre $\phi 26/10$ all'estradosso.

Curva incendio UNI 11076 t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 2.10.

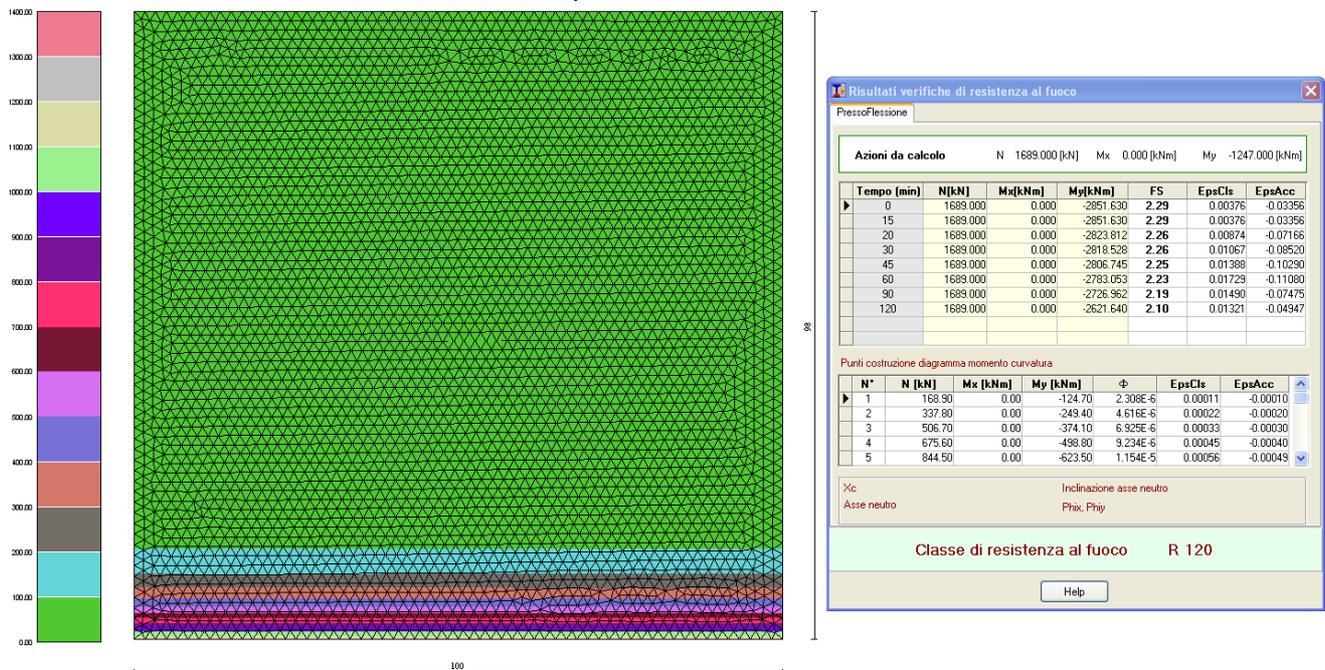


Figura 34 - andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo (curva UNI t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 80 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza maggiore di 1.

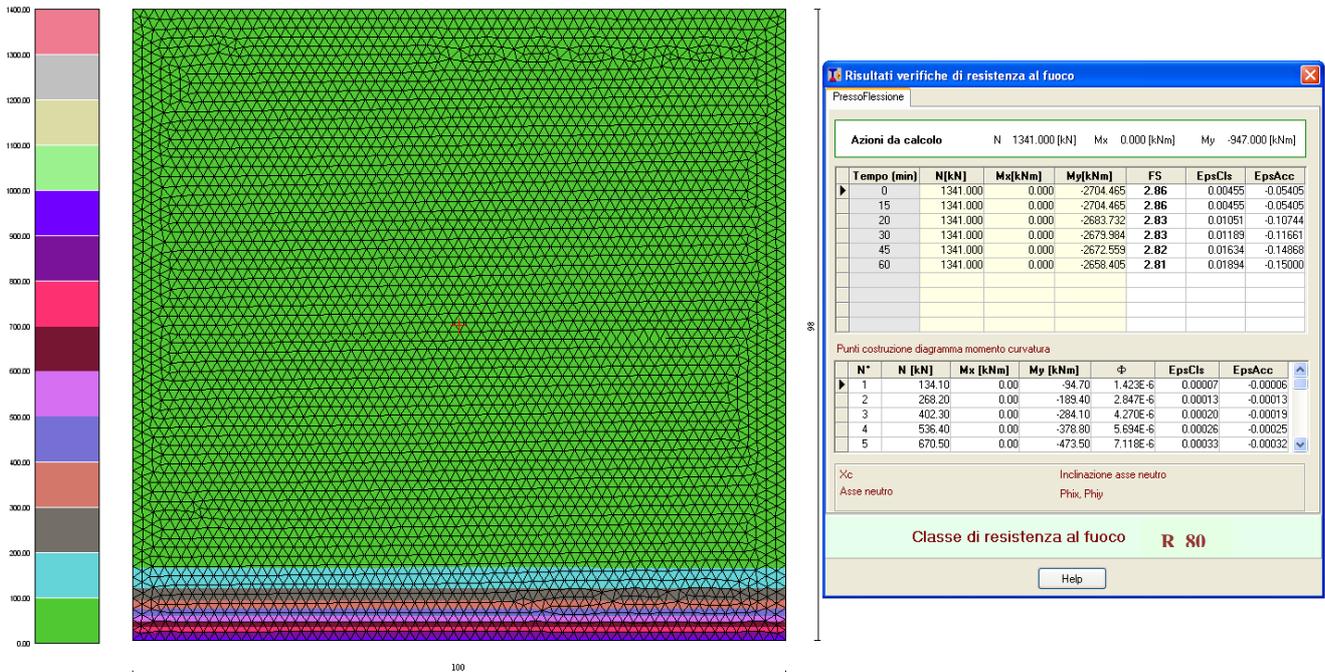


Figura 36 –andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=80min)

Curva incendio EUREKA t = 60 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 3.46.

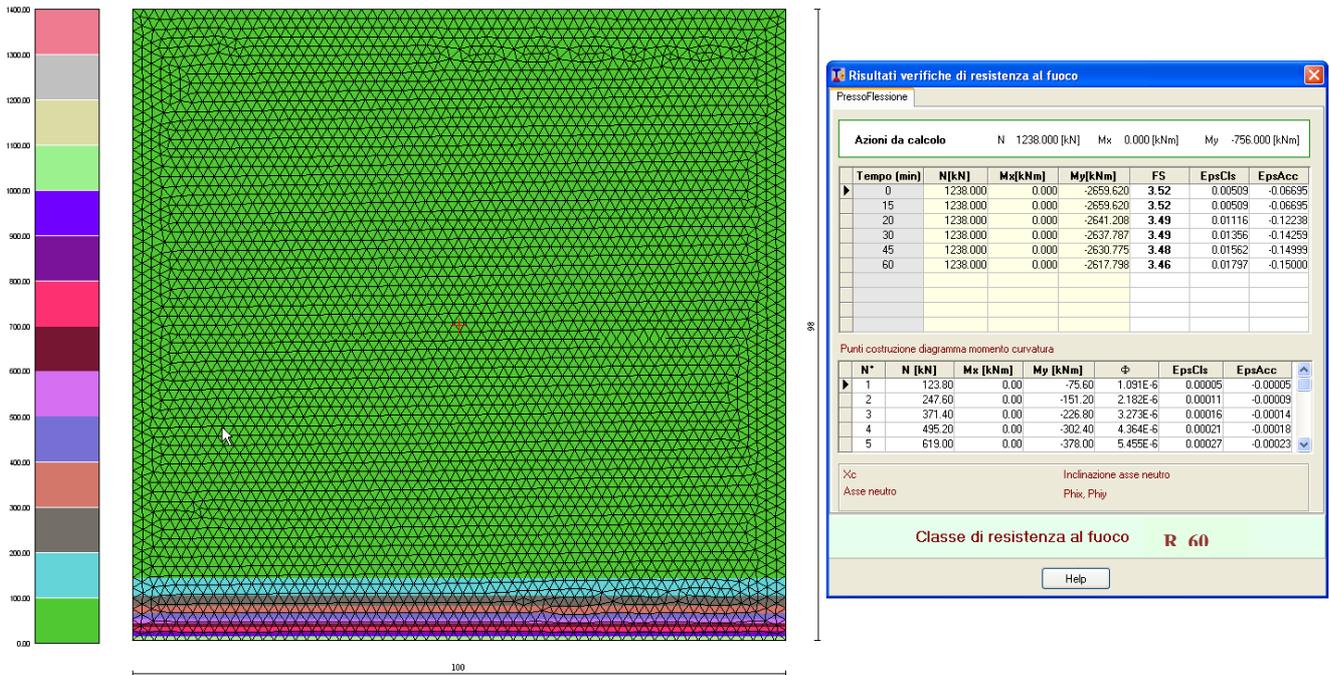


Figura 37 -andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=60min)

5.4.9.2. Sezione di incastro della soletta di copertura

La sezione di incastro della soletta di copertura è armata con barre $\phi 26/10$ all'estradosso e con barre $\phi 26/20$ all'intradosso.

Curva incendio UNI 11076 t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.58.

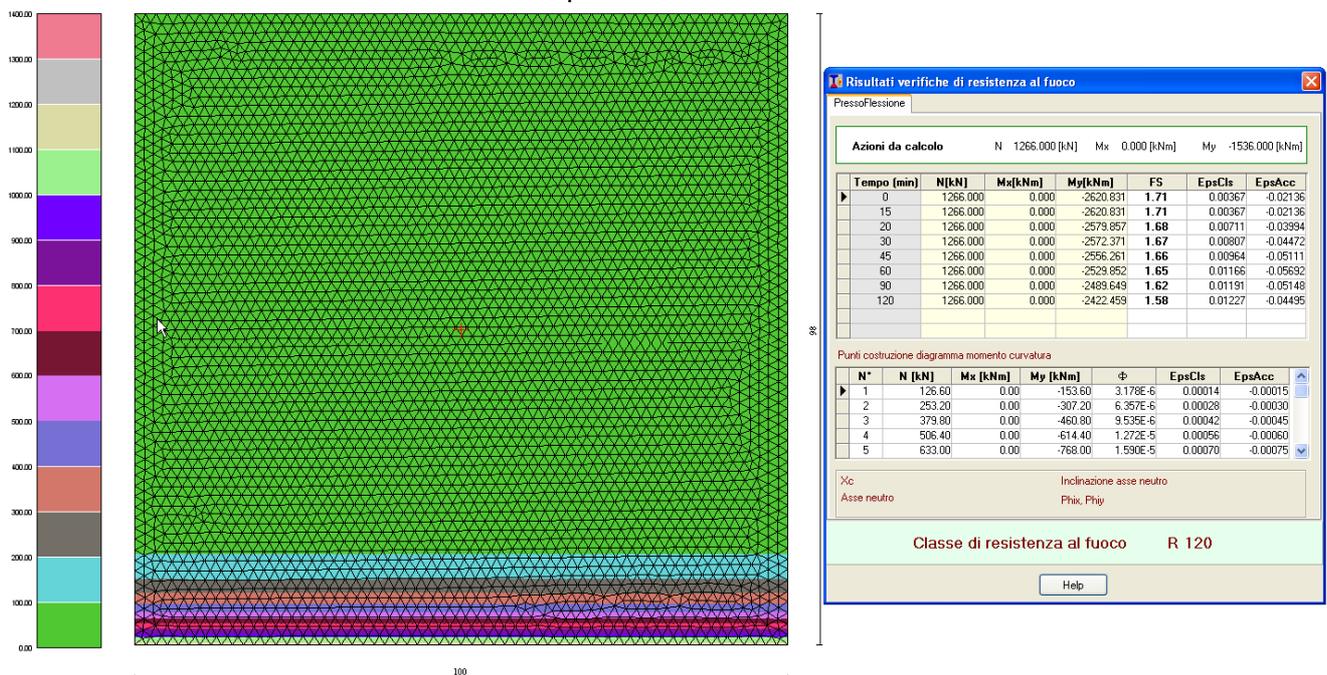


Figura 38 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva UNI t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 80 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza maggiore di 1.

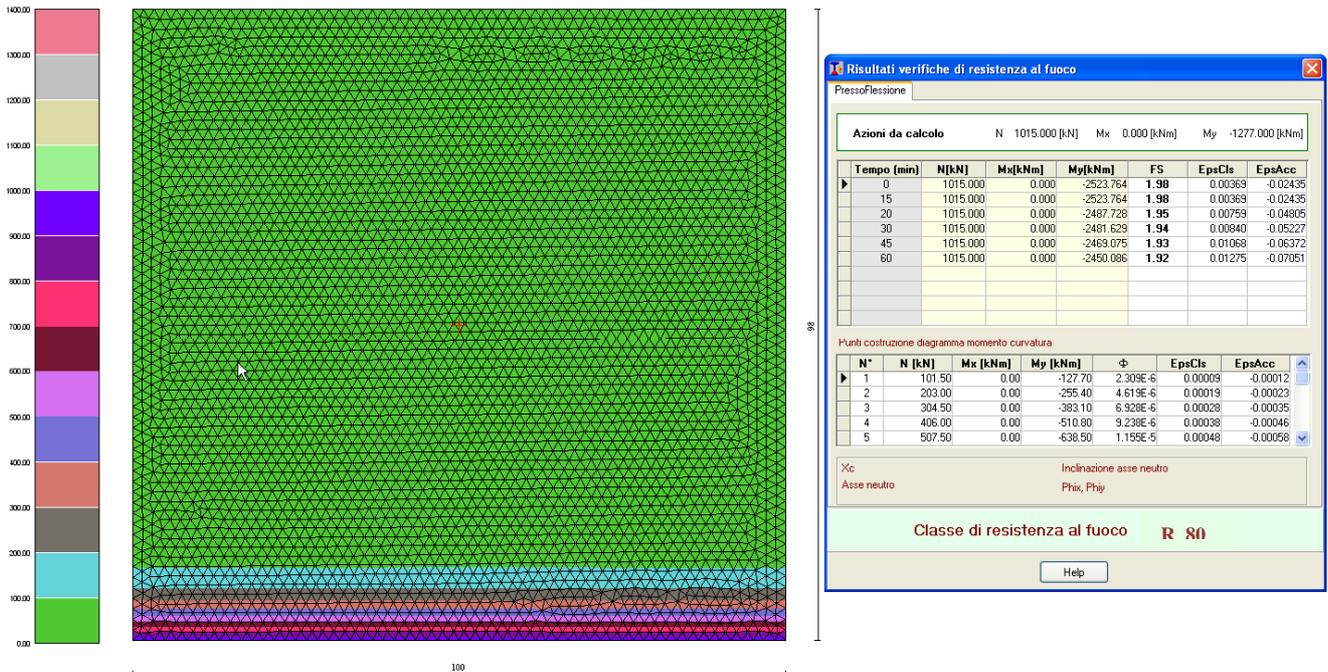


Figura 40 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=80min)

Curva incendio EUREKA t = 60 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 2.21.

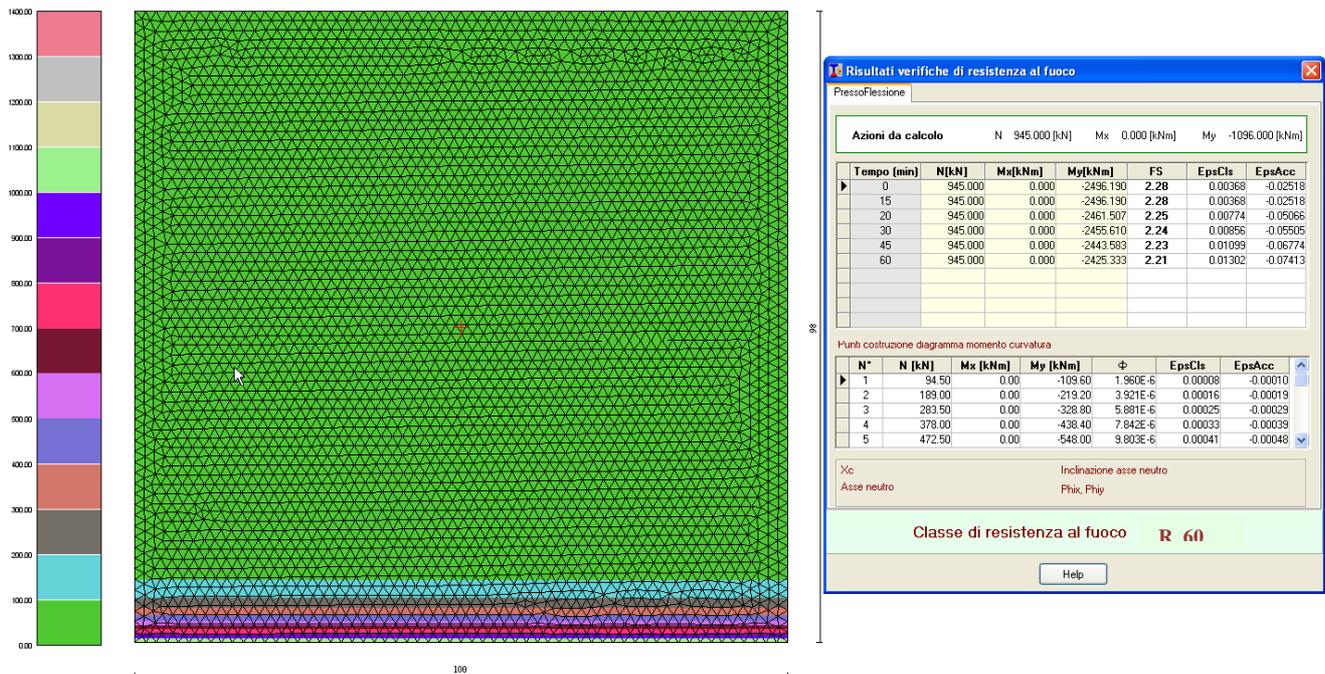


Figura 41 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=60min)

5.4.9.3. Sezione di collegamento piedritto / copertura

La sezione di collegamento del piedritto con la soletta di copertura è armata con barre $\phi 24/10 + \phi 24/20$ all'estradosso e con barre $\phi 24/20$ all'intradosso.

Curva incendio UNI 11076 t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.29.

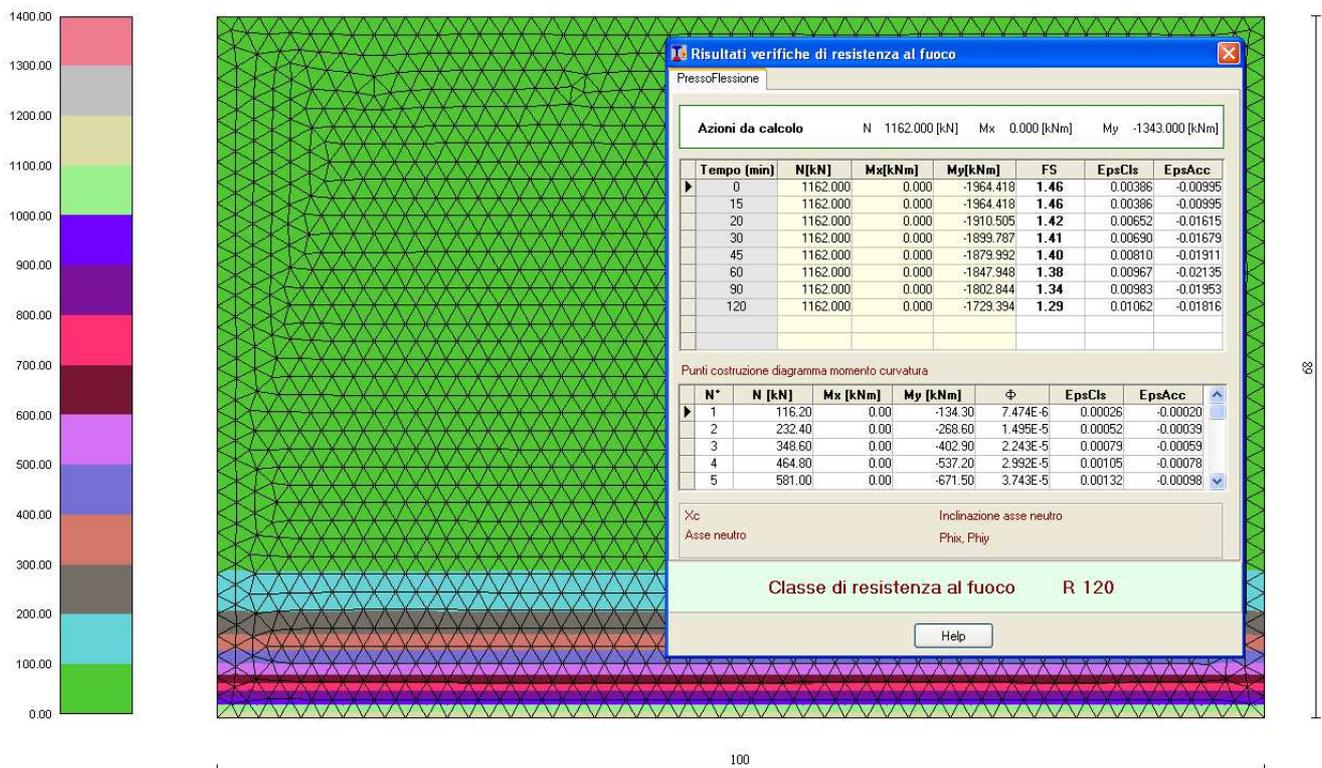


Figura 42 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva UNI t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.00.

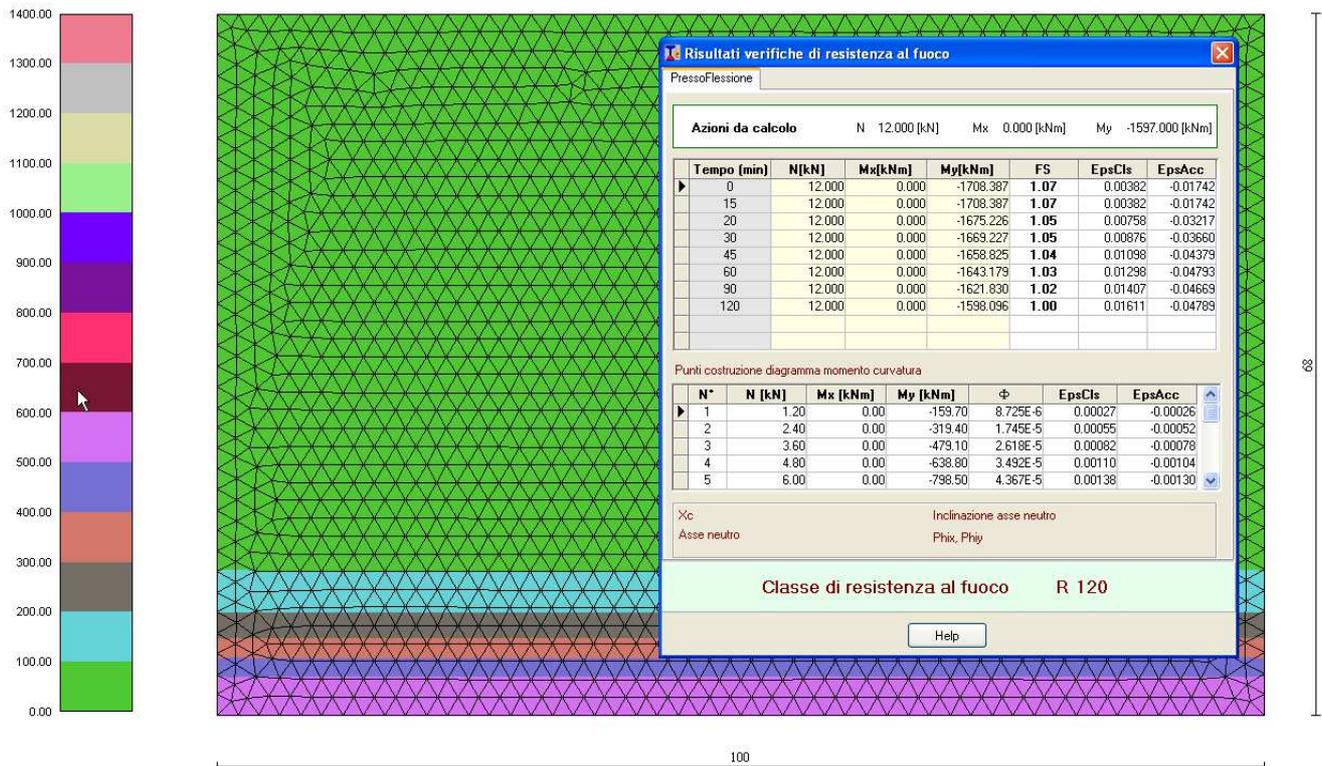


Figura 43 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 80 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza maggiore di 1.

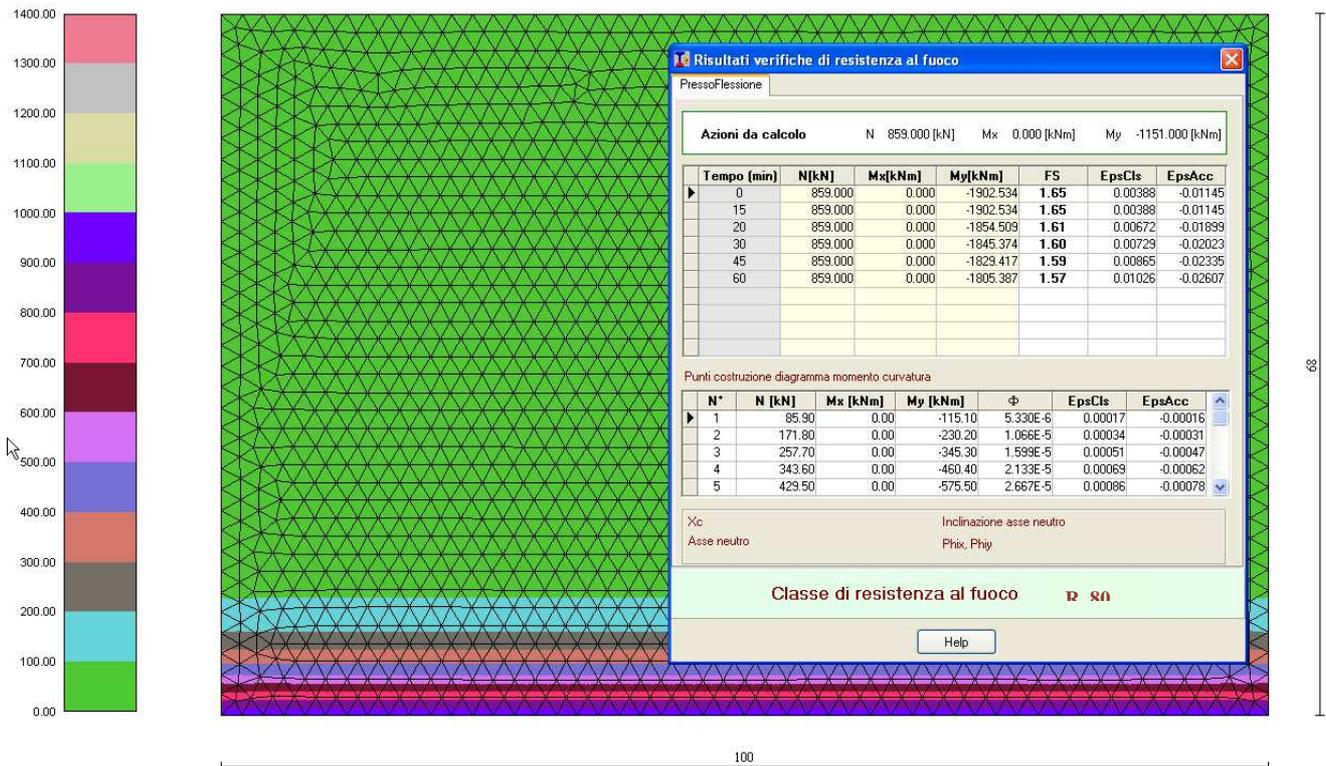


Figura 44 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=80min)

Curva incendio EUREKA t = 60 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.78.

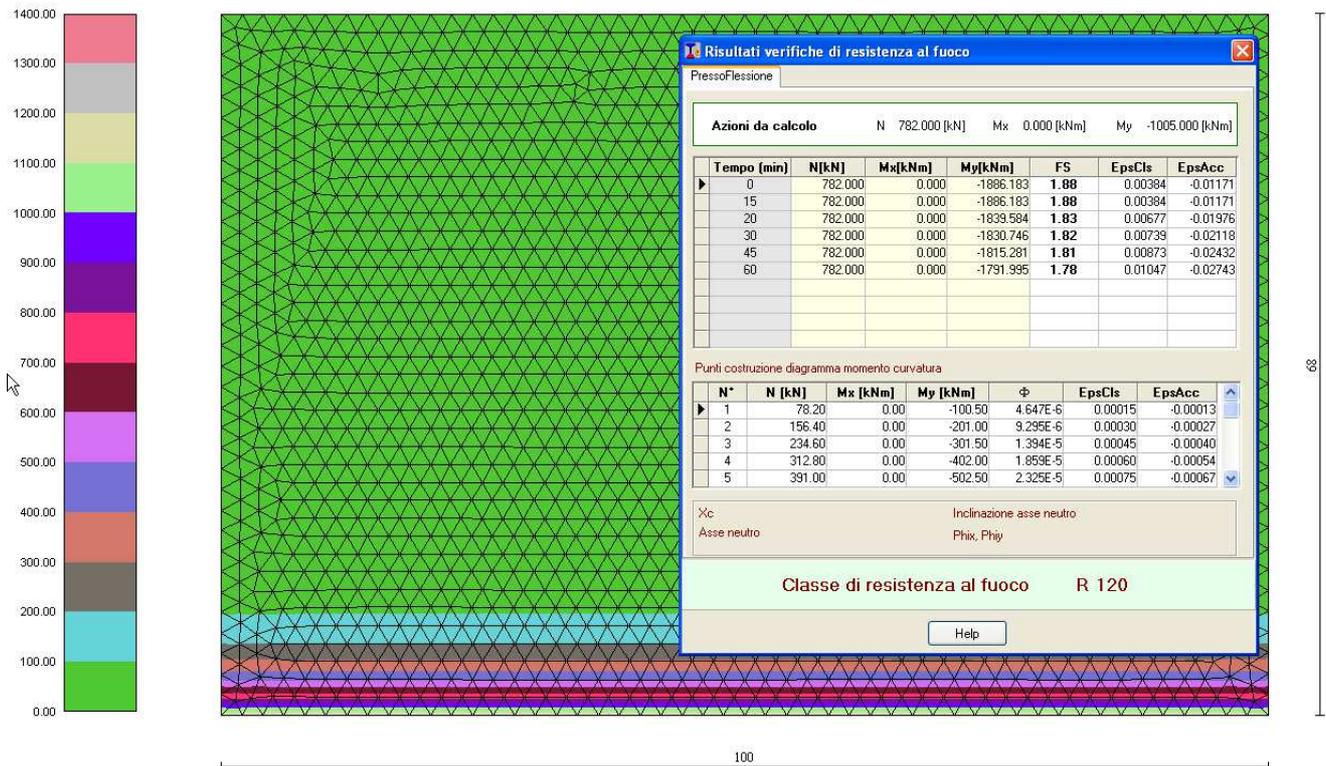


Figura 45 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=60min)

5.4.9.4. Sezione di collegamento piedritto / fondazione

La sezione di collegamento del piedritto con la soletta di fondazione è armata con barre $\varnothing 24/10 + \varnothing 24/20$ all'estradosso e con barre $\varnothing 24/20$ all'intradosso.

Curva incendio UNI 11076 t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.70.

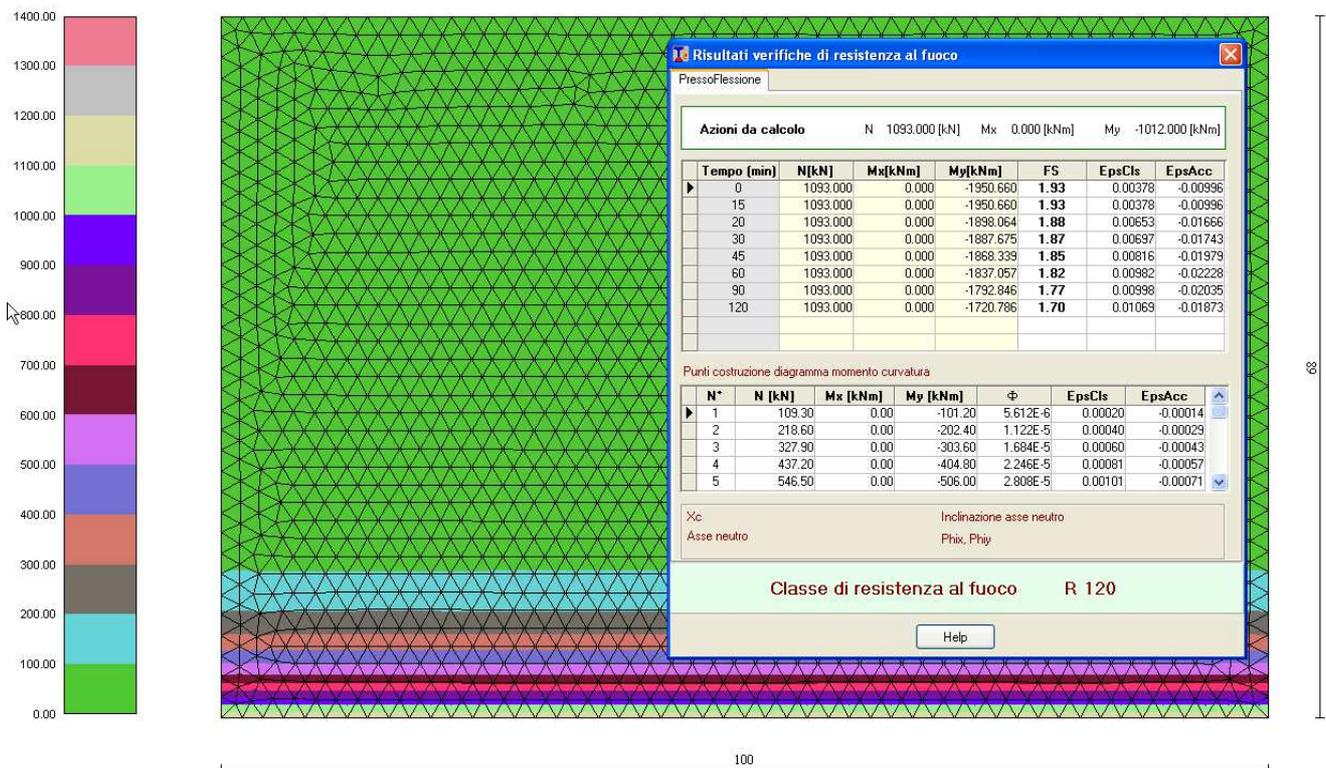


Figura 46 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva UNI t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 120 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 1.25.

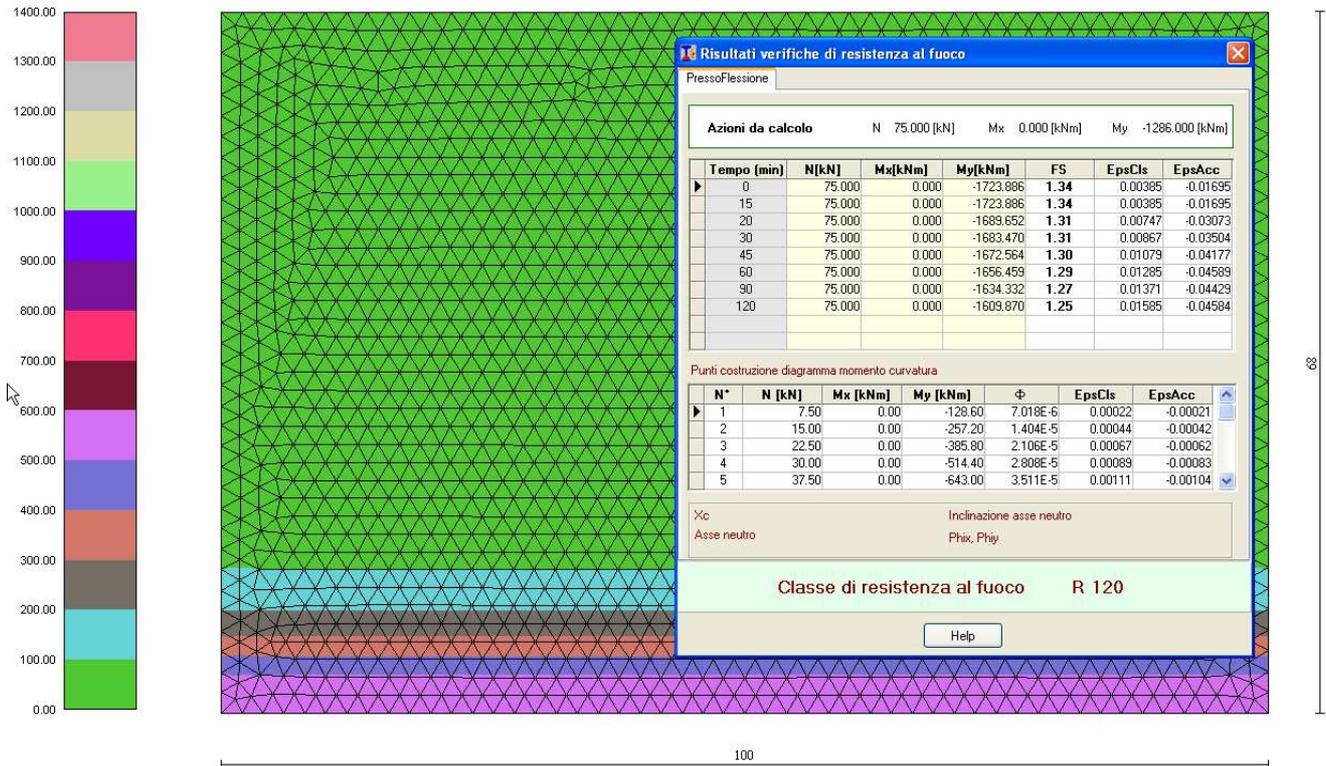


Figura 47 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=120min)

Curva incendio EUREKA t = 80 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza maggiore di 1.

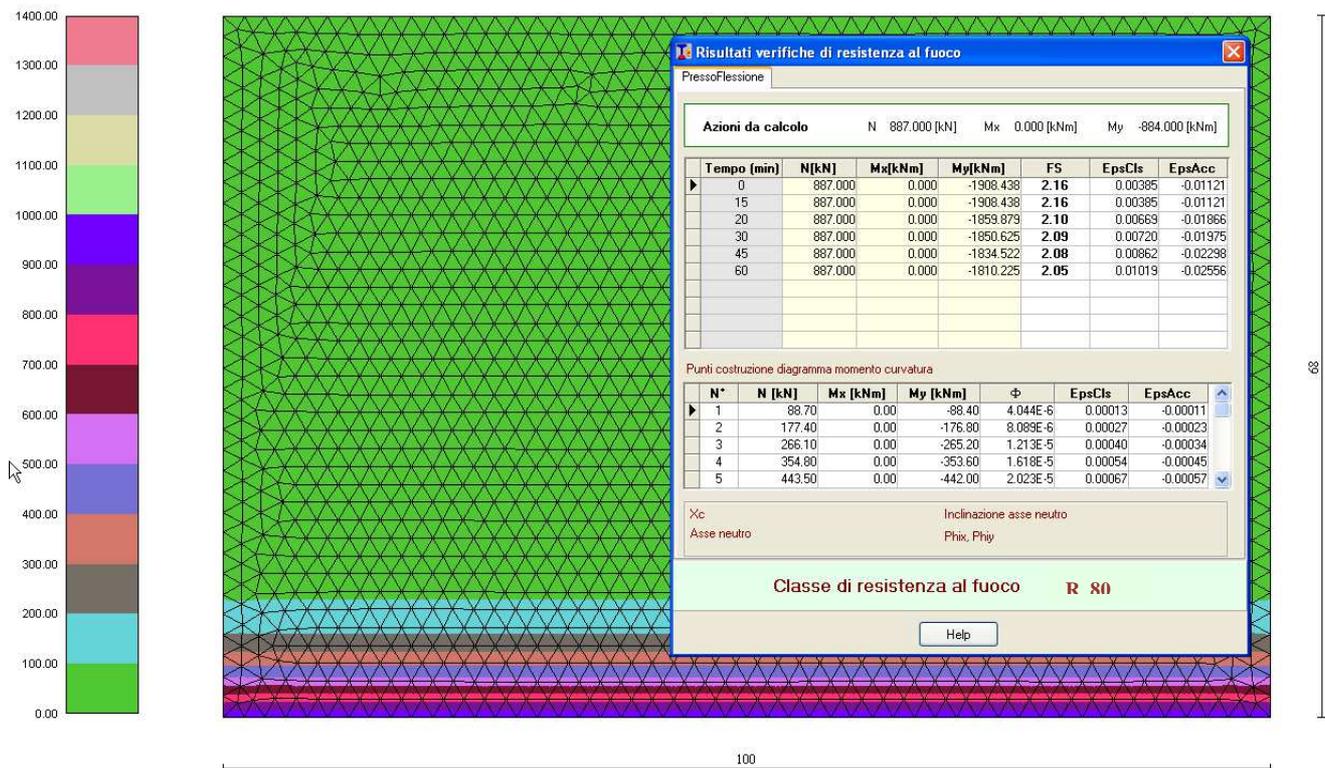


Figura 48 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=80min)

Curva incendio EUREKA t = 60 min

La figura che segue riporta l'andamento delle temperature all'interno della sezione di calcestruzzo. È stata inoltre riportata la tabella con i coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo: la verifica è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a 2.26.

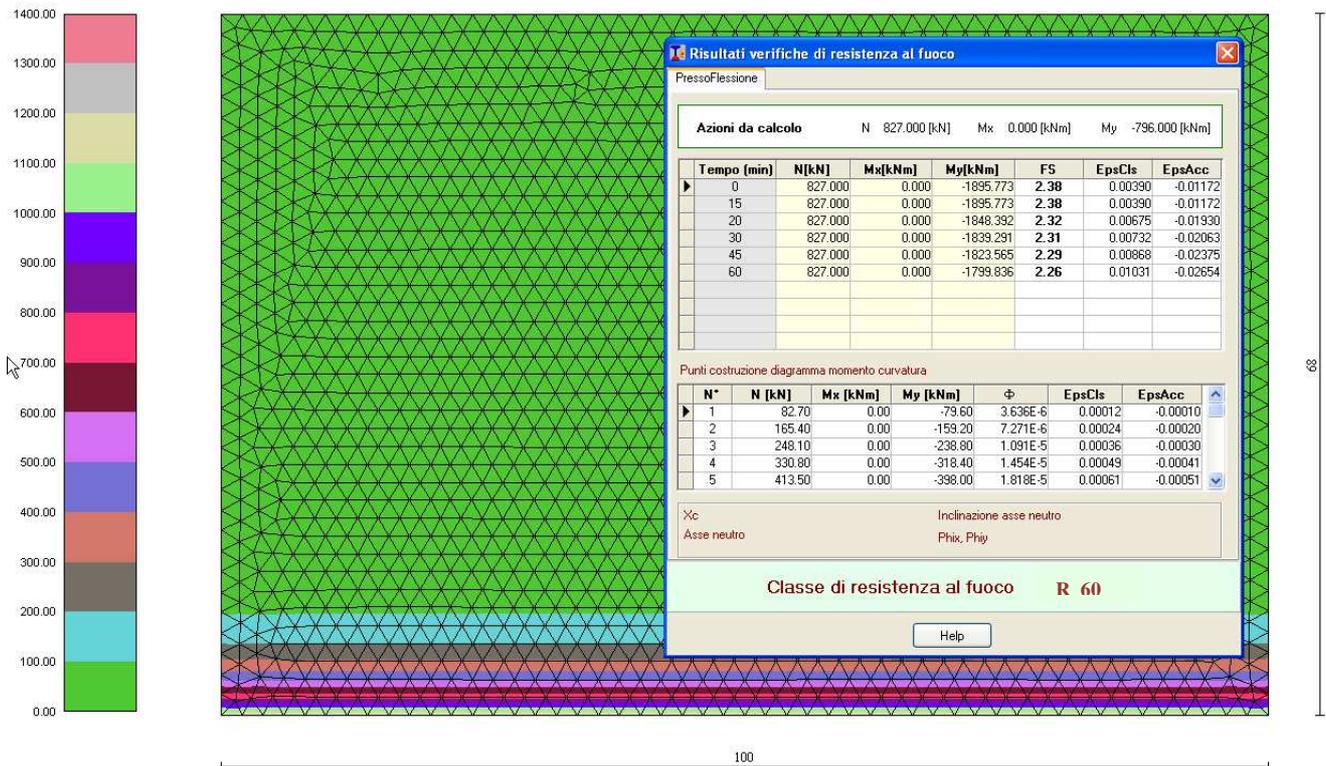


Figura 49 - andamento delle temperature all'interno della sezione in calcestruzzo (curva Eureka t=60min)

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>A3010XDCVRHGA000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 48 di 49</p>

6. CONCLUSIONI

Oggetto del presente elaborato è lo studio del comportamento al fuoco delle tratte di galleria artificiale del Raccordo Tecnico III Valico-Novi Ligure, afferenti alle WBS GAVA e GA41.

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 delle opere. Tali verifiche sono state condotte in conformità a quanto indicato nell'Eurocodice 2 (UNI EN 1992:2005), ottenendo in tutte le condizioni analizzate coefficienti di sicurezza superiori al limite imposto da suddetta normativa.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



A3010XDCVRHGA000001A00

Foglio
49 di 49

ALLEGATI DI CALCOLO