

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Resistenza strutturale al fuoco dei capannoni industriali in c.a. -  
Approccio prescrittivo e prestazionale secondo D.M. 3 agosto 2015**



## **Relatori**

Prof. Alessandro Pasquale Fantilli

Prof. Roberto Vancetti

**Candidato**

Simone Mineo

Dicembre 2019



## INDICE GENERALE

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>8</b>
<b>2. L'INCENDIO NEI CAPANNONI INDUSTRIALI.....</b>	<b>11</b>
2.1. Comportamento del c.a. all'alta temperatura.....	12
2.2. Problematiche strutturali ricorrenti.....	19
2.3. Verifiche strutturali al fuoco secondo D.M. 03/08/2015.....	21
2.3.1 Soluzione conforme: approccio prescrittivo.....	24
2.3.1 Soluzione alternativa: approccio prestazionale.....	27
<b>3. PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO.....</b>	<b>32</b>
3.1. Descrizione generale.....	33
3.2. Premessa: documentazione precedente.....	33
3.3. Classificazione delle attività.....	33
3.4. Processo produttivo e materiali stoccati.....	34
3.5. Macchine, apparecchiature ed attrezzi.....	34
3.6. Condizioni di accessibilità e viabilità.....	35
3.7. Affollamento ambienti.....	35
3.8. Areazione.....	35
3.9. Vie d'esodo.....	36
3.10. Resistenza al fuoco secondo D.M. 09/03/2007.....	36
<b>4. TRATTAZIONE ANTINCENDIO CON D.M. 03/08/2015.....</b>	<b>38</b>
4.0. Valutazione del rischio.....	39
4.0.1 Profilo rischio vita - $R_{vita}$ .....	39
4.0.2 Profilo rischio beni - $R_{beni}$ .....	40
4.0.3 Profilo rischio ambiente - $R_{ambiente}$ .....	40
4.1. Reazione al fuoco - sezione S.1.....	40
4.1.1 Compartimento Magazzino 1+2.....	40
4.1.2 Restanti compartimenti.....	41
4.2. Resistenza al fuoco - sezione S.2.....	41
4.2.1 Compartimento Magazzino 1+2.....	43
4.2.2 Compartimento Magazzino 3+4.....	44

4.2.3	Compartimento Reparto produttivo .....	45
4.2.4	Compartimento Zona uffici .....	46
4.3.	Compartimentazione – sezione S.3.....	47
4.4.	Esodo – sezione S.4 .....	49
4.5.	Gestione della sicurezza antincendio – sezione S.5 .....	49
4.6.	Controllo dell'incendio – sezione S.6.....	50
4.7.	Rivelazione ed allarme – sezione S.7 .....	52
4.8.	Controllo di fumi e calore – sezione S.8.....	53
4.8.1	Compartimento Magazzino 1+2.....	53
4.8.2	Compartimento Magazzino 3+4.....	56
4.8.3	Restanti compartimenti .....	57
4.9.	Operatività antincendio – sezione S.9 .....	58
<b>5.</b>	<b>VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO: APPROCCIO PRESCRITTIVO ....</b>	<b>60</b>
5.1.	Premessa metodologica .....	61
5.2.	Geometria e modellazione 3D .....	62
5.3.	Rilievo fotografico.....	64
5.4.	Sezioni .....	66
5.5.	Materiali.....	69
5.5.1	Calcestruzzo C30/37 .....	69
5.5.2	Acciaio Fe44k .....	70
5.6.	Carichi e combinazioni di calcolo .....	71
5.7.	Analisi termica e verifiche strutturali .....	73
5.7.1	Pilastro centrale sezione I - REI 30 .....	73
5.7.2	Pilastro centrale rettangolare 45,5x40 - REI 240 .....	74
5.7.3	Pilastro di bordo rettangolare 45,5x40 - REI 240 .....	76
5.7.4	Pilastro centrale rettangolare 40x50 - REI 240 .....	78
5.7.5	Trave sezione T - REI 240 .....	79
5.7.6	Trave sezione T - REI 30 .....	81
5.7.7	Trave sezione I - REI 240.....	83
5.7.8	Trave sezione I - REI 30.....	84
5.7.9	Tegolo H=25 cm - REI 240.....	86

5.7.10	Tegolo H=25 cm - REI 30 .....	87
5.7.11	Tegolo H=40 cm - REI 240 .....	89
5.8.	Analisi di sensibilità: influenza delle resistenze meccaniche dei materiali .....	90
5.8.1	Trave sezione T .....	94
5.8.2	Trave sezione I .....	95
5.8.3	Tegolo H=25 cm.....	96
5.8.4	Tegolo H=40 cm.....	97
5.8.5	Pilastro sezione I .....	98
5.8.6	Pilastri rettangolari .....	99
5.9.	Discussione dei risultati e proposte di intervento .....	100
5.10.	Sistemi di protezione passiva al fuoco.....	101
5.10.1	Protettivi reattivi: pitture intumescenti.....	102
5.10.2	Protettivi spruzzati: intonaci ignifughi .....	106
5.10.3	Protettivi in lastre: controsoffitti antincendio.....	110
5.11.	Confronto tra i sistemi di protezione .....	114
<b>6.</b>	<b>VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO: APPROCCIO PRESTAZIONALE</b>	<b>118</b>
6.1.	Premessa metodologica .....	119
6.2.	Individuazione e selezione scenari di incendio .....	120
6.3.	Quantificazione degli scenari e modellazione Pyrosim.....	121
6.3.1	Scenario A.....	121
6.3.2	Scenario B .....	133
6.4.	Elaborazione soluzione progettuale.....	134
6.5.	Risultati simulazione degli scenari .....	136
6.6.	Verifiche strutturali con curve naturali.....	138
6.6.1	Trave a T – DE5 .....	139
6.6.2	Tegolo H=25 cm – 45 c.....	140
6.6.3	Tegolo H=25 cm – 45 e.....	142
6.6.4	Pilastro rettangolare 45,5x50 – C4.....	143
6.7	Analisi di sensibilità: influenza delle resistenze meccaniche dei materiali .....	145
6.7.1	Trave a T – DE5 .....	145
6.7.2	Tegolo H=25 cm – 45 c.....	145

6.7.3	Tegolo H=25 cm – 45 e.....	146
6.7.4	Pilastro rettangolare 45,5x50 – C4.....	146
6.8	Estrapolazione dei risultati delle verifiche strutturali.....	147
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>148</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>153</b>
	<b>ALLEGATI.....</b>	<b>156</b>
A.1.	Classificazione di Resistenza al fuoco secondo D.M. 9 marzo 2007 .....	157
A.2.	Computo Metrico Estimativo sistemi di protezione passiva al fuoco .....	159
A.3.	Estratti tabelle numeriche delle curve naturali di Pyrosim .....	160



# **CAPITOLO I**

---

## **INTRODUZIONE**

L'incendio, inteso come il complesso dei fenomeni comportanti lo sviluppo di fiamme, calore e fumo, rappresenta da sempre una minaccia per l'incolumità delle persone e la salvaguardia dei beni. Se da una parte, il rapido sviluppo tecnologico ha consentito uno straordinario aumento di conoscenze e un'intensificazione delle sperimentazioni sui materiali e i mezzi atti a limitare le conseguenze, dall'altra ne ha moltiplicato il rischio.

In termini strutturali, l'incendio è particolarmente critico negli edifici industriali esistenti, soprattutto se datati. Ciò è da intendersi come conseguenza delle caratteristiche peculiari rispetto ad altre destinazioni d'uso: sottili coprifermo nelle sezioni resistenti in c.a., ampia superficie dei compartimenti antincendio, particolarità delle lavorazioni svolte, nonché la quantità e tipologia di materiale stoccato, spesso pericoloso o con elevato potere calorifico.

**La presente Relazione di Tesi analizza la sicurezza strutturale in caso d'incendio nei capannoni industriali esistenti in c.a. prefabbricato, alla luce del nuovo D.M. 12 aprile 2019.** Tale Decreto, aggiorna le precedenti *Norme tecniche di prevenzione incendi*: D.M. 3 agosto 2015. Infatti, pur riconfermandone il contenuto, ne varia il campo di applicazione, rendendolo obbligatorio per le attività soggette (secondo D.P.R. n. 151/2011) ma non normate, come in sostanza la maggior parte dei capannoni industriali. Per quanto concerne la Progettazione Strutturale al Fuoco, viene quindi eliminato il doppio binario D.M. 9 marzo 2007 - D.M. 3 agosto 2015.

Dopo una breve illustrazione delle problematiche connesse all'incendio nelle strutture in c.a. prefabbricato e la spiegazione della metodologia adottata nel Decreto (Capitolo II), viene presentato un caso studio reale (Capitolo III). Si tratta di un capannone industriale degli anni '90, sito in provincia di Torino e destinato alla produzione di pennarelli per la scrittura.

In seguito all'applicazione delle sezioni "G - Generalità" ed "S – Strategie antincendio" del D.M. 3 agosto 2015, risultando un livello di prestazione III per la strategia Resistenza al fuoco (Capitolo IV), vengono percorse le due strade possibili: soluzione conforme (approccio prescrittivo) o soluzione alternativa (approccio prestazionale).

**L'obiettivo principale della Tesi consiste nel confrontare i due approcci, esplicitandone le differenze sia riguardo le modalità di verifica, sia soprattutto in termini di soluzioni di adeguamento che ne conseguono.**

Come approfondito al Capitolo V, la soluzione prescrittiva (conforme) prevede di adottare per le verifiche, le curve temperatura-tempo nominali, applicandole per un tempo in minuti pari al valore della classe minima di resistenza al fuoco ricavata. Tali curve standard non presentano alcuna connessione diretta con l'incendio reale, ma

hanno il pregio di fornire un ambiente di riferimento sufficientemente gravoso, rispetto al quale certificare elementi strutturali e prodotti.

Diversamente, l'approccio prestazionale o ingegneristico (soluzione alternativa), consente di eseguire le analisi dall'innesco della combustione fino a quando, nella fase di raffreddamento, gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini strutturali. Inoltre, prevede l'adozione delle curve naturali. In altre parole, è possibile descrivere lo sviluppo della temperatura in uno specifico compartimento, dopo aver modellato l'incendio in maniera realistica e tenendo conto delle effettive condizioni al contorno: carico di incendio, ventilazione, presenza di sistemi di protezione attiva, impianti di rilevazione incendio e di smaltimento fumi e calore. Questo, in alcuni casi, può consentire di dimostrare l'idoneità di soluzioni antincendio alternative.

Infine, si è **studiata l'influenza della variabilità dei parametri di resistenza dei materiali sulla Resistenza al fuoco degli elementi**, grazie ai risultati di alcune ricerche eseguite su calcestruzzi e acciai di capannoni industriali.

## **CAPITOLO II**

---

### **L'INCENDIO NEI CAPANNONI INDUSTRIALI**

Scopo del presente capitolo, è descrivere i metodi normativi per la Progettazione Strutturale al Fuoco (§2.3), previa analisi delle conseguenze strutturali indotte dall'incendio. Nello specifico, si approfondisce il caso dei capannoni industriali esistenti, realizzati in calcestruzzo armato prefabbricato. Sebbene gli effetti negativi siano in buona parte riconducibili al danneggiamento dei materiali (§2.1), ci sono altri fattori di cui tener debitamente conto (§2.2).

## 2.1. Comportamento del c.a. all'alta temperatura

I materiali strutturali esposti all'alta temperatura subiscono alterazioni della struttura, cambiamenti di stato e reazioni chimico-fisiche con eventuale scomparsa di porzioni di materiale. Ciò comporta non solo l'alterazione delle proprietà termofisiche, ma anche il decadimento delle prestazioni meccaniche. Per ogni materiale, le conseguenze possono essere molto diverse e dipendono dalle caratteristiche intrinseche di ciascuno.

Considerato l'obiettivo della presente relazione di Tesi, si è approfondito nel seguito il comportamento all'elevata temperatura del calcestruzzo armato, sintetizzando i concetti riportati ai paragrafi §1.4.1 e §5.2 del testo *Strutture Resistenti al Fuoco* [1].

A differenza degli altri materiali strutturali, il **calcestruzzo** mantiene buone caratteristiche di resistenza meccanica e di stabilità dimensionale fino a 400-500°C, è incombustibile, oltre che un ottimo isolante. Nonostante ciò, è vulnerabile al fuoco e può dirsi sensibile:

- alle temperature oltre i 400-500°C, che producono danni irreversibili;
- ai processi fisico-chimici che interessano i suoi componenti eterogenei;
- ai gradienti termici ( $\Delta T/\Delta x$ ;  $\Delta T/\Delta t$ ), non trascurabili a causa della bassa conducibilità termica. Questi sono responsabili dell'insorgenza di autotensioni di natura termica;
- alla perdita di peso, causata dall'espulsione di acqua;
- alle variazioni di porosità della pasta cementizia;
- all'incompatibilità cinematica di natura termica fra pasta cementizia ed aggregato medio/grosso. Infatti, nonostante “il calcestruzzo, considerato omogeneo a livello mesostrutturale, si dilati isotropicamente all'aumentare della temperatura, ben diverse sono le dilatabilità dei suoi componenti” [1]. Come si evince dal grafico sottostante infatti, la pasta cementizia “espande fino a 130-250°C per l'aumento di volume dell'acqua [...], poi si ritira per l'espulsione dell'acqua libera e dell'acqua

del gel fin tanto che ricomincia ad espandere. Al contrario, l'aggregato espande sempre con regolarità". Il fatto che il calcestruzzo espanda sempre, anche quando la pasta cementizia ritira, è da intendersi come conseguenza della % dell'aggregato rispetto al volume totale: intorno al 65-80%. Tale incompatibilità tende addirittura ad aumentare con il raffreddamento del calcestruzzo, non essendo più mitigata dalla viscosità termica transitoria TTC: Khoury (2000); Bazant e Kaplan (1996).

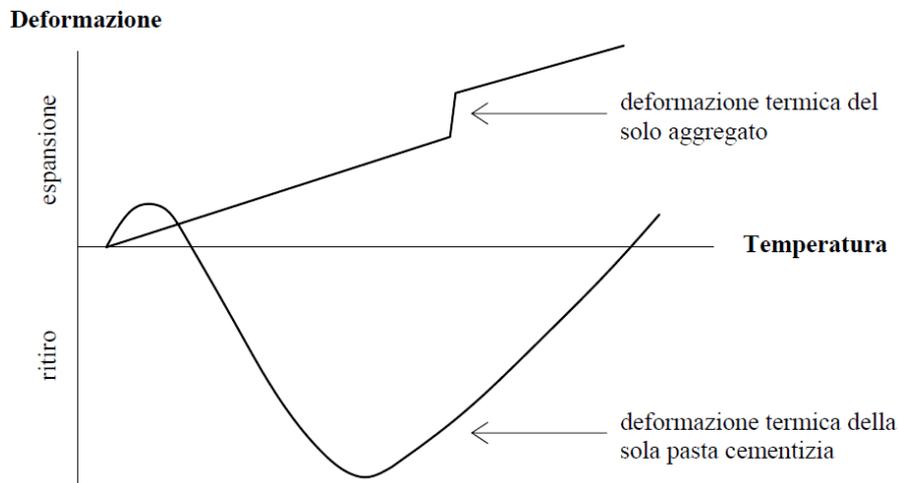


Fig.1 §2. – Andamenti dell'espansione e del ritiro di pasta cementizia e aggregato

Un'altra problematica ricorrente nel calcestruzzo è il cosiddetto "spacco superficiale (spalling, esplosivo o graduale, esteso o localizzato, in genere presente fra 200°C e 400°C), causato dall'interazione fra pressione del vapor acqueo nei pori capillari, autotensioni di origine termica e tensioni di compressione dovute ai carichi" [1].

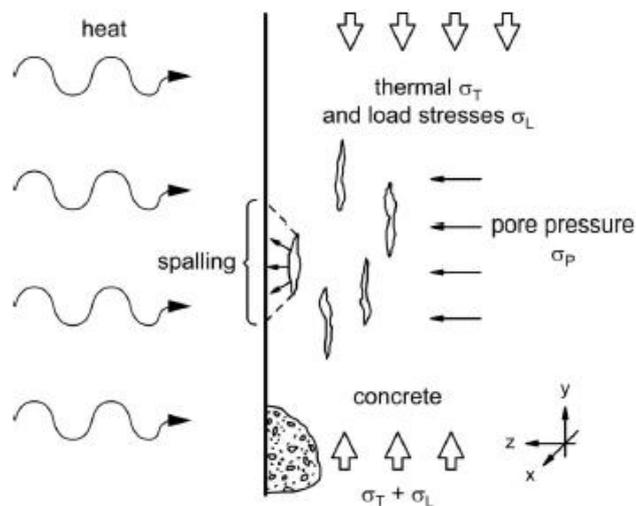


Fig.2 §2. – Cause dello spacco superficiale da Khoury, 2000 [3]

Per quanto concerne l'**acciaio** invece, questo è un buon conduttore ed è incombustibile. L'elevata conducibilità termica favorisce l'uniformità del campo termico e scongiura la presenza di elevati gradienti termici, come nel caso del calcestruzzo.

Tra gli altri vantaggi, si annovera il “coefficiente di dilatazione termica assai prossimo a quello del calcestruzzo (almeno fra i 20 e gli 800 °C), a vantaggio dell'aderenza reciproca nel c.a. [...] e il recupero (in parte) delle caratteristiche meccaniche iniziali, specialmente se la lavorazione dell'acciaio è stata a caldo” [1].

Come osservato all'inizio del paragrafo, la variazione di temperatura produce un'alterazione delle proprietà termo-fisiche (conducibilità, calore specifico, coefficiente di dilatazione ecc.), ma soprattutto incide le prestazioni meccaniche dei materiali. **Nel seguito si approfondisce la variazione delle leggi costitutive e il decadimento meccanico dei parametri di resistenza, per acciaio d'armatura e calcestruzzo.**

Sulla base di evidenze sperimentali, per entrambi i materiali soggetti ad elevate temperature, sono stati formulati legami costitutivi descritti da equazioni matematiche. La loro costruzione richiede la preventiva definizione di alcuni parametri, variabili con la temperatura. Quest'ultimi sono definiti in tabelle contenute nell'*EC2* [11] e dipendono in ultima istanza dalla tipologia di acciaio o calcestruzzo adottato.

Nel caso del calcestruzzo, i parametri sono 2:

- $f_{c,\theta}$  = resistenza massima a compressione;
- $\varepsilon_{c1,\theta}$  = deformazione corrispondente a  $f_{c,\theta}$ ;

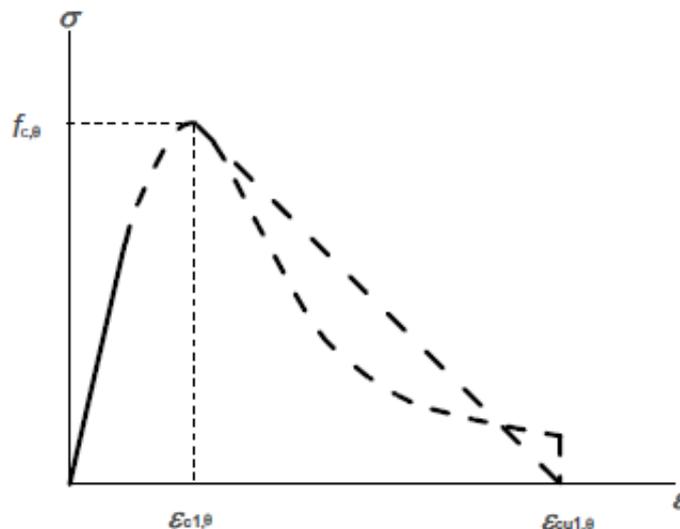


Fig. 3 §2. – Grafico del modello matematico della curva sforzo-deformazione per calcestruzzi ad elevate temperature, secondo EC2

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.

Fig. 4 §2. – Equazioni del modello matematico della curva sforzo-deformazione per calcestruzzi ad elevate temperature, secondo EC2

Si riportano a titolo esemplificativo le leggi costitutive per calcestruzzi con inerte siliceo, ricavate per diverse temperature, mediante le equazioni introdotte in Fig. 5.

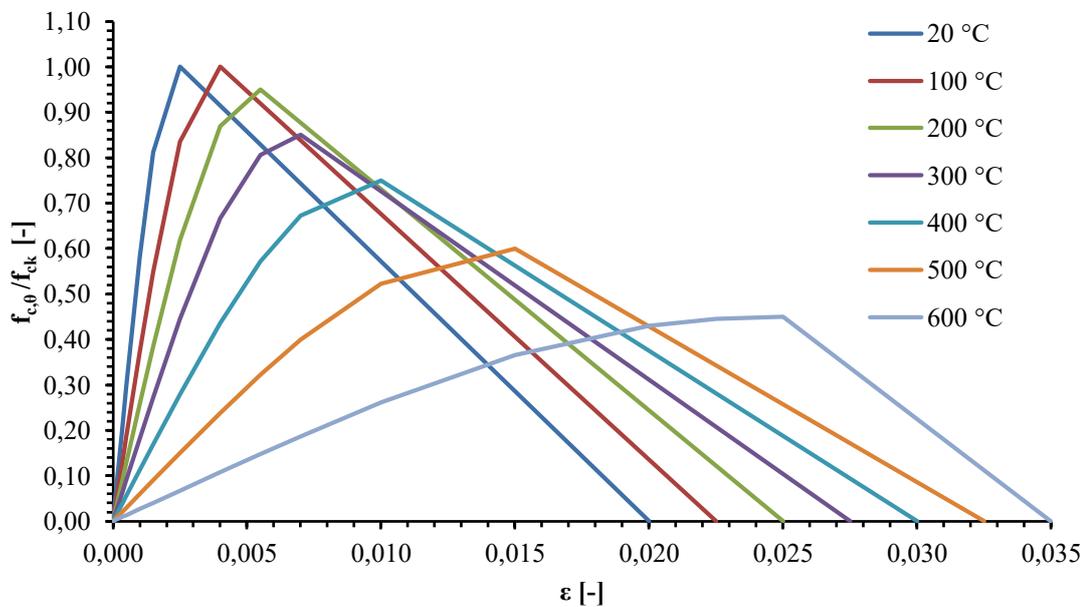


Fig.5 §2. – Leggi costitutive calcestruzzi con inerte siliceo, secondo EC2

Mentre, per quanto concerne l'acciaio d'armatura, i parametri da definire sono 3:

- modulo elastico  $E_{s,\theta}(T)$ ;
- limite di proporzionalità  $f_{sp,\theta}(T)$ ;
- tensione di snervamento  $f_{sy,\theta}(T)$ ;

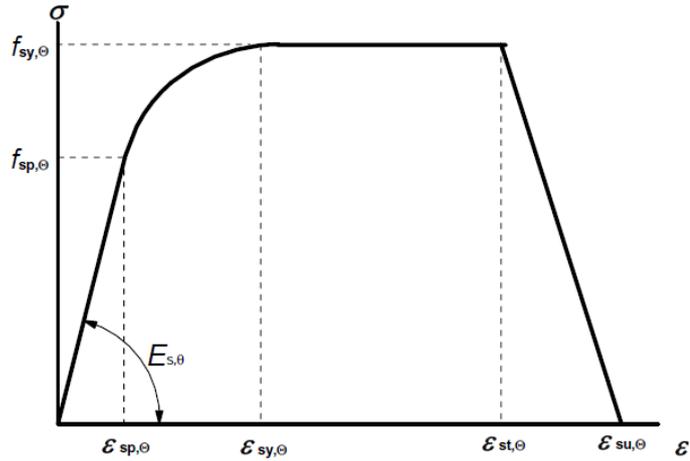


Fig. 6 §2. – Grafico del modello matematico della curva sforzo-deformazione per acciai da armatura ad elevate temperature, secondo EC2

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

Fig. 7 §2. – Equazioni del modello matematico della curva sforzo-deformazione per acciai da armatura ad elevate temperature, secondo EC2

A titolo di esempio si riportano le leggi costitutive di un acciaio d'armatura laminato a caldo di classe N, per diverse temperature. Si è ipotizzato  $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$  e  $f_{yk} = 430 \text{ N/mm}^2$ .

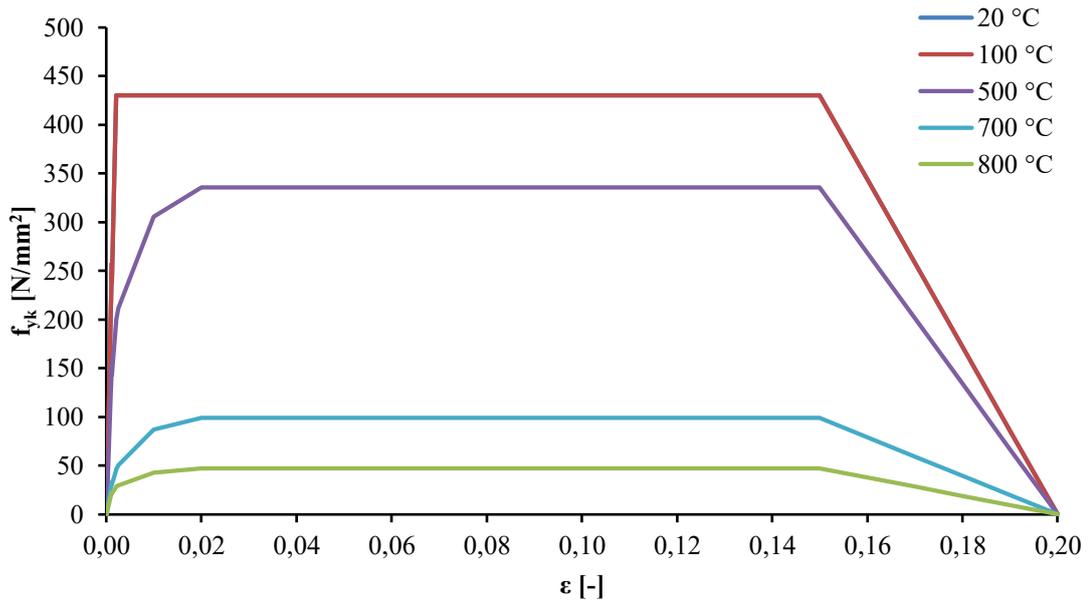
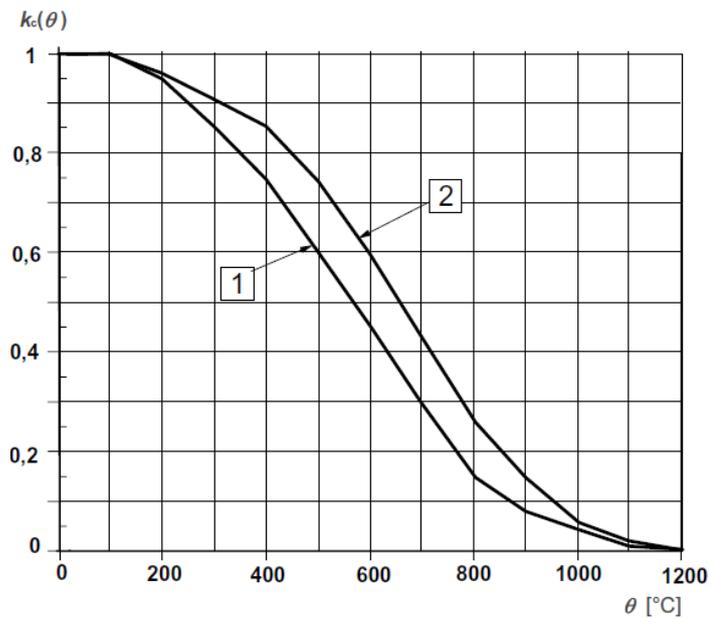


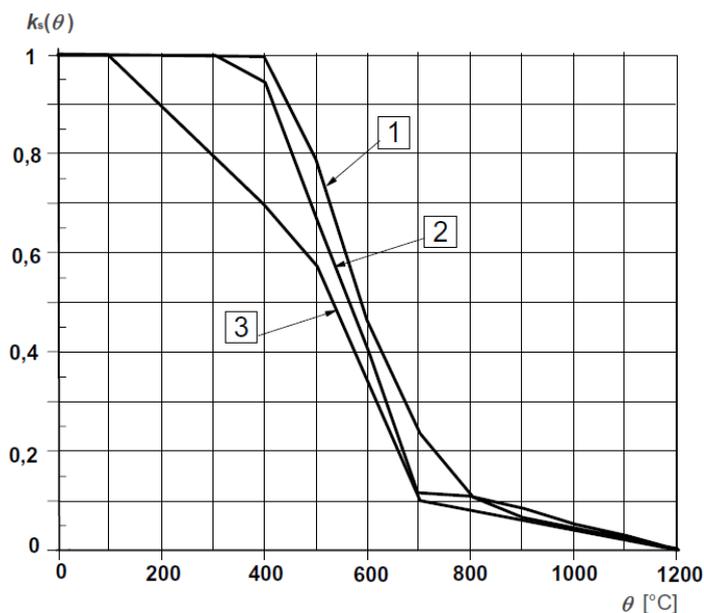
Fig. 8 §2. – Leggi costitutive acciaio d'armatura laminato a caldo di classe N, nell'ipotesi di  $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$  e  $f_{yk} = 430 \text{ N/mm}^2$

Per concludere, si riportano la leggi di decadimento dei parametri di resistenza in funzione della temperatura, per calcestruzzi e acciai d'armatura, secondo l'EC 2 [5].



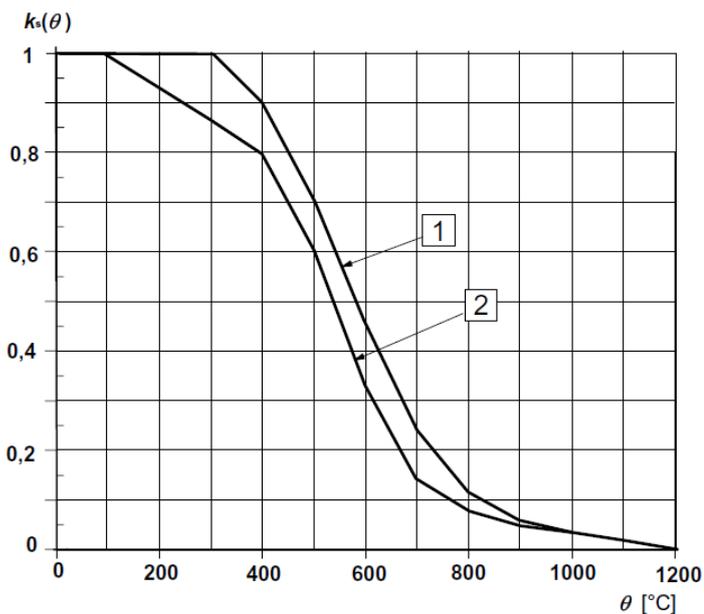
- [1] = calcestruzzo con aggregato siliceo  
 [2] = calcestruzzo con aggregato calcareo

Fig.9 §2. – Coefficiente di decadimento della resistenza a compressione del calcestruzzo ( $f^T_{ck} / f^{20}_{ck}$ ) in funzione della temperatura, secondo §.4.2.4.2 dell'EC2 [5]



- [1] = armature di trazione laminate a caldo, per  $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- [2] = armature di trazione laminate a freddo, per  $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- [3] = armature di trazione e compressione, per  $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$

Fig.10 §2. – Coefficiente di decadimento della resistenza caratteristica per armature di classe N ( $f_y^T/f_y^{20}$ ) in funzione della temperatura, secondo §.4.2.4.3 dell'EC2 [5]



- [1] = armature di trazione laminate a caldo e a freddo, per  $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- [2] = armature di trazione e compressione laminate a caldo a freddo, per  $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$

Fig.11 §2. – Coefficiente di decadimento della resistenza caratteristica per armature di classe X ( $f_y^T/f_y^{20}$ ) in funzione della temperatura, secondo §.4.2.4.3 dell'EC2 [5]

2.2. Problematiche strutturali ricorrenti

Sebbene il principale effetto negativo indotto dall'alta temperatura sia il danneggiamento dei materiali, questo non fornisce una chiave di lettura esaustiva per comprendere il comportamento strutturale in caso di incendio. In riferimento ai capannoni industriali in c.a. prefabbricato esistenti, risulta essenziale considerare anche i seguenti fattori, molti dei quali hanno implicazioni dirette nelle operazioni di verifica:

- deformazioni termiche, che se impedite comportano la nascita di **azioni sollecitanti aggiuntive**. Questo fenomeno non è così ricorrente nel caso dei capannoni industriali prefabbricati, in cui gli schemi strutturali sono perlopiù isostatici. Tuttavia, è bene precisare che la condizione di isostaticità non esclude a priori l'insorgenza di extra-azioni. A tal proposito, si considerino i seguenti esempi:

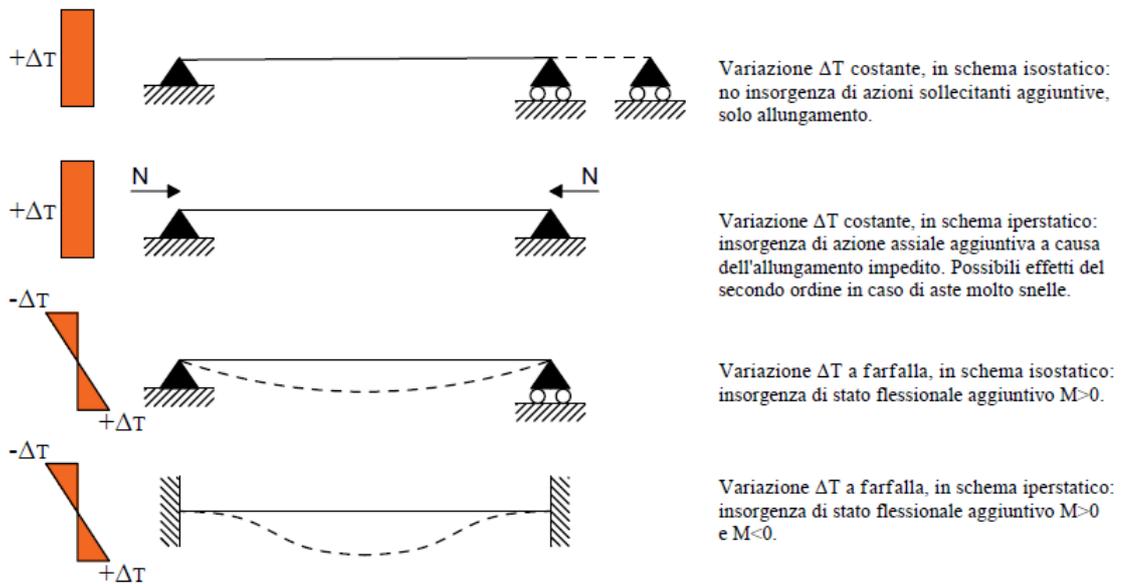


Fig.12 §2. – Effetti della temperatura per alcuni schemi strutturali

- la condizione di isostaticità è al tempo stesso un elemento di debolezza. I sistemi isostatici, a differenza di quelli iperstatici infatti, **non beneficiano delle riserve plastiche**: una struttura isostatica degenera in un meccanismo e può collassare in seguito alla formazione della prima cerniera plastica (nella sezione più sollecitata). Può venir meno il principio di Robustezza, richiamato al §2.1 delle *NTC 2018* [5];
- **Perforazione delle anime sottili** nel caso di elementi con sezione a “I”, “T” o “V”;

- I capannoni industriali nella maggior parte dei casi ricadono nell'ambito delle attività soggette, ma non normate. L'individuazione dei livelli di prestazione (classi di resistenza) è regolata dalla sezione S.2 "Resistenza al Fuoco" del D.M. 3 agosto 2015 [7], indipendentemente che si adotti un approccio prescrittivo o prestazionale per le verifiche. In tal senso, le classi di resistenza possono risultare elevate (120-240 minuti), il che è da intendersi come conseguenza delle **ampie aree dei compartimenti; delle lavorazioni svolte; dei quantitativi di materiale stoccato, spesso pericoloso o con elevato potere calorifico. Aspetti che rendono l'incendio atteso più gravoso rispetto ad altre destinazioni d'uso;**
- **riduzione delle sezioni resistenti** a causa dello spacco superficiale (spalling) con messa a nudo dell'armatura longitudinale resistente a trazione. Questo fenomeno si riscontra frequentemente nei capannoni industriali più datati, caratterizzati da copriferro sottili.



*Fig.13 §2. – Esempi di riduzione della sezione resistente per effetto spalling*

### 2.3. Verifiche strutturali al fuoco secondo D.M. 03/08/2015

Per “verifica strutturale al fuoco” si intende il controllo della rispondenza di una struttura ai requisiti prestazionali richiesti, che se rispettati consentono all’opera di essere sicura in caso di incendio, garantendo la capacità portante per un tempo stabilito.

Per la maggior parte degli edifici industriali, adibiti a produzione o immagazzinamento prodotti, il riferimento normativo vigente in materia antincendio è rappresentato dal *D.M. 3 agosto 2015* [7] e in particolare dalle sezioni “G - Generalità” ed “S - Strategie antincendio”. Infatti, dal 21 ottobre dell’anno corrente è entrato in vigore il *D.M. 12 aprile 2019* [15] che ha aggiornato le precedenti “Norme tecniche di prevenzione incendi” del 2015, riconfermandone per intero il contenuto, ma variando il loro campo di applicazione. Tra le modifiche apportate, il *D.M. 3 agosto 2015* [7] è stato reso obbligatorio per le attività soggette (secondo *D.P.R. n. 151/2011* [14]) ma prive di Regola Tecnica Verticale, come appunto la quasi totalità dei capannoni industriali. Per quanto concerne la Progettazione Strutturale al Fuoco, è stato quindi eliminato il doppio binario *D.M. 9 marzo 2007* [6]- *D.M. 3 agosto 2015* [7].

Per quanto concerne la strategia antincendio Resistenza al Fuoco, nel capitolo S.2 del [7], vengono definitivi i livelli di prestazione, graduati in funzione della complessità crescente delle prestazioni previste (Fig. 14), oltre che i criteri generalmente accettati per l’attribuzione degli stessi alle singole opere da costruzione (Fig. 15).

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.

*Fig.14 §2. – Tabella S.2-1 del D.M. 3 agosto 2015: Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco*

Come si osserva, il livello è selezionato in funzione delle caratteristiche strutturali intrinseche dell'opera, dei profili di rischio individuati ( $R_{vita}$ ,  $R_{beni}$ ,  $R_{ambiente}$ ), densità di affollamento prevista, tipologia di occupanti, presenza o meno di soggetti disabili ecc.

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Opere da Costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.</li> </ul>
II	Opere da Costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti;</li> <li>• strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse ovvero, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, A3, A4;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità;</li> <li>• aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.</li> </ul>
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

Fig.15 §2. – Tabella S.2-2 del D.M. 3 agosto 2015: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Individuato il livello di prestazione per l'opera in esame, il D.M. 3 agosto 2015 [7] prevede l'applicazione di una soluzione progettuale, che può essere conforme o alternativa o in deroga.

Nel seguito è riportato uno schema della metodologia descritta, in cui a titolo esemplificativo, sono state esplicitate la soluzione conforme ed alternativa secondo il livello di prestazione III.

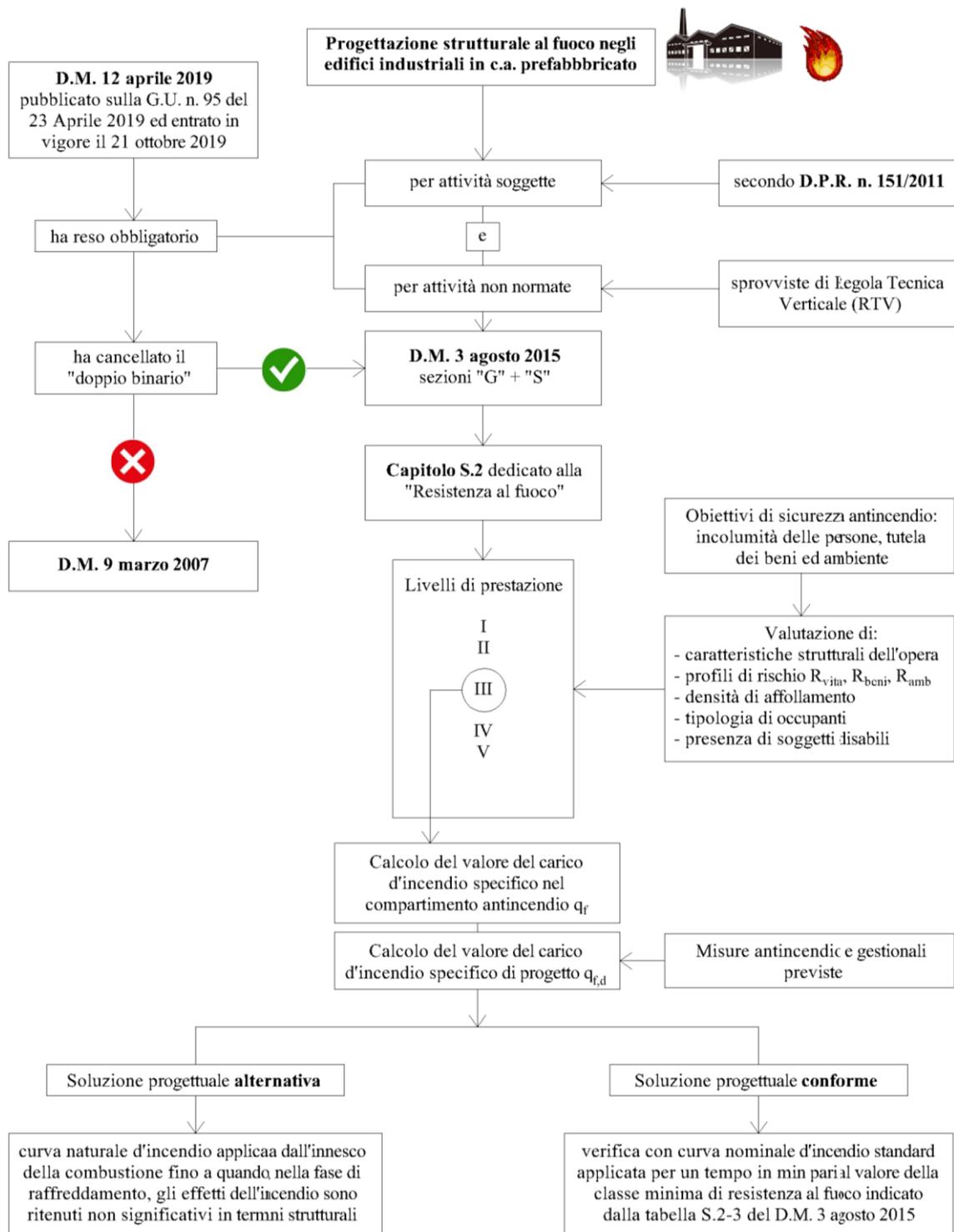


Fig.16 §2. – Schema riassuntivo dei procedimenti previsti dal D.M. 3 agosto 2015 per la verifica della capacità portante di resistenza al fuoco degli elementi strutturali di una costruzione che devono garantire il livello III di prestazione.

2.3.1 Soluzione conforme: approccio prescrittivo

La soluzione conforme (deemed to satisfy provision) è di immediata applicazione. Il progettista che fa ricorso a questo tipo di soluzione non è obbligato a fare ulteriori considerazioni tecniche per dimostrare il raggiungimento del corrispondente livello di prestazione. In questo senso si parla di “approccio prescrittivo”.

Come riportato nel capitolo S.2, fatta eccezione per il livello di prestazione I che “non richiede alle strutture alcuna prestazione minima di resistenza al fuoco”, le soluzioni conformi per i restanti livelli, prevedono il rispetto dei requisiti di capacità portante e/o compartimentazione con curva nominale d’incendio per un tempo minimo in minuti, definito dalla classe di resistenza al fuoco. Quest’ultima assume un valore discreto compreso tra 15 e 360 minuti (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360).

Ad esempio, nel caso del livello di prestazione II il comma 3 del §S.2.4.2 [7] recita: “la classe minima di resistenza al fuoco deve essere pari almeno a 30 o inferiore, qualora consentita dal livello di prestazione III”. Mentre, la soluzione conforme secondo livello di prestazione III, come illustrato in Fig. 16, presuppone la verifica degli elementi con curva nominale d’incendio per un tempo minimo pari al valore della classe di resistenza, ricavata per ogni compartimento in relazione al carico di incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$ .

Entrando nel vivo della progettazione/verifica strutturale al fuoco, in accordo con le normative complementari in materia (*NTC 2018* [5] ed *Eurocodici* [10] e [11]), le verifiche con regole prescrittive possono avvenire secondo il seguente schema:

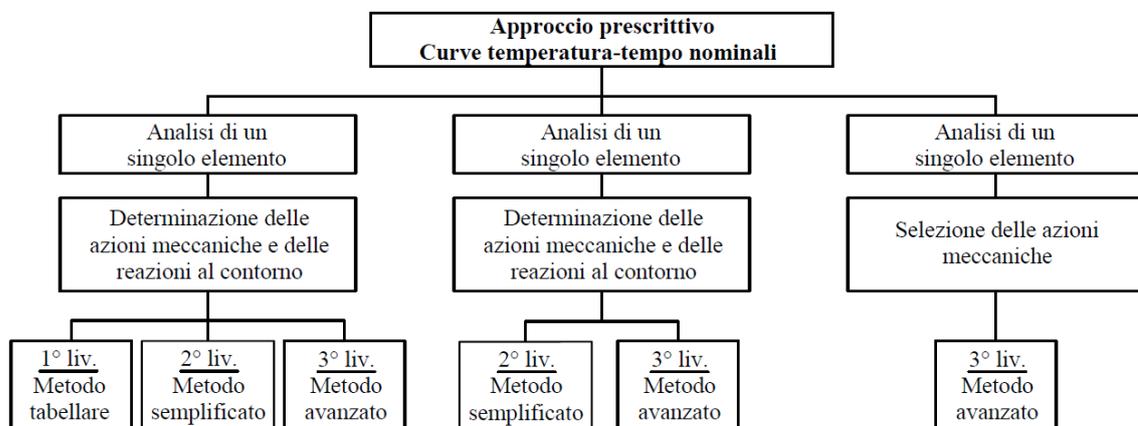


Fig.17 §2. – Progettazione Strutturale al Fuoco con approccio prescrittivo

Le analisi possono condursi per i singoli elementi, per alcune parti o per l'intera struttura. Nei primi due casi il calcolo ha lo scopo di determinare le azioni interne e le reazioni vincolari in presenza dei carichi agenti in condizioni di incendio, mentre nel terzo caso, si prefigge l'obiettivo di determinare i carichi che la struttura nel suo complesso trasmette ad ogni elemento.

Inoltre, il calcolo può essere:

- **Elementare (1° livello):** è limitato al progetto per via prescrittiva di singoli elementi. Si tratta di un metodo tabellare, fondato su tabelle indicanti i valori minimi di copriferro o di spessore di calcestruzzo da adottare per assicurare il rispetto dei requisiti strutturali per il tempo minimo richiesto dalla classe di resistenza. Come precisato al §S.2.15 del [7], “i valori contenuti nelle tabelle sono il risultato di campagne sperimentali e [...] si riferiscono alle tipologie costruttive e ai materiali di maggior impiego. [...] Pur essendo cautelativi, non consentono estrapolazioni o interpolazioni di valori”;
- **Semplificato (2° livello):** si utilizzano modelli sezionali o relativi a porzioni dell'elemento strutturale. Nel caso del c.a., si possono citare, ad esempio, il metodo dell'isoterma 500 °C (Anderberg, 1978), il metodo a zona (Hertz, 1993) e il metodo della colonna modello. Tutti e tre trattati nell'appendice B della *UNI EN 1992-1-2* [11];
- **Avanzato (3° livello):** basati sulla discretizzazione della struttura e l'uso di codici di calcolo automatico. Il metodo è approfondito nei capitoli successivi della presente Relazione di Tesi.

Infine, come anticipato, l'approccio prescrittivo prevede che **l'azione termica sia rappresentata da curve standard temperatura-tempo (T-t)**, che sebbene “non abbiano connessione diretta con alcun incendio reale, né tantomeno con le sue caratteristiche di carico di incendio e di ventilazione [...] hanno il pregio di fornire un ambiente di riferimento sufficientemente gravoso, rispetto al quale certificare elementi strutturali e prodotti” [1].

Nel seguito sono riportate le espressioni analitiche e i relativi grafici delle curve nominali d'incendio, secondo [7]. Sono tutte rappresentative di situazioni post flashover.

- **Curva nominale UNI 834:** utilizzata per le soluzioni conformi di resistenza al fuoco, in ambienti interni;

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2.1)$$

$\theta_g$  = temperatura media dei gas di combustione [°C];

$t$  = tempo [minuti];

- **Curva nominale degli idrocarburi:** nel caso di incendi di quantità rilevanti di idrocarburi o altre sostanze con equivalente velocità di rilascio termico. Utilizzabile esclusivamente per verifiche di capacità portante delle strutture;

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) \quad (2.2)$$

- **Curva nominale esterna:** nel caso di incendi sviluppati all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno.

$$\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) \quad (2.3)$$

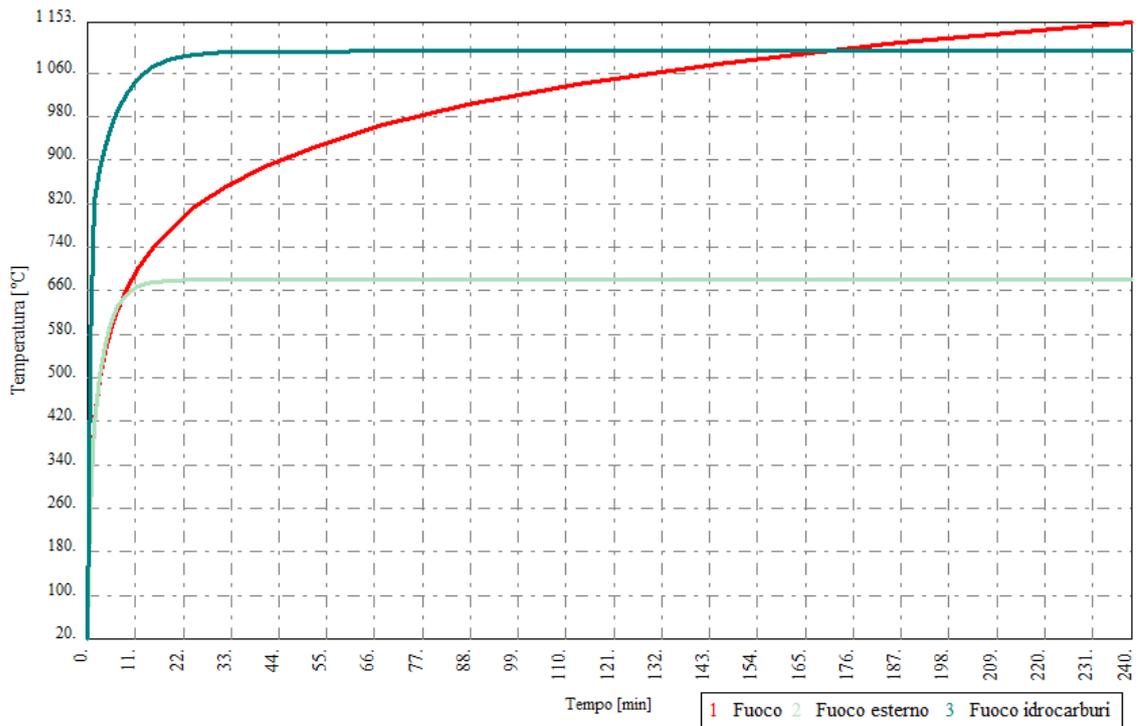


Fig.18 §2. – Curve convenzionali d'incendio

### 2.3.1 Soluzione alternativa: approccio prestazionale

La soluzione alternativa (alternative solution) è una soluzione progettuale alternativa alle soluzioni conformi. Il progettista è tenuto a dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione impiegando uno dei metodi di progettazione della sicurezza antincendio ammessi.

Si tratta in sostanza di un “approccio prestazionale” o ingegneristico, fortemente caratterizzato dall'interdisciplinarietà, tramite il quale il progettista può rintracciare soluzioni progettuali ad hoc in termini di antincendio.

A titolo di esempio, si descrivono le soluzioni alternative previste per i livelli di prestazione II e III. In accordo con [7], in entrambi i casi “le soluzioni alternative [...] si ottengono verificando le prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni in base agli scenari di incendio di progetto ed ai relativi incendi convenzionali di progetto rappresentati da curve naturali di incendio.” Mentre in termini temporali, cioè di durata minima degli scenari di incendio di progetto:

- per il livello II è necessario verificare il “mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione. La capacità portante deve essere comunque tale da garantire un margine di sicurezza  $t_{\text{marg}}$  (paragrafo M.3.2.2) non inferiore a 100% RSET e comunque non inferiore a 30 minuti” [7];
- per il livello III, “le analisi si eseguono dall'innesco della combustione fino a quando, nella fase di raffreddamento, gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti” [7].

Anche in termini di procedure di calcolo, ci sono delle sostanziali differenze, come illustrato in Fig. 19. Non è possibile in alcun caso utilizzare il metodo tabellare di 1° livello, che risulta pertanto limitato al progetto in via prescrittiva di singoli elementi. Inoltre le verifiche dell'intera struttura o di una sua parte vanno condotte esclusivamente con metodi di calcolo avanzato (3° livello).

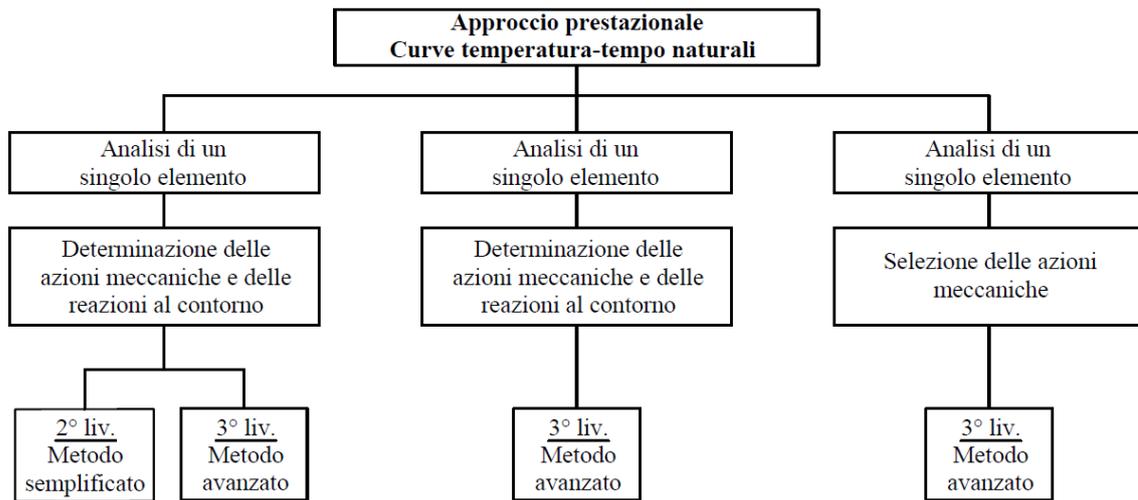


Fig.19 §2. – Progettazione Strutturale al Fuoco con approccio prestazionale

Come anticipato, **le curve temperatura-tempo sono di tipo naturale**: l'incendio è modellato in maniera realistica, sulla base delle leggi della Chimica e della Fisica. In altre parole, attraverso l'adozione di modelli semplificati o avanzati, è possibile descrivere lo sviluppo della temperatura in uno specifico compartimento, tenendo conto delle effettive condizioni al contorno: carico di incendio, ventilazione, presenza di sistemi di protezione attiva, impianti di rilevazione incendio e di smaltimento fumi e calore.

Le curve naturali si distinguono in:

- **Curve sperimentali**, dedotte da prove di laboratorio certificate;
- **Curve ricavate da modelli semplificati**, tratti dalla *UNI EN 1991-1-2* [10]. L'appendice A tratta delle curve parametriche, rappresentative di condizioni post flashover. Hanno un campo di applicazione limitato e condizionato, basato su parametri fisici quali fattore di ventilazione  $O$ , inerzia termica delle pareti  $b$ , carico specifico d'incendio  $q_f$ . Non tengono conto nell'evoluzione dell'incendio dell'intervento dei sistemi automatici di spegnimento. L'appendice C descrive il modello di incendio localizzato, impiegabile quando il carico d'incendio è localizzato e sollecita localmente la struttura. Il modello richiede la valutazione della curva di rilascio termico RHR (t).

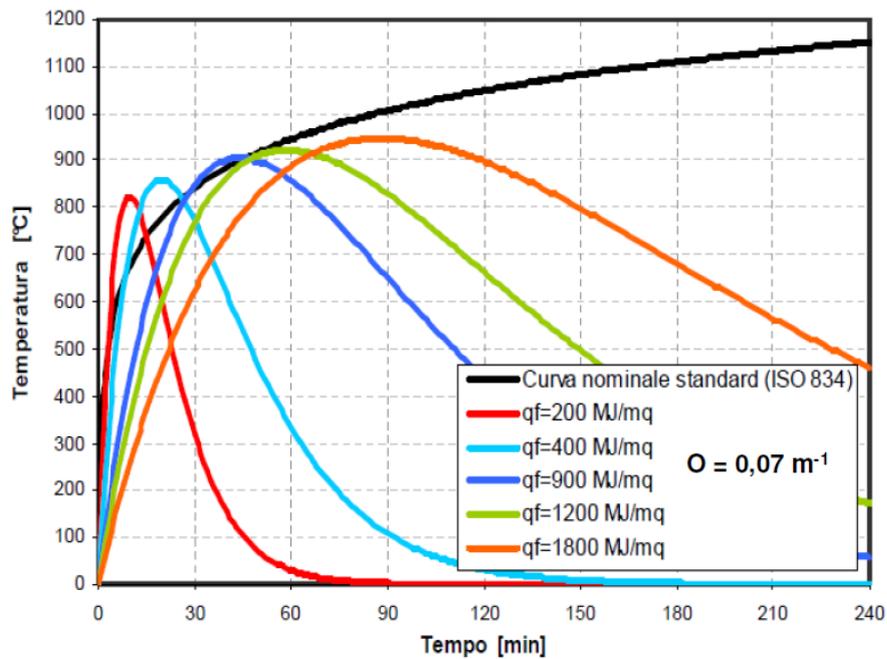


Fig. 20 §2. – Incendio parametrico in funzione di  $q_f$  per assegnato fattore di ventilazione  $O$  e inerzia termica  $b$ . Appendice A [10]

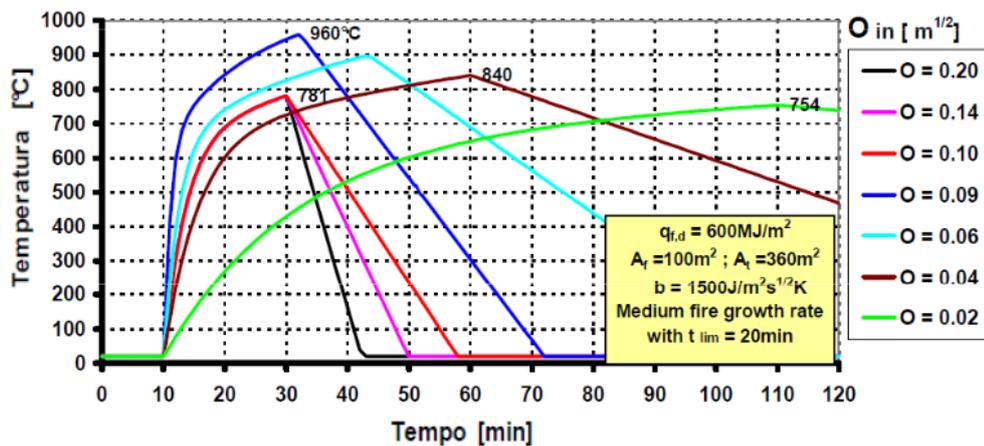


Fig. 21 §2. – Incendio parametrico in funzione di  $O$ , per assegnato carico d'incendio  $q_{f,d}$  e inerzia termica  $b$ . Appendice A [10]

- **Curve dedotte da modelli avanzati**, tra cui si annoverano i modelli monozona, bizona e di campo basati sulla fluidodinamica computazionale. Tutti e tre richiedono la preventiva valutazione della curva di rilascio termico del focolare RHR in funzione del tempo  $t$ . Si distinguono sostanzialmente per il dominio computazionale considerato.

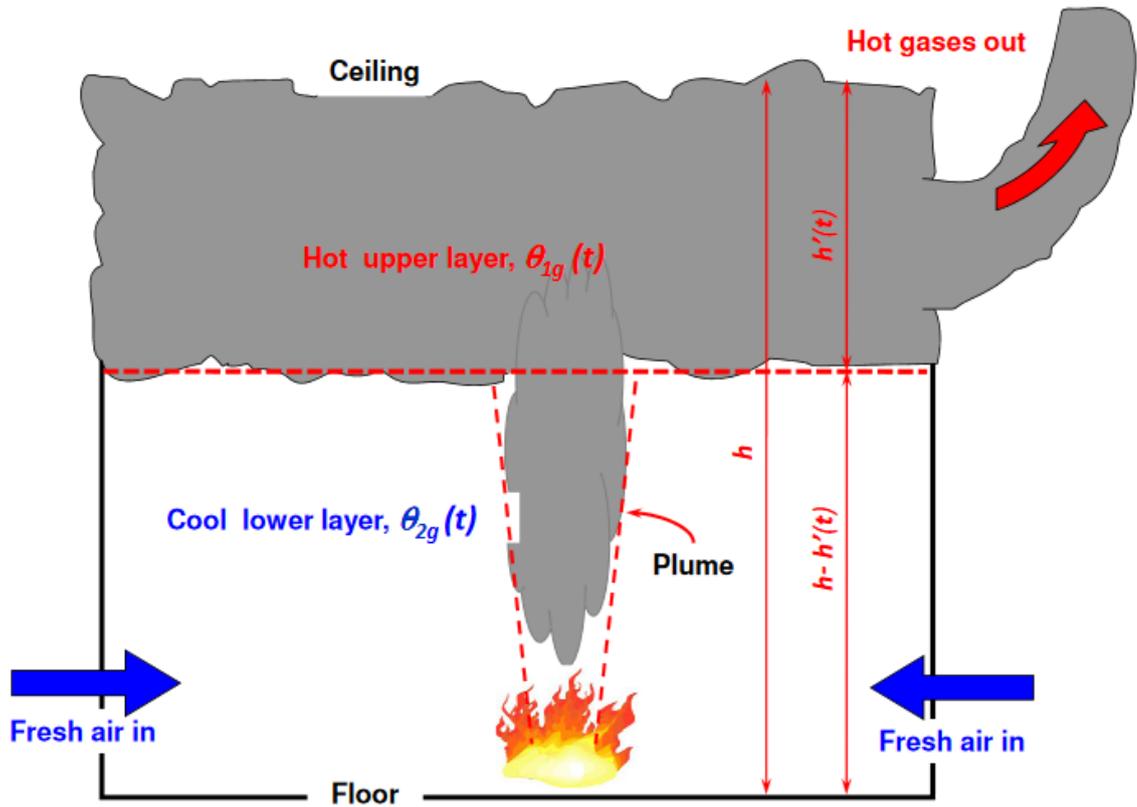


Fig.22 §2. – Schematizzazione modello di incendio avanzato bizona

Nel caso dei modelli a zona, la dinamica dell'incendio è simulata in ambiente confinato, risolvendo le equazioni di conservazione di massa ed energia in un numero limitato di zone macroscopiche (1-monozona; 2-bizona), entro cui si considerano costanti i parametri termo-fluidodinamici. Sono adatti per geometrie semplici, regolari e compatte. Trascurano fenomeno di turbolenza e di combustione.

Mentre nei modelli di campo (FDS), lo spazio viene diviso in un numero elevato di celle e le equazioni di conservazione sono risolte all'interno di ciascuno di essi, attraverso metodi agli elementi finiti. Tali modelli offrono risultati più dettagliati e risultano più adatti nel caso di geometrie complesse. Di contro, richiedono tempi di elaborazione molto lunghi e le soluzioni sono molto sensibili alla dimensione delle celle computazionali.

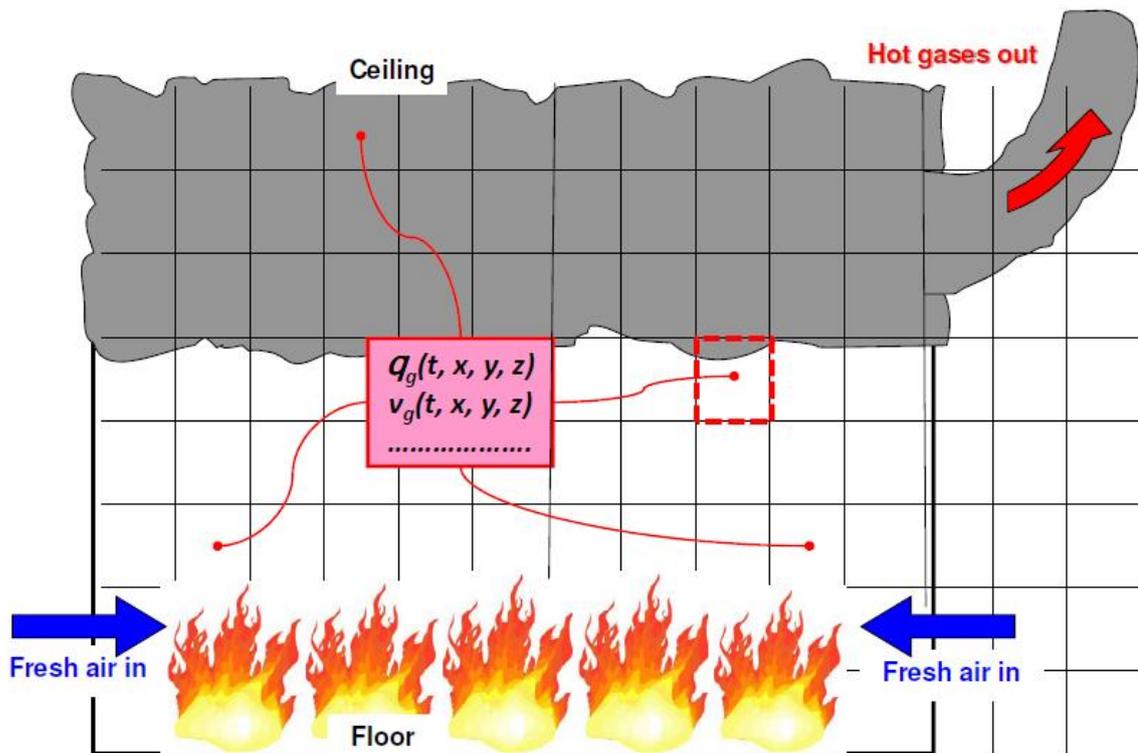


Fig.23 §2. – Schematizzazione modello di incendio avanzato di campo

Il processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, deve essere conforme a quanto indicato nel capitolo M.2 della sezione “M – Metodi” del *D.M. 3 agosto 2015* [7]. Nella figura sottostante sono illustrate le fasi principali previste. Quest’ultime sono state percorse per un caso studio reale nel Capitolo VI “Approccio prestazione: FSE”.



Fig.24 §2. – Fasi dell’approccio prestazionale secondo sezione M di [7]

## **CAPITOLO III**

---

### **PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO**

### 3.1. Descrizione generale

Il caso studio consiste in un capannone industriale, sito in provincia di Torino e costruito intorno agli anni '90. E' parte integrante di un insediamento produttivo appartenente ad un ditta privata, che opera nel campo della produzione pennarelli e penne per la scrittura.

E' destinato principalmente ad attività produttive e di immagazzinamento prodotti finiti. Infatti, sebbene nella zona sud dell'edificio, siano presenti locali ad uso servizio ed ufficio, questi risultano strutturalmente indipendenti e costituiscono compartimento antincendio separato dall'attività produttiva.

### 3.2. Premessa: documentazione precedente

Il manufatto selezionato è stato già trattato in termini antincendio. Infatti, nell'aprile 2019 è stato oggetto di SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività) da parte dello Studio Tecnico CDP Casetta & Del Piano, contestualmente ad altri due capannoni industriali limitrofi, facenti parte del medesimo stabilimento. In tale circostanza, il Comando Provinciale dei VV.F. di Torino, è stato informato della previsione di alcune modifiche (non costituenti aggravio di rischio) all'attività, già in possesso peraltro di Valutazione del Progetto VV.F. (Dicembre 2015).

### 3.3. Classificazione delle attività

Le attività presenti nel fabbricato, sono **soggette** al controllo e verifica da parte del Comando dei VV.F. secondo quanto stabilito dal *D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151* [14]:

- **Attività 44.3.C:** “Stabilimenti, impianti, depositi ove si producono, lavorano e/o detengono materie plastiche, con quantitativi in massa superiori a 5.000 kg”.  
Si tratta inoltre di attività **non normata**. Non essendo ancora in vigore il *D.M. 12 aprile 2019* [15], lo Studio Tecnico CDP, nell'ambito del procedimento di SCIA, ha optato per l'applicazione della Regola Tecnica Orizzontale (RTO) secondo *D.M. 10/03/1998* [16] - “Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro” [16];
- **Attività 74.2.B:** “Impianti per la produzione di calore alimentati a combustibile solido, liquido o gassoso con potenzialità superiore a 350 kW (fino a 700 kW)”.  
In questo caso, l'attività è **normata** e la RTV di riferimento utilizzata da CDP è stata il *D.M. 12/04/1996* [17] - “Regola tecnica di prevenzione incendi per impianti termici alimentati da combustibili gassosi”.

### 3.4. Processo produttivo e materiali stoccati

In generale, l'attività di produzione di penne e pennarelli avviene attraverso le seguenti fasi:

- produzione inchiostri a base acquosa;
- produzione componenti in plastica (polipropilene);
- assemblaggio automatico;
- confezionamento (scatolame in cartone)

Il capannone in esame è adibito all'assemblaggio dei pennarelli, all'inscatolamento e alla produzione degli inchiostri a base acquosa mediante l'utilizzo di basi non infiammabili stoccate all'esterno dell'edificio e dosate di colorante nell'area miscelazione colore.

In minima quantità vengono utilizzati inchiostri infiammabili, prodotti da altre ditte. Quest'ultimi sono stoccati in fusti da 200 litri cadauno, in un'area libera a cielo libero esterna all'edificio. Sono state adottate le misure precauzionali affinché un eventuale incendio non si espanda all'interno dello stabilimento con opportune compartimentazioni REI/EI 120.

Inoltre, i fusti sono impiegati in base all'esigenza produttiva, in numero di al massimo uno alla volta per singolo reparto produttivo. Pertanto costituiscono carico di incendio minimo e trascurabile all'interno dei singoli compartimenti.

### 3.5. Macchine, apparecchiature ed attrezzi

Nella zona assemblaggio e confezionamento del capannone, sono ubicate:

- attrezzature a gas propano. Per tale attività è stata redatta specifica relazione di valutazione del rischio, da parte del titolare dell'attività;
- macchine per la serigrafia alimentate a propano per una potenzialità complessiva massima di 18.65 kW, quindi minore di un normale piano di cottura standard di civile abitazione. Tuttavia, trattandosi di ambiente di lavoro è stato comunque eseguita, ai sensi della Direttiva Atex, e delle disposizioni del D.Lgs 81/2008, specifica valutazione del rischio di esplosione. Questo, a conti fatti, è risultato essere trascurabile in base alla superficie di areazione del locale.

Esternamente al fabbricato, sono rintracciabili:

- la cabina elettrica ove avviene la trasformazione dell'energia elettrica da MT a BT con trasformatore ad olio. Avendo quest'ultimo una capacità inferiore a  $1 \text{ m}^3$ , non rappresenta attività soggetta ai sensi del [14]. La cabina è collocata a ridosso del lato sud dell'edificio, in apposito compartimento certificato REI 120;
- macchinari per la ricarica delle batterie dei muletti e compressore ad aria. Entrambi sono ubicati in vano dedicato, in adiacenza al lato est del capannone, con un fronte su esterno.

### 3.6. Condizioni di accessibilità e viabilità

Il capannone è sito in una zona industriale, urbanizzata ma poco popolata. Il sistema stradale esterno sul quale si inserisce il complesso risulta di facile e scorrevole percorribilità. L'accesso è consentito da passo carraio di larghezza mt 6,0. La movimentazione di autocarri per il trasporto delle merci in arrivo ed in partenza è garanzia di agevole e rapido scorrimento anche degli eventuali mezzi di soccorso (V.V.F., Autoambulanza, ecc.).

### 3.7. Affollamento ambienti

Nell'edificio è previsto un numero massimo di 42 addetti. Inoltre, le peculiarità dell'attività, non consentono la collocazione obbligatoria di lavoratori disabili.

### 3.8. Areazione

Il capannone è dotato di grandi aperture finestrate, le quali assicurano una sufficiente aereo-illuminazione degli ambienti interni. Infatti, risulta rispettato il rapporto di 1/25 tra la superficie di calpestio e quella di areazione:

Area totale fabbricato =  $3500 \text{ m}^2$ ;

Area superfici verticali =  $180 \text{ m}^2 > 1/25 (3500) = 140 \text{ m}^2$ ;

Inoltre, in copertura, l'assenza di intere file di tegoli realizza ampie aperture orizzontali. Quest'ultime non solo contribuiscono a ventilare gli ambienti, ma possono fungere da eventuali evacuatori di fumo in caso di incendio.

### 3.9. Vie d'esodo

Il sistema di vie di fuga realizzato nel complesso, garantisce un agevole esodo del personale, con percorsi di fuga compresi tra i 30 e i 45 m (conformi a quanto descritto nel punto 3.3 del D.M. 10/03/1998 per attività a rischio incendio medio). Sono predisposte opportune vie di fuga sfocianti su uscite di sicurezza, che permettono nella quasi totalità di accedere nel cortile completamente su spazio a cielo libero.

Tutte le uscite presentano dimensioni di 120 cm (due moduli) dotate di maniglione antipanico con apertura a spinta verso il senso dell'esodo e sono opportunamente segnalate ed illuminate. Nello specifico:

- Compartimento *Magazzino 1+2*: 3 uscite della larghezza di 120 cm;
- Compartimento *Magazzino 3+4*: 1 uscite della larghezza di 120 cm;
- Compartimento *Reparto produttivo*: 3 uscite di larghezza 120 cm verso esterno e 2 della larghezza di 120 cm verso luogo sicuro (Compartimento *Zona uffici*);
- Compartimento *Zona uffici*: 4 uscite della larghezza di 120 cm.

La larghezza delle uscite è tale da rispettare la capacità di deflusso dei lavoratori, secondo D.M. 10/03/1998 (nel caso di attività a rischio medio).

### 3.10. Resistenza al fuoco secondo D.M. 09/03/2007

Sebbene, come anticipato al paragrafo 3.3, la trattazione antincendio dell'attività principale 44.3.C sia avvenuta secondo il *D.M. 10/03/1998* [16], per la Resistenza al fuoco è stato fatto esplicito riferimento al *D.M. 9 marzo 2007* "Prestazioni di Resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco" [6].

Pertanto, nell'ambito del procedimento di SCIA presentato dallo studio CDP, per la Resistenza al fuoco è risultato un **livello di prestazione III: "Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza"**. Quest'ultimo ha previsto l'individuazione della classe di resistenza al fuoco in funzione del carico d'incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$ :

Carichi d'incendio specifici di progetto ( $q_{f,d}$ )	Classe
Non superiore a 100 MJ/m <sup>2</sup>	0
Non superiore a 200 MJ/m <sup>2</sup>	15
Non superiore a 300 MJ/m <sup>2</sup>	20
Non superiore a 450 MJ/m <sup>2</sup>	30
Non superiore a 600 MJ/m <sup>2</sup>	45
Non superiore a 900 MJ/m <sup>2</sup>	60
Non superiore a 1200 MJ/m <sup>2</sup>	90
Non superiore a 1800 MJ/m <sup>2</sup>	120
Non superiore a 2400 MJ/m <sup>2</sup>	180
Superiore a 2400 MJ/m <sup>2</sup>	240

Fig.1 §3. – Tabella 4 del D.M. 9 marzo 2007 [6]

Nel documento di SCIA, si legge quanto segue:

“Nella zona miscelazione e nei laboratori i valori del carico di incendio sono trascurabili, quindi non viene effettuato il calcolo del carico d’incendio in quanto trattasi unicamente di aree produttive dove l’unico elemento da valutare è la zona assemblaggio, edificio B, dove si hanno attrezzature a propano con potenzialità ridotta, che non costituisce rischio e inchiostri infiammabili utilizzati in piccole quantità come detto negli altri punti della presente Relazione. Pertanto si è effettuato il calcolo del carico di incendio dei locali magazzini mentre per i reparti produttivi, dove lo stesso non è rilevante e considerato che ricorrono nella sostanza quasi tutte le condizioni di cui al p.to 3.2 del D.M. 09/03/2007 [6] ed in mancanza di prescrizioni normative specifiche si ritiene congruo prevedere in base alla valutazione del rischio effettuata una classe di resistenza al fuoco minima pari a R 30”. [...]

Pertanto alla luce dei calcoli eseguiti e delle considerazioni sopra esposte si prescrivono i requisiti di resistenza al fuoco di seguito elencati:

- **Compartimenti magazzino:** resistenza al fuoco minima delle strutture pari a **R/REI/EI 120** anche per i compartimenti dove attualmente i valori del carico di incendio non determinerebbero **la necessità di ricorrere a tale classe di resistenza al fuoco ma per dare possibilità di espansioni all’attività.** [...]
- **Reparti produttivi:** resistenza al fuoco minima **R/REI/EI 30.**”

I risultati dei calcoli analitici, eseguiti da CDP con il software ClaRaF, figurano tra gli ALLEGATI della presente relazione di Tesi.

## **CAPITOLO IV**

---

**TRATTAZIONE ANTINCENDIO CON D.M. 03/08/2015**

Il presente paragrafo è dedicato alla trattazione antincendio dell'attività soggetta e non normata 44.3.C, mediante l'applicazione delle sezioni "G - Generalità" ed "S - Strategie antincendio" del *D.M. 3 agosto 2015* [7].

#### 4.0. Valutazione del rischio

Nel seguito, si è valutato il rischio di incendio, attribuendo 3 tipologie di profili di rischio relativi alla:

- salvaguardia della vita umana -  $R_{vita}$ ;
- salvaguardia dei beni economici -  $R_{beni}$ ;
- tutela dell'ambiente dagli effetti dell'incendio -  $R_{ambiente}$ .

Nello specifico, si sono determinati quantitativamente i profili  $R_{vita}$  ed  $R_{beni}$ , mentre si è valutato qualitativamente il rischio per l'ambiente  $R_{ambiente}$ .

##### 4.0.1 Profilo rischio vita - $R_{vita}$

Il profilo di rischio della vita, è attribuito **ad ogni compartimento**, in funzione delle caratteristiche prevalenti degli occupanti ( $\delta_{occ}$ ) e della velocità caratteristica prevalente di sviluppo dell'incendio ( $\delta_{\alpha}$ ).

<b>Compartimento</b>	$\delta_{occ}$	$\delta_{\alpha}$	$R_{vita}$
<i>Magazzino 1+2</i>	A	3	<b>A3</b>
<i>Magazzino 3+4</i>	A	3	<b>A3</b>
<i>Reparto produttivo</i>	A	3	<b>A3</b>
<i>Zona uffici</i>	A	3	<b>A3</b>

*Fig.1 §4. – Attribuzione di  $\delta_{occ}$  e  $\delta_{\alpha}$  ai singoli compartimenti*

Essendo:

- A = Stato di veglia e familiarità con l'edificio;
- 3 = Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio rapida, cioè è necessario un  $t_{\alpha} = 150$  s affinché la potenza termica raggiunga il valore di 1000 kW.

#### 4.0.2 Profilo rischio beni - $R_{beni}$

Il profilo di rischio  $R_{beni}$  è attribuito **all'intera attività** in funzione del suo carattere strategico e del valore storico, culturale e artistico.

		Opera da costruzione vincolata	
		No	Sì
Opera da costruzione strategica	No	$R_{beni} = 1$	$R_{beni} = 2$
	Sì	$R_{beni} = 3$	$R_{beni} = 4$

Fig.2 §4. – Tabella G.3-6 del D.M. 3 agosto 2015: Determinazione di  $R_{beni}$

Dall'analisi del progetto e dal confronto con la tabella G.3-6 del D.M. 3 agosto 2015 [7], si evince che l'attività in esame risulta non strategica e non vincolata.  **$R_{beni} = 1$** ;

#### 4.0.3 Profilo rischio ambiente – $R_{ambiente}$

Il profilo di rischio  $R_{ambiente}$  è attribuito **all'intera attività**. Nel caso in esame, il rischio ambiente può considerarsi **non significativo**, in quanto mitigato dall'applicazione di tutte le misure antincendio connesse agli altri due profili di rischio.

Nel paragrafo che segue, sono riportati i criteri per la definizione delle misure di prevenzione antincendio da adottare al fine di ridurre la probabilità di insorgenza di un incendio. **Considerato l'obiettivo della Tesi, si sono approfondite maggiormente le strategie connesse con la Resistenza al fuoco.**

#### 4.1. Reazione al fuoco – sezione S.1

La **reazione al fuoco** è una misura antincendio di protezione passiva che esplica i suoi principali effetti nella fase di prima propagazione dell'incendio, con l'obiettivo di limitare l'innesco dei materiali e la propagazione stessa dell'incendio.

L'analisi della reazione al fuoco è stata eseguita **per ogni compartimento**, nel rispetto delle condizioni del capitolo S.1 del [7].

##### 4.1.1 Compartimento Magazzino 1+2

Il profilo di rischio  $R_{vita}$  è A3. Di conseguenza, sia per le **vie d'esodo**, che per gli **altri locali dell'attività**, il **livello di prestazione è I: nessun requisito**. In altre parole non è

richiesto alcun provvedimento specifico per quanto concerne la reazione al fuoco dei materiali presenti.

#### 4.1.2 Restanti compartimenti

Per i restanti compartimenti, *Magazzino 3+4*, *Reparto produttivo* e *Zona uffici*, valgono le stesse considerazioni fatte per il *Magazzino 1+2*: nessun requisito specifico previsto.

#### 4.2. Resistenza al fuoco – sezione S.2

La finalità della resistenza al fuoco è quella di garantire la capacità portante delle strutture in condizioni di incendio, nonché la capacità di compartimentazione per un tempo minimo necessario al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza di prevenzione incendi.

Il calcolo della resistenza al fuoco è stato eseguito, **per l'intera opera da costruzione**, nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.2 di [7]. Il manufatto presenta le seguenti caratteristiche:

Compartimentato rispetto ad altre opere da costruzione adiacenti	✓
Strutturalmente separato da altre opere da costruzione	✓
R <sub>vita</sub>	A3
R <sub>beni</sub>	1
R <sub>ambiente</sub>	non significativo
Densità di affollamento	< 0.2 pers/m <sup>2</sup>
Prevalentemente destinato ad occupanti con disabilità	✗
Quota del piano più basso	0.00 m

*Fig.3 §4. – Caratteristiche dell'opera da costruzione*

La densità di affollamento è stata ricavata dividendo il numero massimo di persone previste nella presente opera (42 addetti, vedi §3.7) per la superficie lorda A della stessa (3500 m<sup>2</sup>).

$$d_{\text{affollamento}} = \frac{\text{numero}_{\text{ad detti}}}{A_{\text{tot}}} = \frac{42}{3500} = 0,012 \frac{\text{persone}}{\text{m}^2} \quad (4.1)$$

A rigore, l'edificio avrebbe presentato caratteristiche tali da ricondurlo al livello di prestazione II (Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione). Tuttavia, tenuto conto dell'esplicita richiesta della Committenza di tutelare il manufatto per un periodo di tempo maggiore, almeno prossimo all'intervento dei V.V.F., si è optato per un **livello di prestazione III (Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio)**.

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	<p>Opere da Costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{\text{beni}}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{\text{ambiente}}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.</li> </ul>
II	<p>Opere da Costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti;</li> <li>• strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse ovvero, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{\text{vita}}</math> compresi in A1, A2, A3, A4;</li> <li>◦ <math>R_{\text{beni}}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{\text{ambiente}}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità;</li> <li>• aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.</li> </ul>
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

Fig.4 §4. – Tabella S.2-2 del D.M. 3 agosto 2015 [7]: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

La soluzione progettuale da adottare per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto può essere conforme o alternativa. Il Capitolo V e il Capitolo VI trattano rispettivamente la verifica di resistenza al fuoco secondo approccio prescrittivo e secondo approccio prestazionale.

Nel seguito si definisce la classe minima di resistenza al fuoco, utile in caso di soluzione conforme. In accordo con la tabella S. 2-3 del D.M. 3 agosto 2015 [7], la

**classe minima è definita, per ciascun compartimento in funzione del carico di incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$ .**

Carico di incendio specifico di progetto	Classe minima di resistenza al fuoco
$q_{f,d} \leq 200 \text{ MJ/m}^2$	Nessun requisito
$q_{f,d} \leq 300 \text{ MJ/m}^2$	15
$q_{f,d} \leq 450 \text{ MJ/m}^2$	30
$q_{f,d} \leq 600 \text{ MJ/m}^2$	45
$q_{f,d} \leq 900 \text{ MJ/m}^2$	60
$q_{f,d} \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$	90
$q_{f,d} \leq 1800 \text{ MJ/m}^2$	120
$q_{f,d} \leq 2400 \text{ MJ/m}^2$	180
$q_{f,d} > 2400 \text{ MJ/m}^2$	240

*Fig.5 §4. – Tabella S.2-3 del D.M. 3 agosto 2015: Classe minima di resistenza*

#### 4.2.1 Compartimento Magazzino 1+2

Il valore del carico d'incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$  è determinato secondo la relazione S.2-4 di [7]:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f \quad (4.2)$$

Dove:

- $\delta_{q1}$  è un fattore che tiene conto del rischio d'incendio in relazione alla dimensione;
- $\delta_{q2}$  è un fattore che tiene conto del rischio d'incendio in relazione al tipo di attività;
- $\delta_n$  è un fattore che tiene conto delle differenti misure antincendio;
- $q_f$  = carico d'incendio specifico espresso in  $\text{MJ/m}^2$ .

I parametri utilizzati sono esplicitati in Fig. 6. In particolare, il valore del carico d'incendio specifico  $q_f$  è stato acquisito dalla relazione di SCIA. A tal proposito si rimanda all'Allegato A.1.

In conclusione, per il compartimento in esame risulta:

$$q_{f,d} = 1,20 \cdot 1 \cdot 0,68 \cdot 3000 = 2448 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad (4.3)$$

A questo è associato una **classe minima di resistenza al fuoco pari a 240 minuti.**

Variabile	Valore	Note	Confronto con D.M. 09/03/2007	
Superficie compartimento	750 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento	Stesso valore	
q <sub>f</sub>	3000 MJ/m <sup>2</sup>	Ricavato da procedimento SCIA (aprile 2019)	Stesso valore	
δ <sub>q1</sub>	1,20	Essendo (500 < A <sub>lorda</sub> < 1000) m <sup>2</sup>	Stesso valore	
δ <sub>q2</sub>	1	Prevista una classe di rischio II	Stesso valore	
δ <sub>n</sub>	δ <sub>n1</sub>	1	Valori diversi: δ <sub>n</sub> = 0,68 (D.M. 03/08/2015) δ <sub>n</sub> = 0,50 (D.M. 09/03/2007)	
	δ <sub>n2</sub>	0,80		
	δ <sub>n3</sub>	1		
	δ <sub>n4</sub>	1		
	δ <sub>n5</sub>	1		
	δ <sub>n6</sub>	1		
	δ <sub>n7</sub>	1		Gestione della sicurezza antincendio con livello di prestazione II (paragrafo 5.5), ma non prevista presenza continuativa di addetto antincendio durante le 24h
	δ <sub>n8</sub>	1		Controllo di fumi e calore con livello di prestazione II (paragrafo 5.8). Minimo richiesto liv. III
	δ <sub>n9</sub>	0,85		Rivelazione ed allarme con livello di prestazione III (paragrafo 5.7)
	δ <sub>n10</sub>	1		Operatività antincendio con livello di prestazione III (paragrafo 5.9). Minimo richiesto liv. IV

Fig.6 §4. – Magazzino 1+2: scelta dei parametri per la determinazione di q<sub>f,d</sub> secondo D.M. 3 agosto 2015 e confronto con relativi coefficienti del D.M. 9 marzo 2007

#### 4.2.2 Compartimento Magazzino 3+4

Utilizzando la relazione (4.2), risulta:

$$q_{f,d} = 1 \cdot 1 \cdot 0,68 \cdot 3576 = 2432 \frac{MJ}{m^2} \quad (4.4)$$

A questo è associato una **classe minima di resistenza al fuoco pari a 240 minuti**.

I parametri utilizzati sono esplicitati in Fig. 7. Anche in questo caso, il valore del carico d'incendio specifico q<sub>f</sub> è stato acquisito direttamente dalla relazione di SCIA.

Variable	Valore	Note	Confronto con D.M. 09/03/2007	
Superficie compartimento	450 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento	Stesso valore	
q <sub>f</sub>	3576 MJ/m <sup>2</sup>	Ricavato da procedimento SCIA (aprile 2019)	Stesso valore	
δ <sub>q1</sub>	1	Essendo A <sub>lorda</sub> < 500 m <sup>2</sup>	Stesso valore	
δ <sub>q2</sub>	1	Prevista una classe di rischio II	Stesso valore	
δ <sub>n</sub>	δ <sub>n1</sub>	1	Valori diversi: δ <sub>n</sub> = 0,68 (D.M. 03/08/2015) δ <sub>n</sub> = 0,50 (D.M. 09/03/2007)	
	δ <sub>n2</sub>	0,80		
	δ <sub>n3</sub>	1		
	δ <sub>n4</sub>	1		
	δ <sub>n5</sub>	1		
	δ <sub>n6</sub>	1		
	δ <sub>n7</sub>	1		Gestione della sicurezza antincendio con livello di prestazione II (paragrafo 5.5), ma non prevista presenza continuativa di addetto antincendio durante le 24h
	δ <sub>n8</sub>	1		Controllo di fumi e calore con livello di prestazione II (paragrafo 5.8). Minimo richiesto liv. III
	δ <sub>n9</sub>	0,85		Rivelazione ed allarme con livello di prestazione III (paragrafo 5.7)
	δ <sub>n10</sub>	1		Operatività antincendio con livello di prestazione III (paragrafo 5.9). Minimo richiesto liv. IV

Fig.7 §4. – Magazzino 3+4: scelta dei parametri per la determinazione di q<sub>f,d</sub> secondo D.M. 3 agosto 2015 e confronto con relativi coefficienti del D.M. 9 marzo 2007

#### 4.2.3 Compartimento Reparto produttivo

Utilizzando la relazione (4.2), risulta:

$$q_{f,d} = 1,40 \cdot 1 \cdot 0,68 \cdot (< 470) = < 450 \frac{MJ}{m^2} \quad (4.5)$$

A questo è associato una **classe minima di resistenza al fuoco pari a 30 minuti**.

I parametri utilizzati sono esplicitati in Fig. 8. Secondo quanto riportato nel documento di SCIA, il valore del carico d'incendio specifico q<sub>f</sub> è stato considerato trascurabile < 470 MJ/m<sup>2</sup> (vedi §3.10).

Variabile	Valore	Note	Confronto con D.M. 09/03/2007	
Superficie compartimento	1980 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento	Stesso valore	
q <sub>f</sub>	< 470 MJ/m <sup>2</sup>	Ricavato da procedimento SCIA (aprile 2019)	Stesso valore	
δ <sub>q1</sub>	1,40	Essendo (1000 < A <sub>lorda</sub> < 2500) m <sup>2</sup>	Stesso valore	
δ <sub>q2</sub>	1	Prevista una classe di rischio II	Stesso valore	
δ <sub>n</sub>	δ <sub>n1</sub>	1	Valori diversi: δ <sub>n</sub> = 0,68 (D.M. 03/08/2015) δ <sub>n</sub> = 0,50 (D.M. 09/03/2007)	
	δ <sub>n2</sub>	0,80		
	δ <sub>n3</sub>	1		
	δ <sub>n4</sub>	1		
	δ <sub>n5</sub>	1		
	δ <sub>n6</sub>	1		
	δ <sub>n7</sub>	1		Gestione della sicurezza antincendio con livello di prestazione II (paragrafo 5.5), ma non prevista presenza continuativa di addetto antincendio durante le 24h
	δ <sub>n8</sub>	1		Controllo di fumi e calore con livello di prestazione II (paragrafo 5.8). Minimo richiesto liv. III
	δ <sub>n9</sub>	0,85		Rivelazione ed allarme con livello di prestazione III (paragrafo 5.7)
	δ <sub>n10</sub>	1		Operatività antincendio con livello di prestazione III (paragrafo 5.9). Minimo richiesto liv. IV

Fig.8 §4. – Reparto produttivo: scelta dei parametri per la determinazione di q<sub>f,d</sub> secondo D.M. 3 agosto 2015 e confronto con relativi coefficienti del D.M. 9 marzo 2007

#### 4.2.4 Compartimento Zona uffici

Utilizzando la relazione (4.2), risulta:

$$q_{f,d} = 1 \cdot 1 \cdot 0,68 \cdot (< 660) = < 450 \frac{MJ}{m^2} \quad (4.6)$$

A questo è associato una **classe minima di resistenza al fuoco pari a 30 minuti**.

I parametri utilizzati sono esplicitati in Fig. 9. Secondo quanto riportato nel documento di SCIA, il valore del carico d'incendio specifico q<sub>f</sub> è stato considerato trascurabile < 660 MJ/m<sup>2</sup> (vedi §3.10).

Variabile	Valore	Note	Confronto con D.M. 09/03/2007
Superficie compartimento	320 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento	Stesso valore
q <sub>f</sub>	< 660 MJ/m <sup>2</sup>	Ricavato da procedimento SCIA (aprile 2019)	Stesso valore
δ <sub>q1</sub>	1	Essendo A <sub>lorda</sub> < 500 m <sup>2</sup>	Stesso valore
δ <sub>q2</sub>	1	Prevista una classe di rischio II	Stesso valore
δ <sub>n</sub>	δ <sub>n1</sub>	1	Valori diversi: δ <sub>n</sub> = 0,68 (D.M. 03/08/2015) δ <sub>n</sub> = 0,50 (D.M. 09/03/2007)
	δ <sub>n2</sub>	0,80	
	δ <sub>n3</sub>	1	
	δ <sub>n4</sub>	1	
	δ <sub>n5</sub>	1	
	δ <sub>n6</sub>	1	
	δ <sub>n7</sub>	1	
	δ <sub>n8</sub>	1	
	δ <sub>n9</sub>	0,85	
	δ <sub>n10</sub>	1	

Fig.9 §4. – Reparto produttivo: scelta dei parametri per la determinazione di q<sub>f,d</sub> secondo D.M. 3 agosto 2015 e confronto con relativi coefficienti del D.M. 9 marzo 2007

Ciò che emerge dai risultati, è la grande differenza delle classi di resistenza ottenute per i compartimenti *Magazzino 1+2* e *Magazzino 3+4*, rispetto a quelle ottenute dallo studio CDP applicando il *D.M. 9 marzo 2007* [6]. Esse sono rispettivamente pari a 240 e 120, esattamente il doppio.

#### 4.3. Compartimentazione – sezione S.3

La finalità della **compartimentazione** è di limitare la propagazione dell'incendio e dei suoi effetti verso altre attività o all'interno della stessa attività.

La definizione della compartimentazione è stata eseguita, nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.3 del [7], **per l'intera attività**.

**Il livello di prestazione è: II** (è contrastata, per un periodo congruo con la durata dell'incendio, sia la propagazione dell'incendio verso altre attività sia la propagazione dell'incendio all'interno della stessa attività).

Il tipo di soluzione adottata per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto è: **conforme**. La definizione della soluzione conforme è determinata secondo i criteri descritti di seguito.

Per limitare la propagazione dell'incendio **verso altre attività**, si sarebbe potuto prevedere l'interposizione di una **distanza di separazione su spazio a cielo libero** oppure inserirsi il capannone in un **compartimento antincendio distinto**, per mezzo di opportuni elementi di separazione. Tali considerazioni e le relative verifiche esulano tuttavia dall'obiettivo della Tesi.

Mentre, per limitare la propagazione dell'incendio **all'interno della stessa attività**, si è optato per **suddividere la volumetria dell'opera da costruzione contenente l'attività in compartimenti antincendio** nel rispetto delle indicazioni del paragrafo S.3.6 del *D.M. 3 agosto 2015* [7]. In particolare, con riferimento alla tabella S.3-4 del suddetto paragrafo, si è verificato il rispetto delle massime superfici lorde dei compartimenti:

R <sub>vita</sub>	Quota del compartimento								
	< -15 m	< -10 m	< -5 m	< -1 m	≤ 12 m	≤ 24 m	≤ 32 m	≤ 54 m	> 54 m
A1	2000	4000	8000	16000	[1]	32000	16000	8000	4000
A2	1000	2000	4000	8000	[1]	16000	8000	4000	2000
A3	[na]	1000	2000	4000	32000	4000	2000	1000	[na]
A4	[na]	[na]	[na]	[na]	16000	[na]	[na]	[na]	[na]

Fig.10 §4. – Estratto della tabella S.3-4 del D.M. 3 agosto 2015: Massima superficie lorda del compartimento in m<sup>2</sup>

Compartimento	Area	Area massima secondo Tab. S.3-4 di [7]
Magazzino 1+2	750 m <sup>2</sup>	32000 m <sup>2</sup> (A3, quota +0,00 < +12,00)
Magazzino 3+4	450 m <sup>2</sup>	32000 m <sup>2</sup> (A3, quota +0,00 < +12,00)
Reparto produttivo	1980 m <sup>2</sup>	32000 m <sup>2</sup> (A3, quota +0,00 < +12,00)
Zona uffici	320 m <sup>2</sup>	32000 m <sup>2</sup> (A3, quota +0,00 < +12,00)

Fig.11 §4. – Verifica della superficie dei compartimenti antincendio

4.4. Esodo – sezione S.4

La trattazione della suddetta strategia antincendio esula dagli obiettivi della Tesi: non c'è alcun parametro  $\delta_n$  relativo alle misure d'esodo degli occupanti.

4.5. Gestione della sicurezza antincendio – sezione S.5

La gestione della sicurezza antincendio rappresenta la misura antincendio organizzativa e gestionale atta a garantire nel tempo un adeguato livello di sicurezza dell'attività in caso d'incendio.

La determinazione delle caratteristiche necessarie alla gestione della sicurezza è stata eseguita **per l'attività** nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.5 di [7].

In base alle caratteristiche dell'attività, il **livello di prestazione individuato è II** (Gestione della sicurezza antincendio di livello avanzato). Il tipo di soluzione adottata per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto è: **conforme**.

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Attività ove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• profili di rischio:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, Ci1, Ci2, Ci3;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• non prevalentemente destinata ad occupanti con disabilità;</li> <li>• tutti i piani dell'attività situati a quota compresa tra -10 m e 54 m;</li> <li>• carico di incendio specifico <math>q_f</math> non superiore a 1200 MJ/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative;</li> <li>• non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio o dell'esplosione.</li> </ul>
II	Attività non ricomprese negli altri criteri di attribuzione
III	Attività ove sia verificato <i>almeno una</i> delle seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• profilo di rischio <math>R_{beni}</math> compreso in 3, 4;</li> <li>• elevato affollamento complessivo:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ se aperta al pubblico: affollamento complessivo superiore a 300 persone;</li> <li>◦ se non aperta al pubblico: affollamento complessivo superiore a 1000 persone;</li> </ul> </li> <li>• numero complessivo di posti letto superiore a 100 e profili di rischio <math>R_{vita}</math> compresi in D1, D2, Ciii1, Ciii2, Ciii3;</li> <li>• si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative e affollamento complessivo superiore a 25 persone;</li> <li>• si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio o dell'esplosione e affollamento complessivo superiore a 25 persone.</li> </ul>

Fig.12 §4. – Tabella S.5-2 del D.M. 3 agosto 2015: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Si rimanda alla tabella S.5-4 del D.M. 3 agosto 2015 [7] per la definizione della struttura organizzativa minima e definisce compiti e funzioni di ogni operatore, per il

livello di prestazione II. Si precisa che non è prevista la presenta continuativa durante le 24 ore di addetto antincendio.

#### 4.6. Controllo dell'incendio – sezione S.6

La misura di controllo dell'incendio ha come scopo l'individuazione dei presidi antincendio da installare nell'attività per il controllo dell'incendio o per la sua completa estinzione. In particolare, si può optare per una protezione di base (attuata solo con estintori) o una protezione manuale oppure protezione automatica, realizzata con opportuni impianti.

La determinazione delle caratteristiche necessarie al controllo dell'incendio è stata eseguita **per l'intera attività**, nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.6. di [7].

In base alle caratteristiche dell'attività, il **livello di prestazione individuato è: III** (Protezione di base e protezione manuale).

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Non ammesso nelle attività soggette
II	Attività dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• profili di rischio:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, B1, B2, Ci1, Ci2, Cii1, Cii2, Ciii1, Ciii2;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1, 2;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,7 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• tutti i piani dell'attività situati a quota compresa tra -5 m e 32 m;</li> <li>• carico di incendio specifico <math>q_f</math> non superiore a 600 MJ/m<sup>2</sup>;</li> <li>• superficie lorda di ciascun compartimento non superiore a 4000 m<sup>2</sup>;</li> <li>• non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative;</li> <li>• non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.</li> </ul>
III	Attività non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività(es. attività con elevato affollamento, attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico $q_f$ , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...).
V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza, previsti da regola tecnica verticale.

Fig.13 §4. – Tabella S.6-2 del DM 3 agosto 2015: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Il tipo di soluzione adottata per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto è: **conforme**. È da prevedersi pertanto **l'installazione di estintori** per la protezione di base e la **predisposizione di una rete idranti**, per la protezione manuale dell'intera attività e dei singoli compartimenti.

Nel seguito, si riportano le caratteristiche degli estintori in termini di numero, posizionamento, tipologia, capacità estinguente e carica massima.

- In base alla tabella S.6-3 del *D.M. 3 agosto 2015* [7], la classe di incendio per l'attività in esame è: **A** (incendi di materiali solidi, usualmente di natura organica che portano alla formazione di braci) e **B** (incendi di materiali liquidi o solidi liquefacibili, quali petrolio paraffina, vernici, oli e grassi vegetali, plastiche);
- **Installazione di 22 estintori polivalenti (di cui 2 carrellati), ciascuno di classe 34 A-233 B**, per una capacità estinguente totale di 748 A-5126 B;

Variabile	Valore	Note	Classe
Superficie lorda del compartimento (S)	3500 m <sup>2</sup>	> 200 m <sup>2</sup>	/
C <sub>A,min</sub>	735	Calcolata come 0,21 · S	A
C <sub>A</sub> effettiva installata	748	22 estintori da 34 A ciascuno	
C <sub>B,min</sub>	5040	Calcolata come 1,44 · S	B
C <sub>B</sub> effettiva installata	5126	22 estintori da 233 B ciascuno	

Verifiche	Test	Classe
C <sub>A</sub> effettiva installata > C <sub>A,min</sub>	✓	A
50% della C <sub>A,min</sub> di classe ≥ 34 A	✓	
C <sub>B</sub> effettiva installata > C <sub>B,min</sub>	✓	B
50% della C <sub>B,min</sub> di classe ≥ 144 B	✓	

Fig.14 §4. – Valutazione numero e tipologia di estintori secondo §S.6.6.1.1 di [7]

- Collocati in posizione facilmente visibile e raggiungibile, in prossimità delle uscite di piano e lungo i percorsi d'esodo. Inoltre da ogni punto dell'attività è possibile raggiungere un estintore con un percorso effettivo di lunghezza non superiore a **15 m** (più restrittivo dei 20 m imposti dalla sola classe A);
- La carica dei dispositivi non è superiore ai 6 kg/6 litri.

I provvedimenti adottati sono conformi a quanto previsto ai paragrafi S.6.6.1.1 e S.6.6.1.2 di [7], per attività con superficie lorda superiore a 200 m<sup>2</sup>.

Infine, in conformità con la soluzione conforme, è previsto un **impianto di spegnimento a idranti per la protezione interna ed esterna** dell'attività. L'impianto è comprensivo di alimentazione idrica in presa diretta con l'acquedotto, rete di tubazioni

fisse chiuse ad anello interrate, attacchi di mandata per autopompa, valvole, apparecchi erogatori (9). Ogni dispositivo, progettato secondo la norma *UNI 10779* da professionista abilitato, ha un **raggio di pertinenza pari a 20 m**. Nello specifico, il capannone in esame, presenta:

- n. 5 idranti del tipo UNI 45 all'esterno;
- n. 4 idranti del tipo UNI 45 all'interno;

Non sono presenti nello stabilimento sostanze o impianti incompatibili con l'acqua.

#### 4.7. Rivelazione ed allarme – sezione S.7

Gli impianti di rivelazione e segnalazione allarme incendio (IRAI) hanno l'obiettivo di rivelare quanto prima la presenza di un incendio e di lanciare l'allarme al fine di attivare le misure protettive e gestionali programmate.

La trattazione della presente strategia antincendio è avvenuta nei riguardi **dell'intera attività**, nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.7 di [7] e secondo le modalità descritte in questo paragrafo.

In base alle caratteristiche dell'attività, il **livello di prestazione individuato è: III** (Rivelazione automatica estesa a porzioni dell'attività, sistema d'allarme, eventuale avvio automatico di sistemi di protezione attiva). La soluzione adottata è **conforme**.

Livello di prestazione	Aree sorvegliate	Funzioni minime degli IRAI		Funzioni di evacuazione e allarme	Funzioni di avvio protezione attiva ed arresto altri impianti
		Funzioni principali	Funzioni secondarie		
I	-	[1]		[2]	[3]
II	-	B, D, L, C	-	[5]	[3]
III	[8]	A, B, D, L, C,	E, F, G, H [4]	[5]	[3] o [7]
IV	Tutte	A, B, D, L, C,	E, F, G, H, M, N, O	[5] e [6]	[7]

[1] Non sono previste funzioni, la rivelazione e l'allarme sono demandate agli occupanti.  
 [2] L'allarme è trasmesso tramite segnali convenzionali codificati nelle procedure di emergenza (es. a voce, suono di campana, accensione di segnali luminosi, ...) comunque percepibili da parte degli occupanti.  
 [3] Demandate a procedure operative nella pianificazione d'emergenza.  
 [4] Non previste ove l'avvio dei sistemi di protezione attiva ed arresto altri impianti sia demandato a procedure operative nella pianificazione d'emergenza  
 [5] Con dispositivi di diffusione visuale e sonora o altri dispositivi adeguati alle capacità percettive degli occupanti ed alle condizioni ambientali (es. segnalazione di allarme ottica, a vibrazione, ...).  
 [6] Per elevati affollamenti, geometrie complesse, sia previsto sistema EVAC secondo norme adottate dall'ente di normazione nazionale.  
 [7] Automatiche su comando della centrale o mediante centrali autonome di azionamento (asservite alla centrale master), richiede le ulteriori funzioni E, F, G, H della tabella S.7-4.  
 [8] Spazi comuni, vie d'esodo e spazi limitrofi, aree dei beni da proteggere, aree a rischio specifico.

Fig.15 §4. – Tabella S.7-5 di [7]: Soluzioni conformi per il livello di prestazione III

In accordo con quanto illustrato nella tabella S.7-5 di [7], è prevista l'installazione di un impianto IRAI a protezione dell'intera attività e delle relative vie d'esodo, che abbia almeno le seguenti funzioni principali:

- A: rilevazione automatica dell'incendio, mediante appositi rilevatori di fumo posti a soffitto. Si tratta di rilevatori di fumo foto-ottici puntiformi. Il numero e la posizione sono indicati nella Tavola in allegato;
- B: funzione di controllo e segnalazione;
- C: funzione di allarme incendio. Preallarme nel compartimento di innesco ed attivazione automatica dell'allarme generale dopo tempo impostato;
- D: funzione di segnalazione manuale. Possibilità di azionare manualmente l'allarme mediante appositi pulsanti di allarme. Il numero e la posizione sono indicati nella Tavola in allegato;
- L: funzione di alimentazione;

Tra le altre funzioni, si precisa che il sistema è progettato in modo da consentire **l'apertura automatica dei lucernari a soffitto con funzione di evacuazione fumo e calore**, in seguito alla rivelazione dell'incendio (previsto un tempo di ritardo di 120 s). Di ciò è data evidenza nel Capitolo VI, dedicato alla Fire Safety Engineering.

#### 4.8. Controllo di fumi e calore – sezione S.8

La misura antincendio di controllo di fumo e calore ha come scopo l'individuazione dei presidi antincendio da installare nell'attività per consentire il controllo, l'evacuazione o lo smaltimento dei prodotti della combustione in caso di incendio.

La determinazione delle caratteristiche minime del sistema di controllo ed evacuazione di fumi e calore è stata eseguita, nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.8 del *D.M. 3 agosto 2015* [7], **per i compartimenti dell'attività**.

##### 4.8.1 Compartimento Magazzino 1+2

**Il livello di prestazione individuato è: II** (Deve essere possibile smaltire fumi e calore dell'incendio da piani e locali del compartimento durante le operazioni di estinzione condotte dalle squadre di soccorso).

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Compartimenti dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• non adibiti ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto;</li> <li>• superficie lorda di ciascun compartimento non superiore a 25 m<sup>2</sup>;</li> <li>• carico di incendio specifico q<sub>i</sub> non superiore a 600 MJ/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative;</li> <li>• non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.</li> </ul>
II	Compartimento non ricompreso negli altri criteri di attribuzione.
III	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività (es. attività con elevato affollamento, attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico q <sub>i</sub> , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...).

Fig.16 §4. – Tabella S.8-2 del DM 3 agosto 2015: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Il tipo di soluzione adottata per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto è: **conforme**. Pertanto è da prevedersi la possibilità di effettuare lo smaltimento di fumo e calore d'emergenza, mediante apposite aperture, secondo quanto previsto al paragrafo S.8.5. di [7].

Il capannone industriale analizzato, è già dotato di aperture verso l'esterno, sia verticali (uscite sicurezza e serramenti), sia orizzontali (lucernari a soffitto). In particolare, per quanto concerne il **compartimento Magazzino 1+2**, l'area totale delle aperture esistenti è pari a: **158 m<sup>2</sup>**, di cui **125 m<sup>2</sup>** dovuti ai lucernari.

Affinché sia rispettato quanto previsto al paragrafo S.8.5. di [7]:

- dei 158 m<sup>2</sup> totali, secondo quanto esposto in Fig. 20, è richiesto che **almeno 30 m<sup>2</sup>** siano **“aperture di smaltimento”**, di uno dei tipi previsti da tabella S.8-3. Nello specifico, si è previsto che ciascun modulo lucernario presenti una parte (circa 1/3 della lunghezza totale) apribile, o automaticamente con attivazione asservita ad IRAI (vedi §4.7.) **tipo SEb** oppure comandata da posizione non protetta **tipo SEd**;

Tipo	Descrizione
SEa	Permanentemente aperte
SEb	Dotate di sistema automatico di apertura con attivazione asservita ad IRAI
SEc	Provviste di elementi di chiusura non permanenti (es. infissi, ...) ad apertura comandata da posizione protetta e segnalata
SEd	Provviste di elementi di chiusura non permanenti (es. infissi, ...) ad apertura comandata da posizione non protetta
SEe	Provviste di elementi di chiusura permanenti (es. pannelli bassofondenti, ...) di cui sia dimostrata l'affidabile apertura nelle effettive condizioni d'incendio (es. condizioni termiche generate da incendio naturale sufficienti a fondere efficacemente il pannello bassofondente di chiusura, ...) o la possibilità di immediata demolizione da parte delle squadre di soccorso.

Fig.17 §4. – Tabella S.8-3 di [7]: Tipi di realizzazione delle aperture di smaltimento

Aperture di smaltimento	A <sub>utile</sub>
Moduli lucernari apribili automaticamente con attivazione asservita ad IRAI (SEb)	20,8 m <sup>2</sup>
Moduli lucernari ad apertura comandata da posizione non protetta (SEd)	20,8 m <sup>2</sup>

Fig.18 §4. – Dettaglio superficie utile delle aperture di smaltimento compartimento Magazzino 1+2

Tipo	Carico di incendio specifico q <sub>f</sub>	Superficie utile minima delle aperture di smaltimento S <sub>sm</sub>	Requisiti aggiuntivi
SE1	q <sub>f</sub> ≤ 600 MJ/m <sup>2</sup>	A / 40	-
SE2	600 < q <sub>f</sub> ≤ 1200 MJ/m <sup>2</sup>	A · q <sub>f</sub> / 40000 + A / 100	-
SE3	q <sub>f</sub> > 1200 MJ/m <sup>2</sup>	A / 25	10% di S <sub>sm</sub> di tipo Sea o SEb o SEc

A -superficie lorda del piano del compartimento [m<sup>2</sup>];  
S<sub>sm</sub> -superficie utile delle aperture di smaltimento [m<sup>2</sup>]

Fig.19 §4. – Tabella S.8-4 di [7]: Dimensione minima delle aperture di smaltimento

Variabile	Valore	Note
Superficie compartimento	750 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento
q <sub>f</sub>	3000 MJ/m <sup>2</sup>	q <sub>f</sub> > 1200 MJ/m <sup>2</sup>
S <sub>sm</sub>	<b>30 m<sup>2</sup></b>	Calcolato come A/25

Fig.20 §4. – Calcolo superficie utile minima secondo Tabella S.8-4 di [7] compartimento Magazzino 1+2

- fumo e calore smaltiti dalle aperture previste non interferiscono con il sistema di vie d'esodo e non si propagano verso altri locali;
- tali aperture di smaltimento risultano collocate in modo da smaltire fumo e calore da tutti gli ambiti del compartimento;
- le aperture di smaltimento risultano distribuite uniformemente;

#### 4.8.2 Compartimento Magazzino 3+4

Le considerazioni sono analoghe a quelle effettuate per il compartimento *Magazzino 1+2*. Il **livello di prestazione individuato è II e la soluzione adottata risulta conforme.**

In particolare, per quanto concerne il **compartimento *Magazzino 3+4***, l'area totale delle aperture esistenti è pari a: **96 m<sup>2</sup>**, di cui **55 m<sup>2</sup>** dovuti ai lucernari.

Affinché sia rispettato quanto previsto al paragrafo S.8.5. di [7]:

- dei 96 m<sup>2</sup> totali, secondo quanto esposto in Fig. 22, è richiesto che **almeno 18 m<sup>2</sup>** siano “**aperture di smaltimento**”, di uno dei tipi previsti da tabella S.8-3. Nello specifico, si è previsto che ciascun modulo lucernario presenti una parte (circa 1/3 della lunghezza totale) apribile, o automaticamente con attivazione asservita ad IRAI (vedi §4.7.) **tipo SEb** oppure comandata da posizione non protetta **tipo SEd**;

Aperture di smaltimento	A <sub>utile</sub>
Moduli lucernari apribili automaticamente con attivazione asservita ad IRAI (SEb)	9 m <sup>2</sup>
Moduli lucernari ad apertura comandata da posizione non protetta (SEd)	9 m <sup>2</sup>

Fig.21 §4. – Dettaglio superficie utile delle aperture di smaltimento compartimento *Magazzino 3+4*

Variabile	Valore	Note
Superficie compartimento	450 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento
q <sub>f</sub>	3576 MJ/m <sup>2</sup>	q <sub>f</sub> > 1200 MJ/m <sup>2</sup>
S <sub>sm</sub>	<b>18 m<sup>2</sup></b>	Calcolato come A/25

Fig.22 §4. – Calcolo superficie utile minima secondo Tabella S.8-4 di [7] compartimento *Magazzino 3+4*

- fumo e calore smaltiti dalle aperture previste non interferiscono con il sistema di vie d’esodo e non si propagano verso altri locali;
- tali aperture di smaltimento risultano collocate in modo da smaltire fumo e calore da tutti gli ambiti del compartimento;
- le aperture di smaltimento risultano distribuite uniformemente;

#### 4.8.3 Restanti compartimenti

Per i restanti compartimenti, *Reparto produttivo* e *Zona uffici*, ci si limita ad esplicitare le superfici utili di aperture minime da rispettare. Nello specifico, per il compartimento *Reparto Produttivo* è risultato sufficiente prevedere che ciascun modulo lucernario, presentasse una parte (circa 1/3 della lunghezza totale) apribile, o automaticamente con attivazione asservita ad IRAI (vedi §4.7.) **tipo SEb** oppure comandata da posizione non protetta **tipo SEd**. Mentre per il compartimento *Zona uffici*, non essendo disponibili lucernari a soffitto, si è ipotizzato di agire in maniera simile ma sulle aperture verticali esistenti.

Variabile	Valore	Note
Superficie compartimento	1980 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento
q <sub>f</sub>	< 450 MJ/m <sup>2</sup>	q <sub>f</sub> < 600 MJ/m <sup>2</sup>
S <sub>sm</sub>	<b>50 m<sup>2</sup></b>	Calcolato come A/40

Fig.23 §4. – Calcolo superficie utile minima secondo Tabella S.8-4 di [7] compartimento *Reparto produttivo*

Variabile	Valore	Note
Superficie compartimento	320 m <sup>2</sup>	Superficie in pianta compresa entro il perimetro interno delle pareti delimitanti il compartimento
q <sub>f</sub>	< 660 MJ/m <sup>2</sup>	(600 < q <sub>f</sub> < 1200) MJ/m <sup>2</sup> (hp cautelativa)
S <sub>sm</sub>	<b>13 m<sup>2</sup></b>	Calcolato come $A \cdot q_f / 40000 + A / 100$ (q <sub>f</sub> = 1200 MJ/m <sup>2</sup> come hp cautelativa)

Fig.24 §4. – Calcolo superficie utile minima secondo Tabella S.8-4 di [7] compartimento *Zona uffici*

#### 4.9. Operatività antincendio – sezione S.9

L'operatività antincendio ha lo scopo di agevolare l'intervento di soccorso da parte dei Vigili del fuoco.

La determinazione delle caratteristiche minime dell'operatività antincendio è stata eseguita **per l'attività** nel rispetto delle indicazioni del capitolo S.9 di [7].

In base alle caratteristiche dell'attività, è stato individuato **il livello di prestazione III** (Accessibilità per mezzi di soccorso antincendio; pronta disponibilità di agenti estinguenti).

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Non ammesso nelle attività soggette
II	<p>Attività dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, B1, B2, Ci1, Ci2;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• tutti i piani dell'attività situati a quota compresa tra -5 m e 12 m;</li> <li>• superficie lorda di ciascun compartimento non superiore a 4000 m<sup>2</sup>;</li> <li>• carico di incendio specifico <math>q_f</math> non superiore a 600 MJ/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative;</li> <li>• non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio o dell'esplosione.</li> </ul>
III	Attività non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV	<p>Attività dove sia verificata <i>almeno una</i> delle seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• profilo di rischio <math>R_{beni}</math> compreso in 3, 4;</li> <li>• elevato affollamento complessivo: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ se aperta al pubblico: affollamento complessivo superiore a 300 persone;</li> <li>◦ se non aperta al pubblico: affollamento complessivo superiore a 1000 persone;</li> </ul> </li> <li>• numero totale di posti letto superiore a 100 e profili di rischio <math>R_{vita}</math> compresi in D1, D2, Ciii1, Ciii2, Ciii3;</li> <li>• si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative e affollamento complessivo superiore a 25 persone;</li> <li>• si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio o dell'esplosione e affollamento complessivo superiore a 25 persone.</li> </ul>

Fig.25 §4. – Tabella S.9-2 del DM 3 agosto 2015: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Il tipo di soluzione adottata per garantire il raggiungimento del livello di prestazione scelto è: **conforme**.

E' permanentemente assicurata la possibilità di avvicinare i mezzi di soccorso antincendio agli accessi ai piani di riferimento per tutti i compartimenti in cui consiste l'attività.. Infatti, come si osserva dalla Tavola in allegato, il piano di riferimento per

tutti i compartimenti dell'attività è la pubblica via. Inoltre, la distanza dei mezzi di soccorso dagli accessi di piano non è mai superiore a 50 metri.

**Non è prevista l'installazione della colonna a secco**, in quanto è predisposta una rete idranti a protezione dell'attività interna. Inoltre l'attività non presenta piani sopraelevati.

## **CAPITOLO V**

---

### **VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO: APPROCCIO PRESCRITTIVO**

### 5.1. Premessa metodologica

Nel presente Capitolo, si eseguono le verifiche di Resistenza al fuoco in termini di **mantenimento della capacità portante**, secondo **approccio prescrittivo**. In accordo con quanto anticipato al Capitolo II, la soluzione conforme al livello di prestazione III presuppone la **verifica degli elementi con curva nominale d'incendio per un tempo minimo pari al valore della classe di resistenza, ricavata per ogni compartimento in relazione al carico di incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$**  (vedi §4.2). Nello specifico, le verifiche si sono eseguite per ciascuna membratura con **metodo analitico avanzato (3° livello) e in riferimento alla curva T-t nominale UNI 834**.

Seguendo l'approccio semiprobabilistico agli stati limite, descritto nelle *NTC 2018* [5] e negli *Eurocodici UNI EN 1992-1-2* [11], occorre verificare che:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (5.1)$$

Dove:

$E_{d,t,fi}$  = è l'azione agente in condizioni di incendio al tempo t, secondo la combinazione di carico eccezionale, che può comprendere gli effetti indiretti causati dalle deformazioni di natura termica;

$R_{d,t,fi}$  = è la corrispondente resistenza in condizioni di incendio al medesimo tempo t, valutata per ogni sezione di verifica, in funzione della curva di incendio adottata e delle caratteristiche meccaniche - geometriche.

Nel caso in esame, il primo termine della disequazione (5.1), è stato determinato **trascorrendo il contributo delle sollecitazioni indirette** dovute alle dilatazioni termiche contrastate. Si è assunta questa ipotesi perché come precisato al paragrafo 3.6.1.5.2 delle *NTC 2018 - Analisi del comportamento meccanico* – “le sollecitazioni indirette, dovute agli elementi strutturali adiacenti a quello preso in esame, possono essere trascurate quando i requisiti di sicurezza all'incendio sono valutati in riferimento alla curva nominale d'incendio e alle classi di resistenza al fuoco”.

Inoltre, trattandosi di un capannone industriale in calcestruzzo armato prefabbricato, gli schemi strutturali risultano di tipo isostatico e come suggerito da Buchanan (2009), nella maggior parte dei casi, “la deformazione termica non gioca nessun ruolo statico nella progettazione antincendio di elementi semplicemente appoggiati (isostatici e privi di vincoli assiali)”. A tal proposito, si rimanda anche al paragrafo 2.2 della presente relazione di Tesi, in cui sono state sottolineate alcune eccezioni.

In riferimento al secondo termine della disequazione (5.1), il calcolo è stato eseguito con **metodo avanzato di 3° livello**. Come anticipato al §2.2, Si tratta di un metodo di tipo incrementale-iterativo, basato sulle leggi costitutive non lineari e dipendenti dalla temperatura (§3.2.2.1 dell'EC2). Il calcolo è stato eseguito in maniera automatica, con l'ausilio del software di calcolo **CDM Dolmen** e in particolare del modulo **IS Fuoco**.

Previa conoscenza della curve di incendio Temperatura-Tempo e dei lati esposti, il software analizza l'evoluzione della temperatura all'interno della sezione di verifica e determina il valore di R, tenendo conto della variabilità delle leggi costitutive con la temperatura e del decadimento delle prestazioni meccaniche dei materiali. Nel paragrafo 2.1 si è già avuto modo di descrivere le conseguenze dell'elevata temperatura nei confronti delle proprietà termiche e meccaniche del calcestruzzo armato.

Il confronto (5.1) è stato eseguito per le singole membrature (pilastri, travi e tegoli), in riferimento alla sezione più sollecitata. Il calcolo sezionale è risultato esaustivo, in quanto trattandosi di strutture isostatiche, il collasso di una sezione comporta il collasso dell'intero elemento.

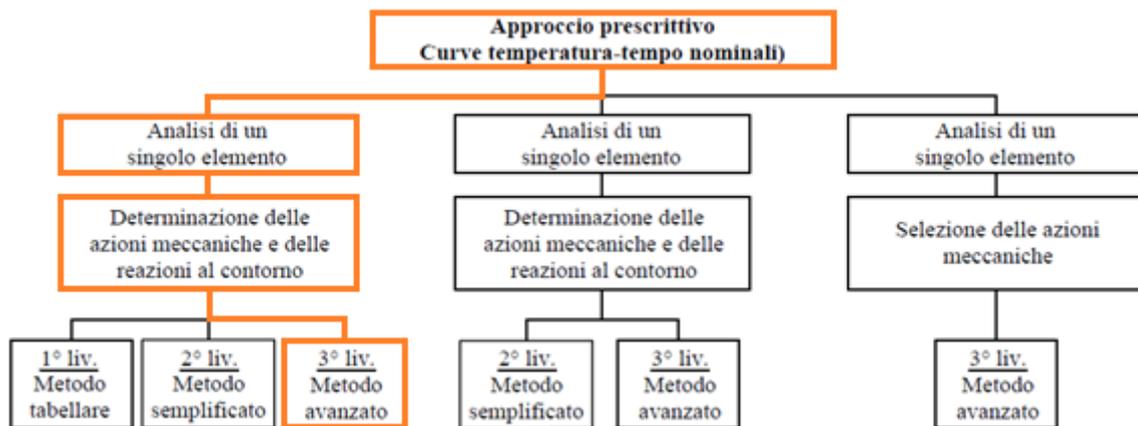


Fig.1 §5. – Evidenziazione metodo di progettazione adottato

## 5.2. Geometria e modellazione 3D

Il capannone presenta una struttura ad un solo piano fuori terra ed è in **calcestruzzo armato prefabbricato**, non precompresso. Come si evince dalla pianta, la maglia strutturale è pressoché regolare.

I pilastri, di lunghezza 5,20 m (zona sinistra) o 6,10 m (zona rialzata destra), hanno dimensioni considerevoli e sono di sezione rettangolare o ad "I".

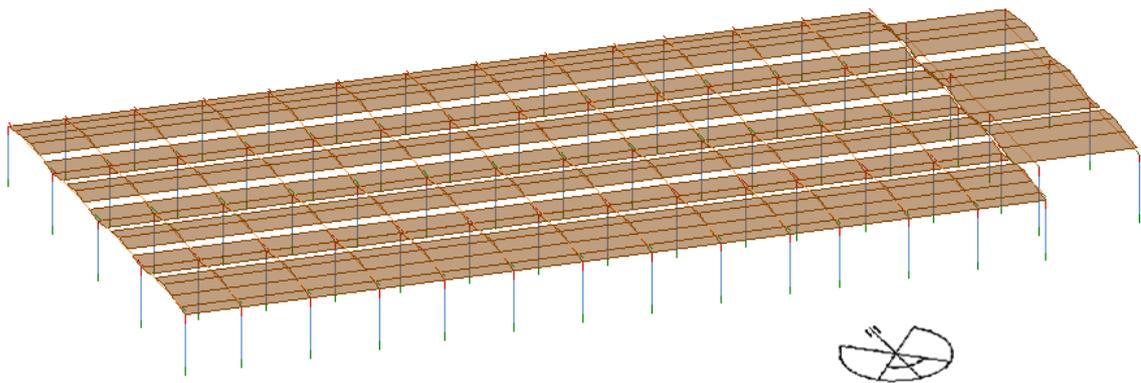
Le travi principali, ordite parallelamente al lato minore dell'edificio, sono del tipo a

doppia pendenza con sezioni ad “I” o a “T” e presentano lunghezze comprese tra 9,70÷12,2 m.

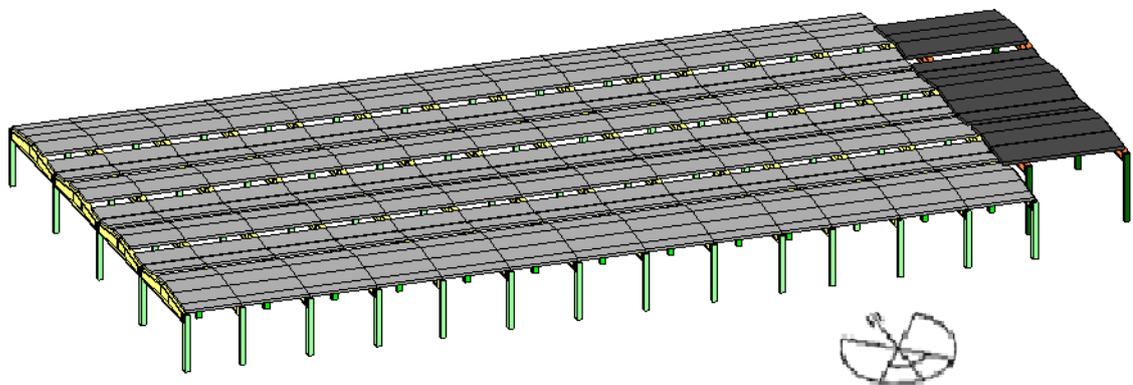
Il solaio di copertura è realizzato mediante tegole prefabbricate, aventi larghezza di 2,50 m o 2,05 m. Dall’assenza di intere file di tegole, si originano le aperture lucernari a soffitto, con funzione aero-illuminante e di evacuazione fumo e calore in caso di incendio.

I pilastri, travi e tegole, sono stati modellati come elementi finiti monodimensionali, del tipo “Asta” e presentano opportuni svincolamenti agli estremi, che conferiscono agli stessi la configurazione isostatica tipica della prefabbricazione in c.a.

Infine, riguardo ai vincoli esterni, si precisa che alla base dei pilastri sono presenti degli incastrati.



*Fig.2 §5. – Modello strutturale analitico del capannone industriale*



*Fig.3 §5. – Modello strutturale solido del capannone industriale*

### 5.3. Rilievo fotografico



*Fig.3 §5. – Foto da cono ottico n.1*



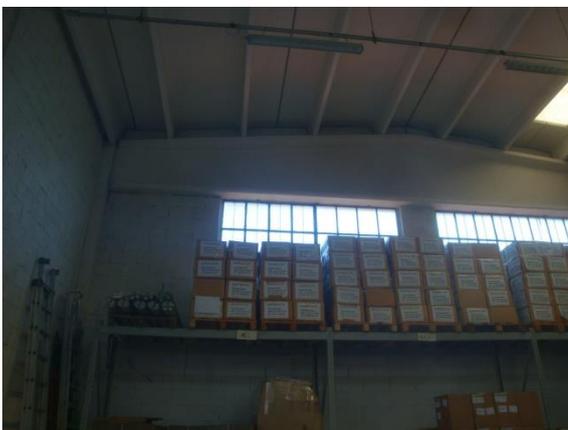
*Fig.4 §5. – Foto da cono ottico n.2*



*Fig.5 §5. – Foto da cono ottico n.3*



*Fig.6 §5. – Foto da cono ottico n.4*



*Fig.7 §5. – Foto da cono ottico n.5*



*Fig.8 §5. – Foto da cono ottico n.6*



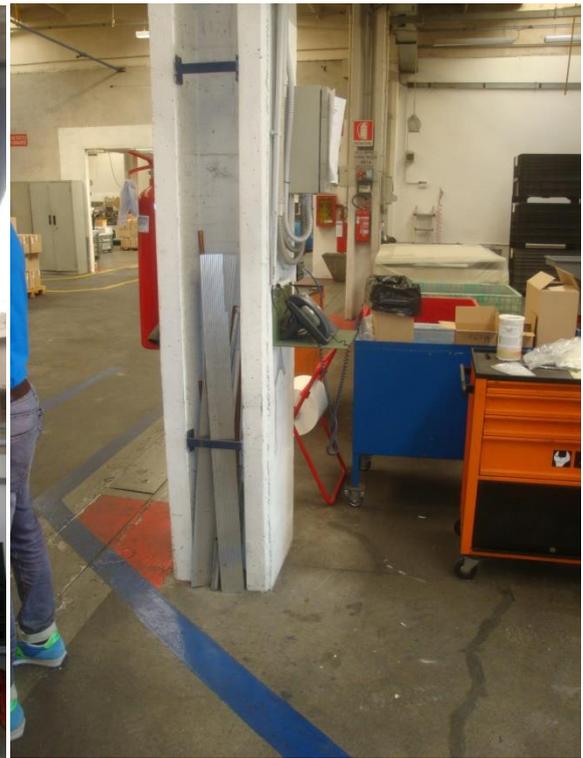
*Fig.9 §5. – Foto da cono ottico n.7*



*Fig.10 §5. – Foto da cono ottico n.8*



*Fig.11 §5. – Foto da cono ottico n.9*



*Fig.12 §5. – Foto da cono ottico n.10*

Si rimanda alla Tavola grafica allegata, per l'indicazione dei coni ottici.

#### 5.4. Sezioni

Nel seguito si riportano le sezioni degli elementi strutturali. Il numero e il diametro delle armature, sono stati dedotti dallo studio CDP conducendo dei progetti simulati in accordo alle norme dell'epoca.

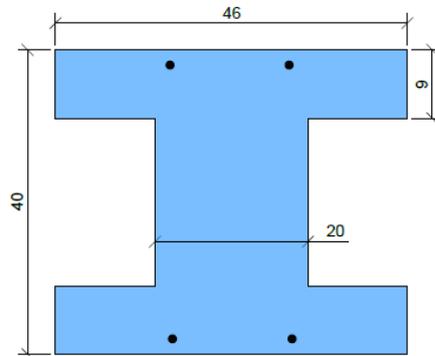


Fig.13 §5. – Pilastro ad “I” con ferri  $\Phi 10$ . Scala 1:10, misure in cm

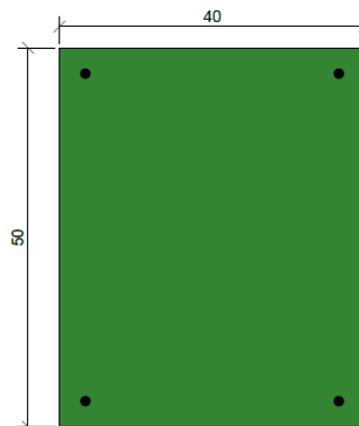


Fig.14 §5. – Pilastro rettangolare con ferri  $\Phi 12$ . Scala 1:10, misure in cm

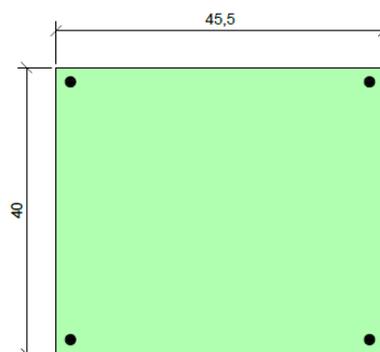


Fig.15 §5. – Pilastro rettangolare con ferri  $\Phi 14$ . Scala 1:10, misure in cm

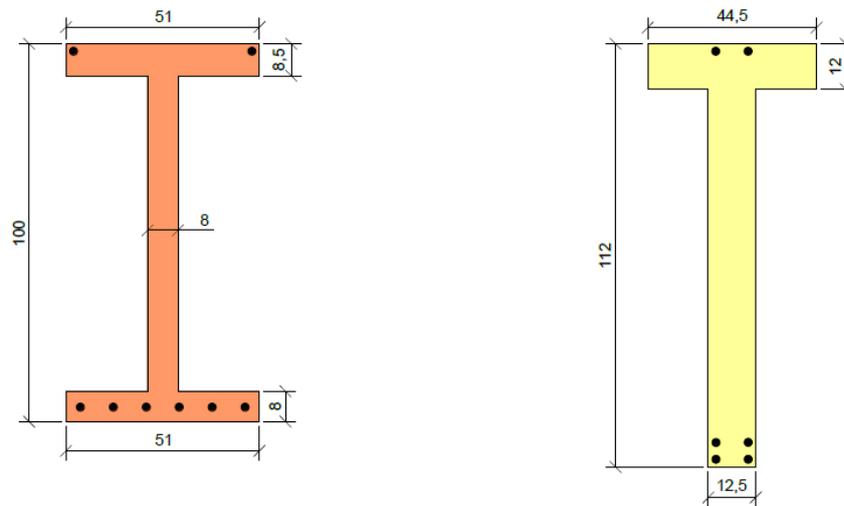


Fig.16 §5. – Travi ad “I” e a “T” con ferri  $\Phi 20$ . Scala 1:20, misure in cm

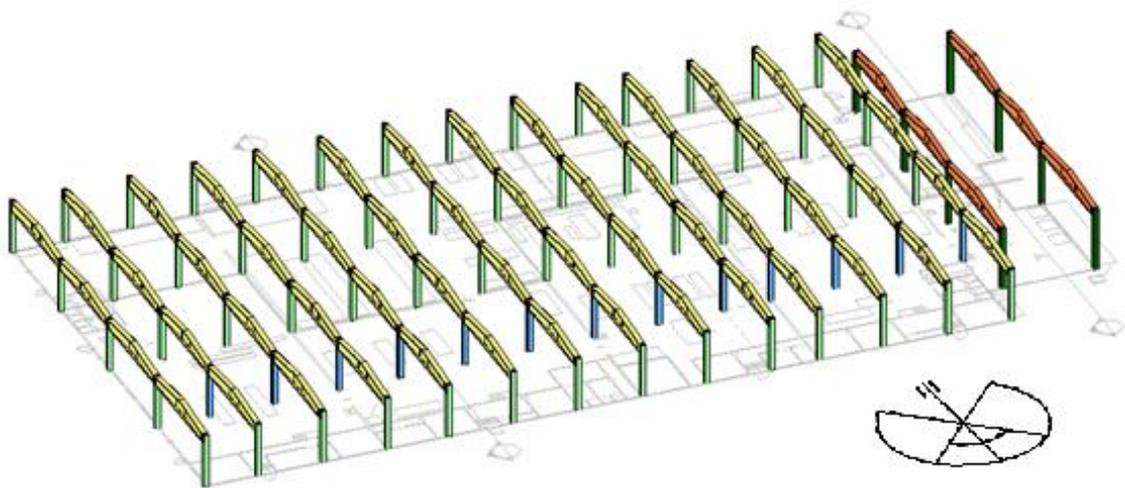


Fig.17 §5. – Individuazione spaziale degli elementi trave e pilastro

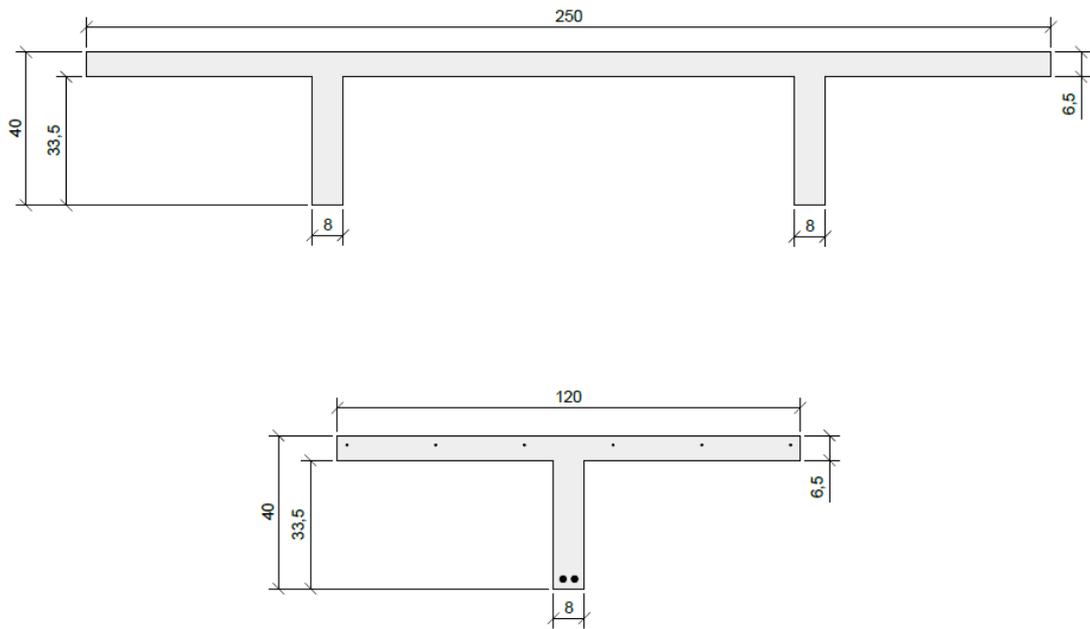


Fig.18 §5. – Tegolo  $H=40$  cm (in alto) e relativa sezione di calcolo (in basso).  
Ferri  $\Phi 5$  superiori e  $\Phi 16$  inferiori. Scala 1:20, misure in cm

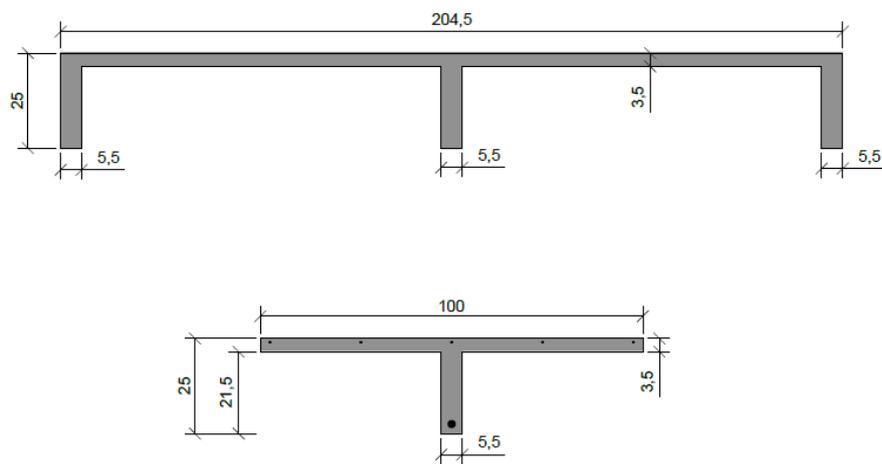


Fig.19 §5. – Tegolo  $H=25$  cm (in alto) e relativa sezione di calcolo (in basso).  
Ferri  $\Phi 5$  superiori e  $\Phi 18$  inferiore. Scala 1:20, misure in cm

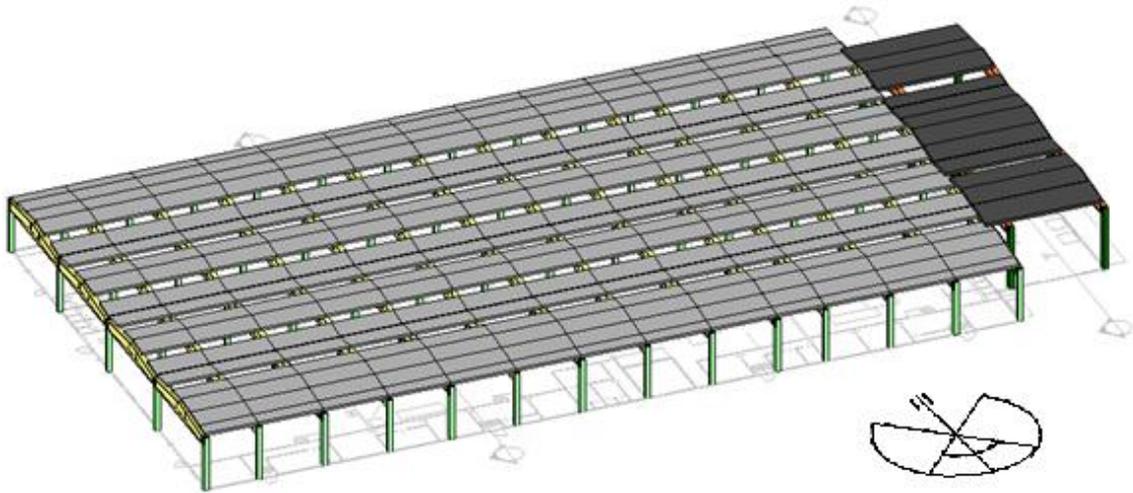


Fig.20 §5. – Individuazione spaziale degli elementi tegolo

## 5.5. Materiali

La scelta dei materiali è avvenuta in seguito a verifiche in situ. Nonostante ciò, in favore di sicurezza è stato adottato un **Fattore di Confidenza pari a 1,35, corrispondente ad un livello di conoscenza limitato (LC1)**.

### 5.5.1 Calcestruzzo C30/37

La seguente tabella riassume le caratteristiche meccaniche del materiale:

$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	30
$\varepsilon_{c2}$ [%]	0,20
$\varepsilon_{cu2}$ [%]	0,35
n	2

La seguente tabella riassume le proprietà meccaniche per la verifica "a freddo".

$\gamma_c$	2,02
$\alpha_{cc}$	0,85
$f_{cd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	12,62
$\varepsilon_{c2}$ [%]	0,20

$\varepsilon_{cu2}$ [%]	0,35
n	2

La seguente tabella riassume le proprietà meccaniche per la verifica "a caldo".

$\alpha_{cc}$	1
$\gamma_c$	1,35
aggregato	siliceo
$k_c$	ENV 1992-1-2 gen. 1998 3.2
$f_{cd, \theta=20^\circ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	22,22

Per le analisi termiche, si è fatto riferimento al **calcestruzzo ad aggregato siliceo raccomandato dall'EC2 Parte 1-2** (Gennaio 1998).

Le curve di calore specifico, conduttività termica e densità volumica sono tratte dalla norma UNI ENV 1992-1-2 01/1998 A.3.1. Si è considerata un'umidità in massa del 2%. La densità volumica è stata mantenuta costante oltre i 100°C.

### 5.5.2 Acciaio Fe44k

La seguente tabella riassume le caratteristiche meccaniche.

$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	430
E [N/mm <sup>2</sup> ]	210000
ramo	inclinato limitato
k	1,20
$\varepsilon_{ud}$ [%]	6,75

La seguente tabella riassume le proprietà meccaniche per la verifica "a freddo".

$\gamma_s$	1,55
$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	277,42
$\varepsilon_y$ [%]	0,001321

La seguente tabella riassume le proprietà meccaniche per la verifica "a caldo".

$\gamma_s$	1,35
$k_s$	ENV 1992-1-2 gen. 1998 3.3 - defo.>2%
$f_{yd, \theta=20^\circ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	318,52

## 5.6. Carichi e combinazioni di calcolo

In accordo con il paragrafo 2.5.3 delle NTC 2018, le sollecitazioni agenti sono state calcolate secondo la combinazione eccezionale di Stato Limite Ultimo:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \Psi_{21} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (5.2)$$

Il calcolo è stato eseguito con CDM Dolmen, modulo generico di calcolo strutturale 3D. Ciò ha consentito di determinare le sezioni più sollecitate:

- Pilastro centrale compartimento *Reparto produttivo* sezione a “I”, da verificare a R30;
  - Pilastro centrale compartimento *Magazzino 1+2* sezione rettangolare 45,5x40, da verificare a R240;
  - Pilastro di bordo compartimento *Magazzino 1+2* sezione rettangolare 45,5x40, da verificare a R240;
  - Pilastro centrale compartimento *Magazzino 3+4* sezione rettangolare 40x50, da verificare a R240;
- 
- Trave compartimento *Magazzino 1+2* sezione a “T”, da verificare a R240;
  - Trave compartimento *Reparto produttivo* sezione a “T”, da verificare a R30;
  - Trave compartimento *Magazzino 3+4* sezione a “I”, da verificare a R240;
  - Trave compartimento *Reparto produttivo* sezione a “I”, da verificare a R30;

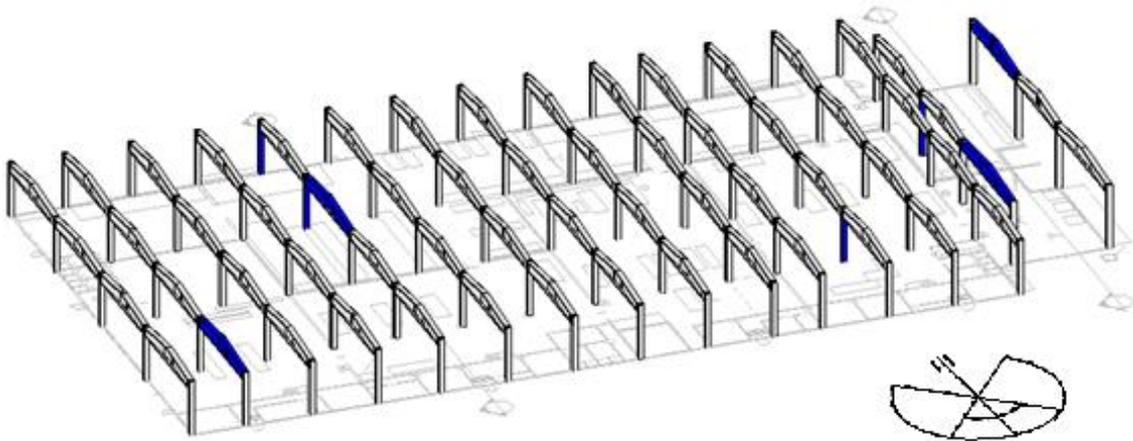


Fig.21 §5. – Individuazione spaziale degli elementi pilastro e trave da verificare

- Tegolo H=25 compartimento *Magazzino 1+2*, da verificare a R240;
- Tegolo H=25 compartimento *Reparto produttivo*, da verificare a R30;
- Tegolo H=40 compartimento *Magazzino 3+4*, da verificare a R240;

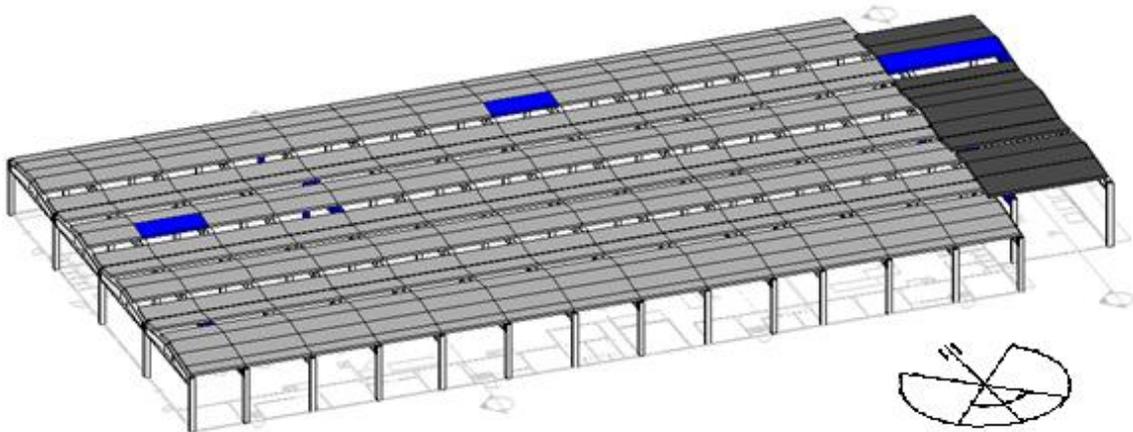


Fig.22 §5. – Individuazione spaziale degli elementi tegolo da verificare

Per ciascuna sezione, sono stati estrapolati i sestetti di sollecitazioni agenti, indispensabili per eseguire le successive verifiche di resistenza all'incendio con il modulo di CDM Dolmen IS Fuoco.

5.7. Analisi termica e verifiche strutturali

Nel seguito, si eseguono l'analisi termica e la verifica meccanica a caldo delle sezioni sopra citate.

5.7.1 Pilastro centrale sezione I - REI 30

**Tempo di esposizione:** 30 minuti;

**Esposizione:** completa su tutti i lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = -141,1 \text{ kN}$ ;  $M_{z_d} = 0 \text{ kN m}$ ;  $M_{y_d} = 0 \text{ kN m}$ .

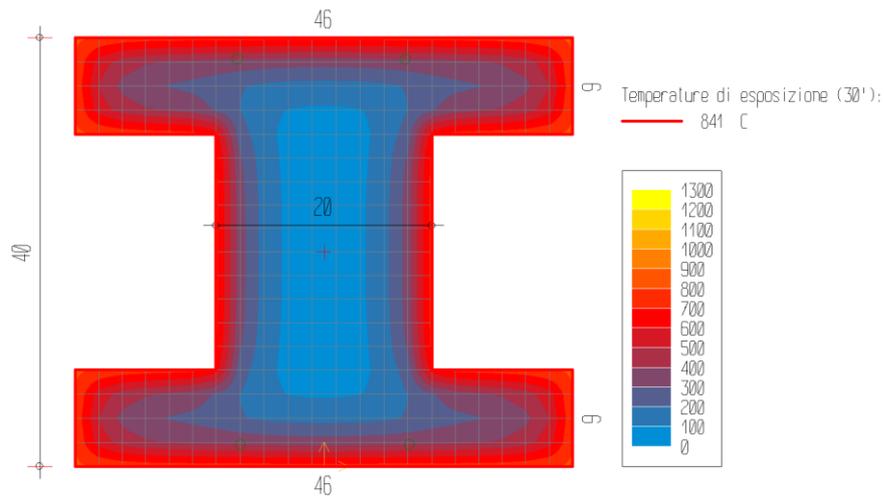


Fig.23 §5. – Analisi termica a 30 minuti

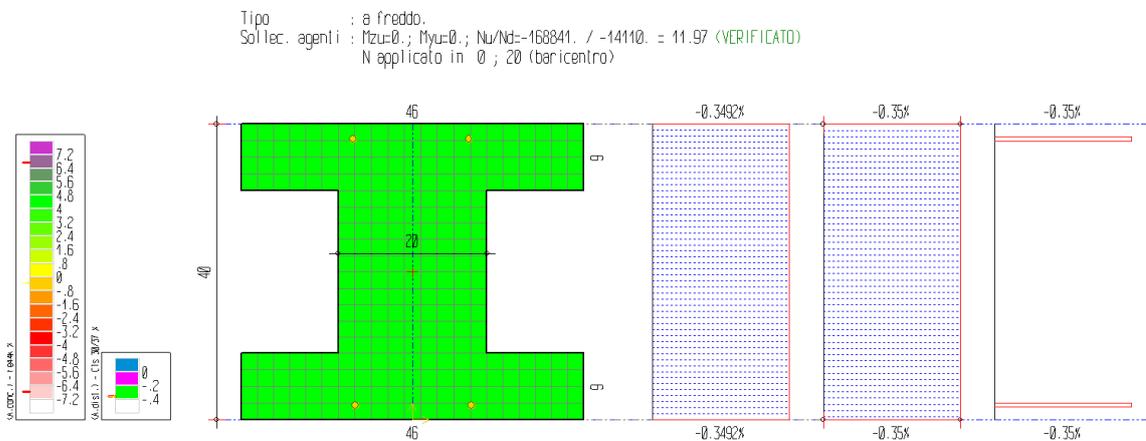


Fig.24 §5. – Verifica a compressione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione N (-), in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{N_{ult}/N_d = 11,97}$$

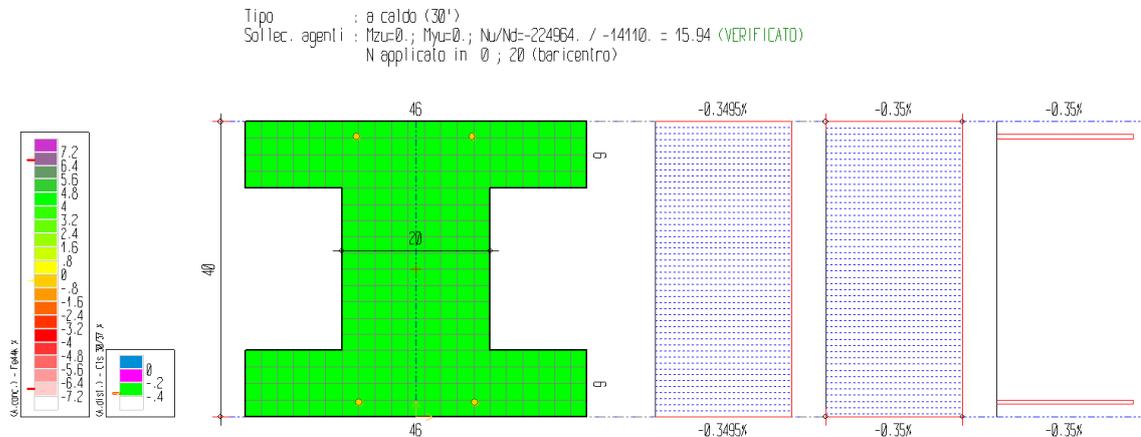


Fig.25 §5. – Verifica a compressione, a caldo

$$\underline{N_{ult}/N_d = 15,94}$$

**Verifiche a compressione soddisfatte.**

### 5.7.2 Pilastro centrale rettangolare 45,5x40 - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** completa su tutti i lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = -150$  kN;  $M_{Zd} = 0$  kN m;  $M_{Yd} = 0$  kN m.

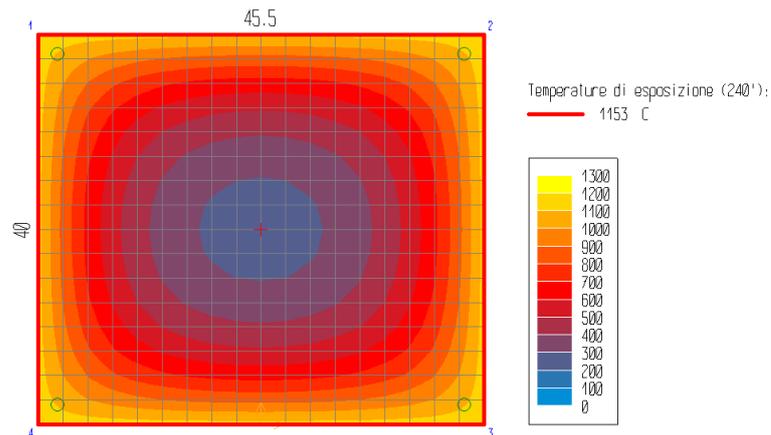


Fig.26 §5. – Analisi termica a 240 minuti

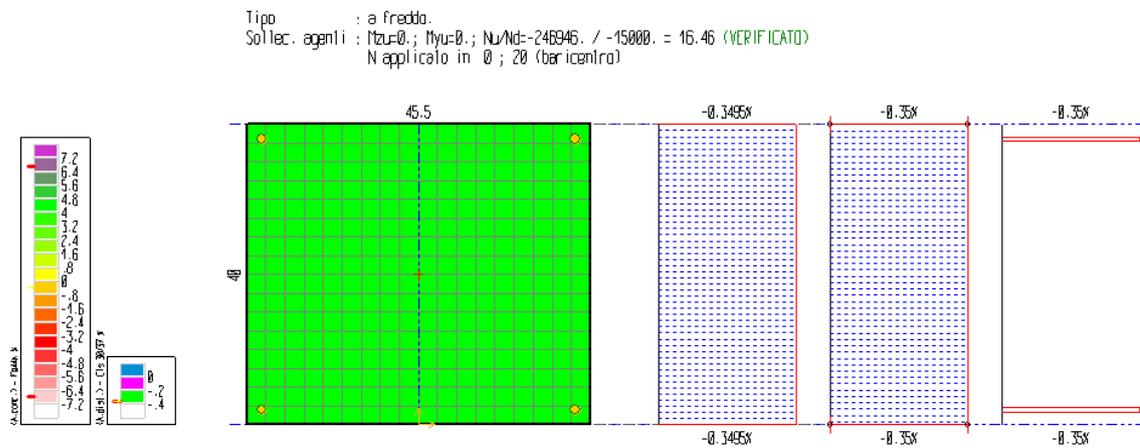


Fig.27 §5. – Verifica a compressione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione N (-), in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{N_{ult}}{N_d} = 16.46$$

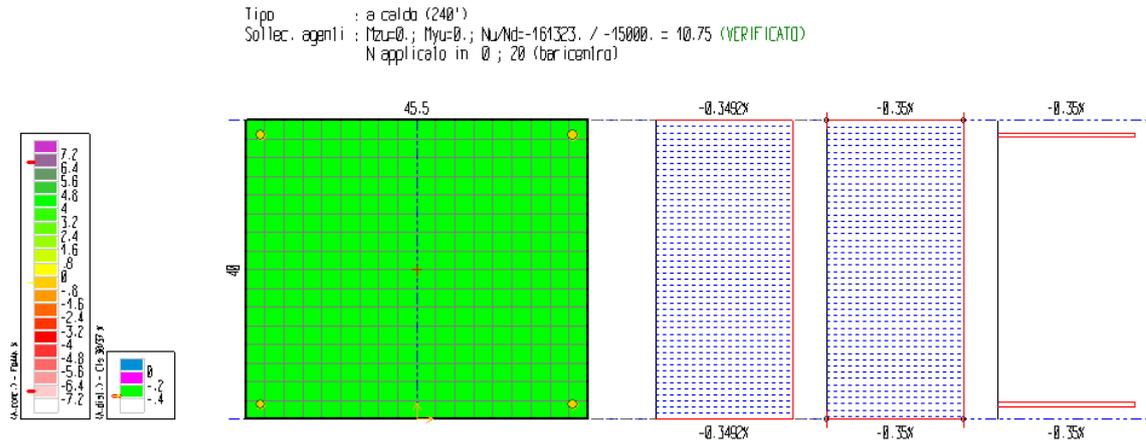


Fig.28 §5. – Verifica a compressione, a caldo

$$N_{ult}/N_d = 10,75$$

Verifiche a compressione soddisfatte.

### 5.7.3 Pilastro di bordo rettangolare 45,5x40 - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = -84,55$  kN;  $M_{z_d} = 4,30$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

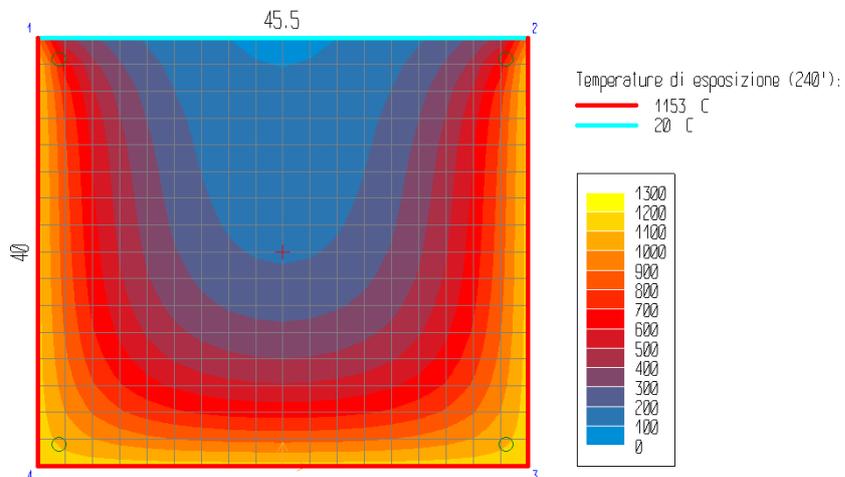


Fig.29 §5. – Analisi termica a 240 minuti

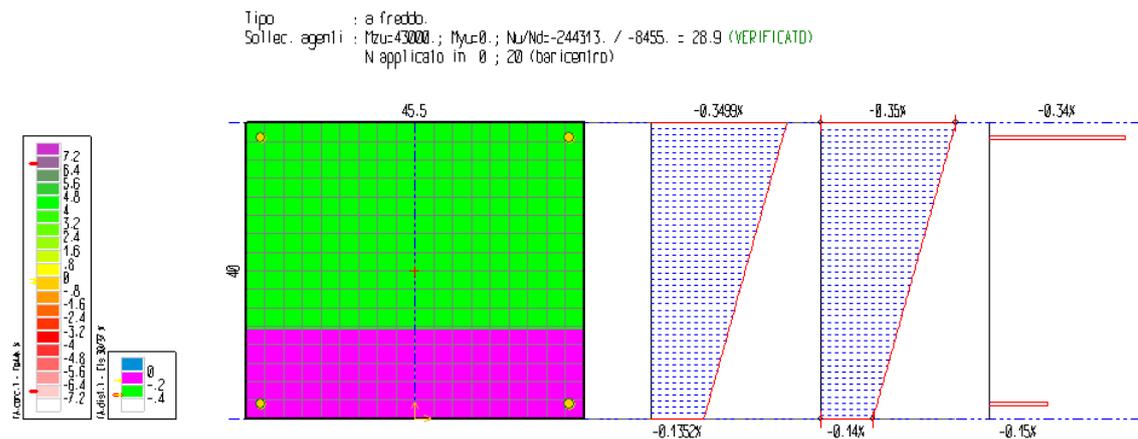


Fig.30 §5. – Verifica a pressoflessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 28,90}$$

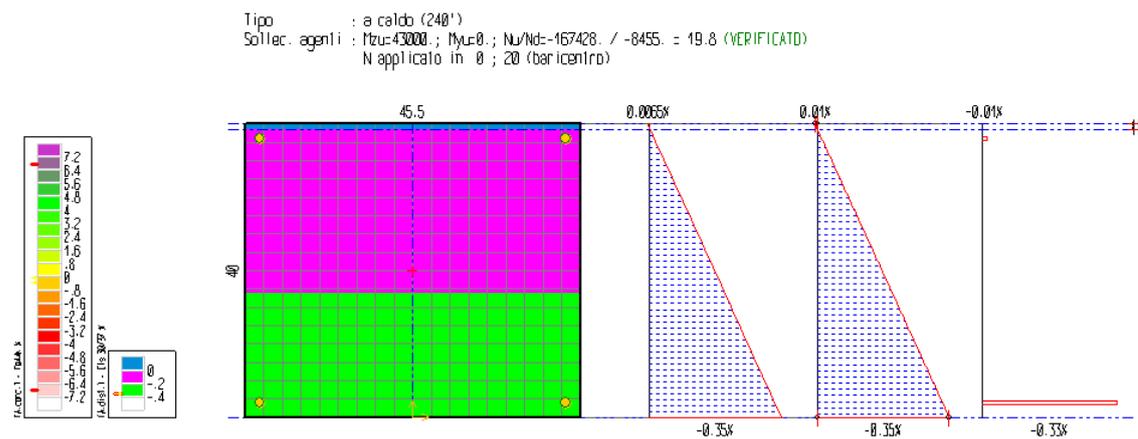


Fig.31 §5. – Verifica a pressoflessione, a caldo

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 19,80}$$

**Verifiche a pressoflessione soddisfatte.**

5.7.4 Pilastro centrale rettangolare 40x50 - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** completa su tutti i lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = -302,60$  kN;  $M_{z_d} = 0$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

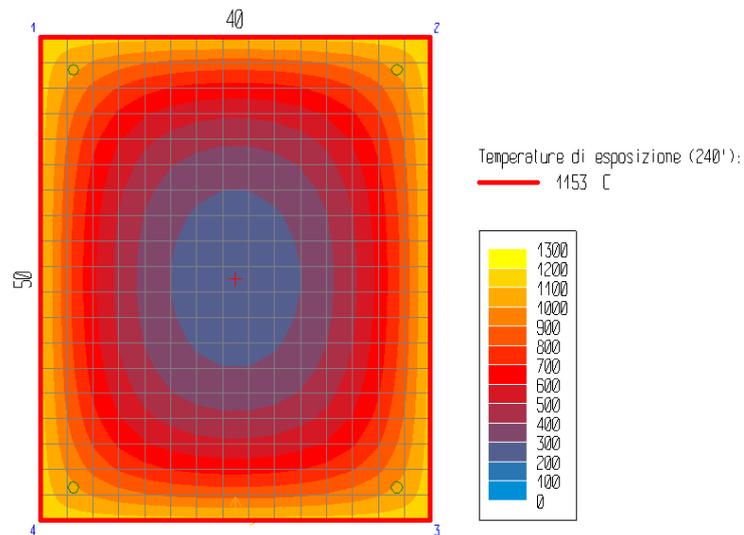


Fig.32 §5. – Analisi termica a 240 minuti

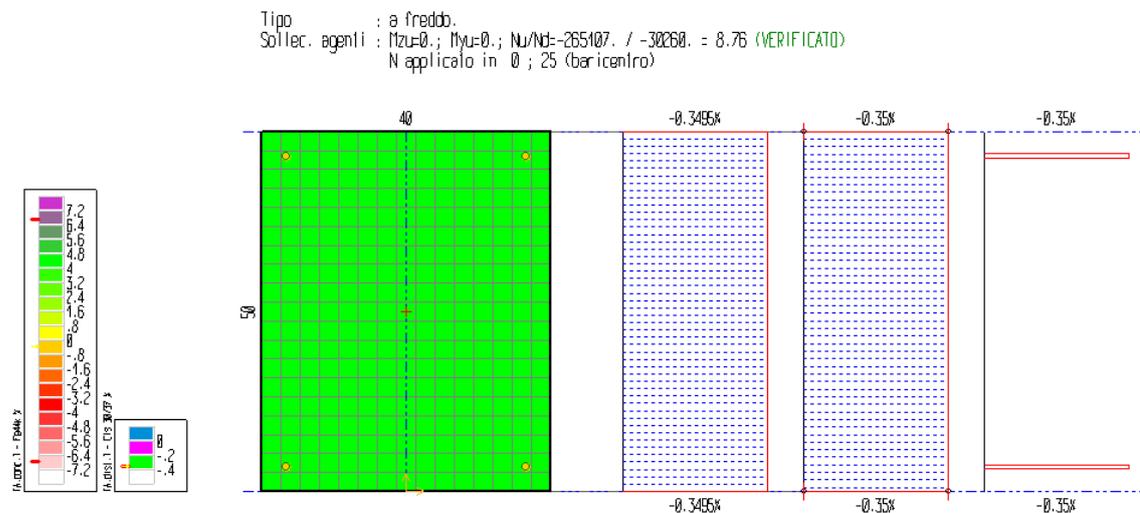


Fig.33 §5. – Verifica a compressione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione N (-), in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$N_{ult}/N_d = 8,76$$

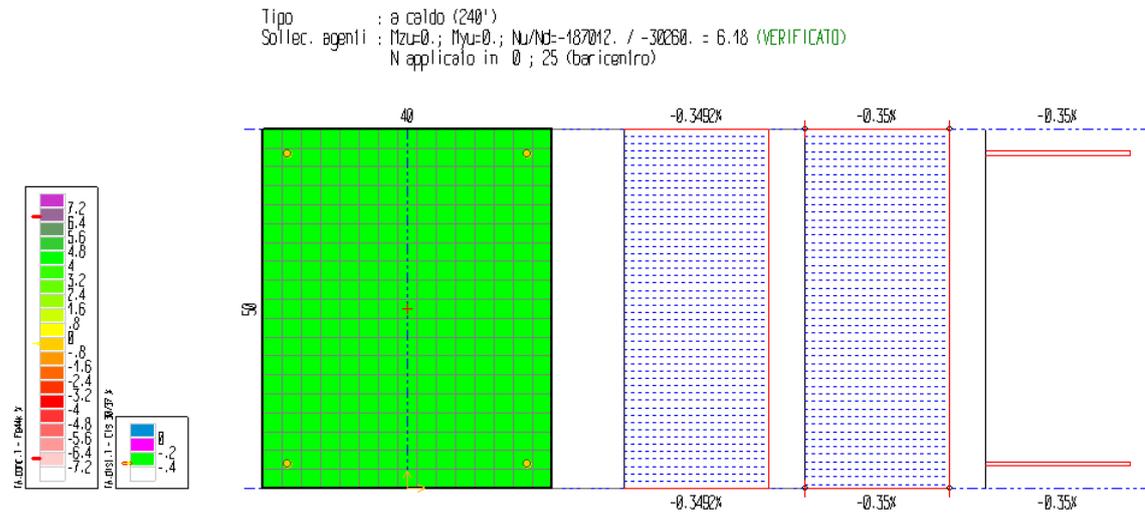


Fig.34 §5. – Verifica a compressione, a caldo

$$N_{ult}/N_d = 6,18$$

**Verifiche a compressione soddisfatte.**

### 5.7.5 Trave sezione T - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 159,04$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

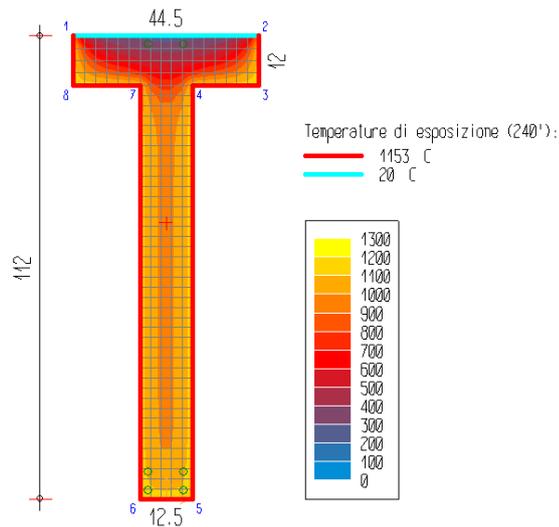


Fig.35 §5. – Analisi termica a 240 minuti

Tipo : a freddo.  
 Sollec. agenti :  $M_z/M_{zd} = 4205029 / 1590400 = 2.64$ ;  $M_y = 0$ ;  $N_u = 0$ . (VERIFICATO)  
 N applicato in 0 ; 66.76 (baricentro)

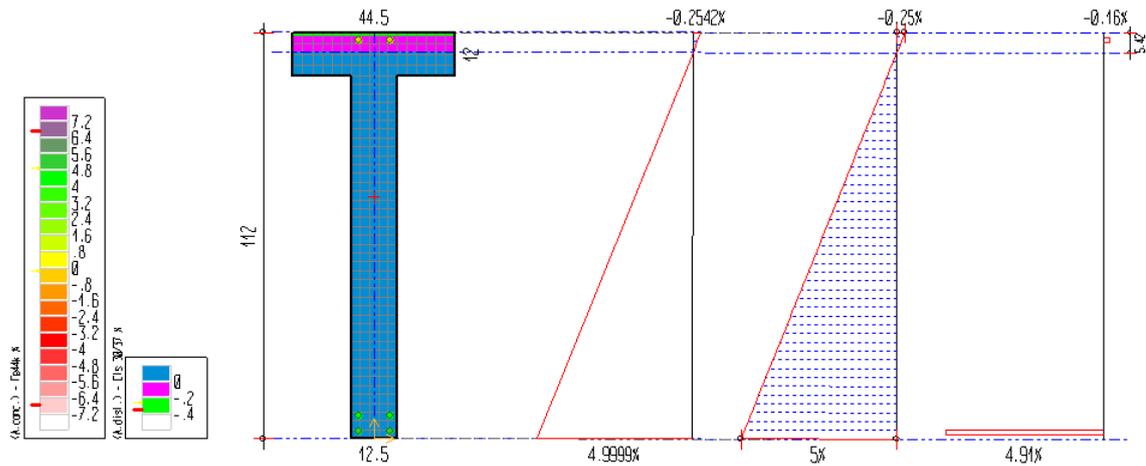


Fig.36 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 2,64$$

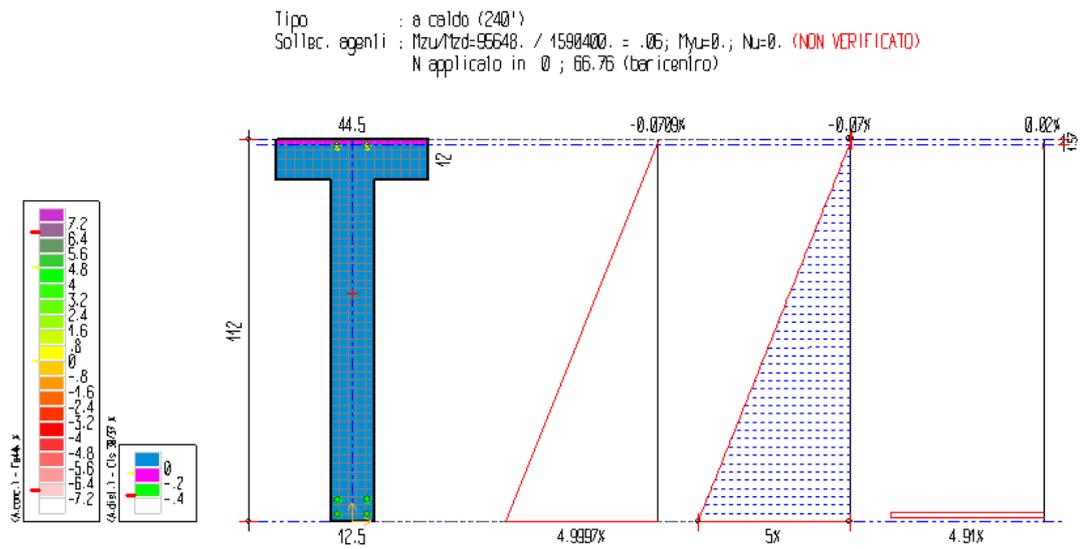


Fig.37 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 0,06$$

**Verifiche a flessione non soddisfatte.**

### 5.7.6 Trave sezione T - REI 30

**Tempo di esposizione:** 30 minuti;

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 159,04$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

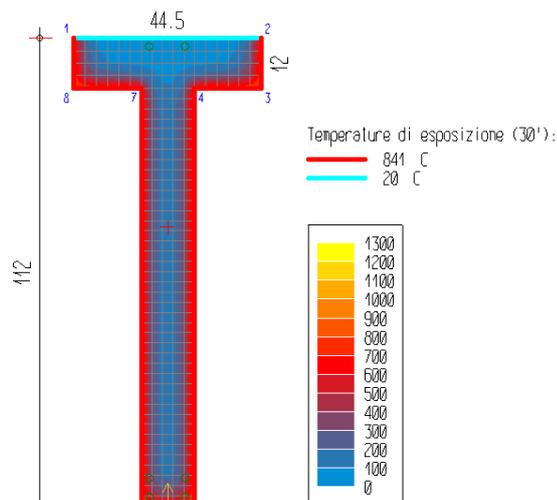


Fig.38 §5. – Analisi termica a 30 minuti

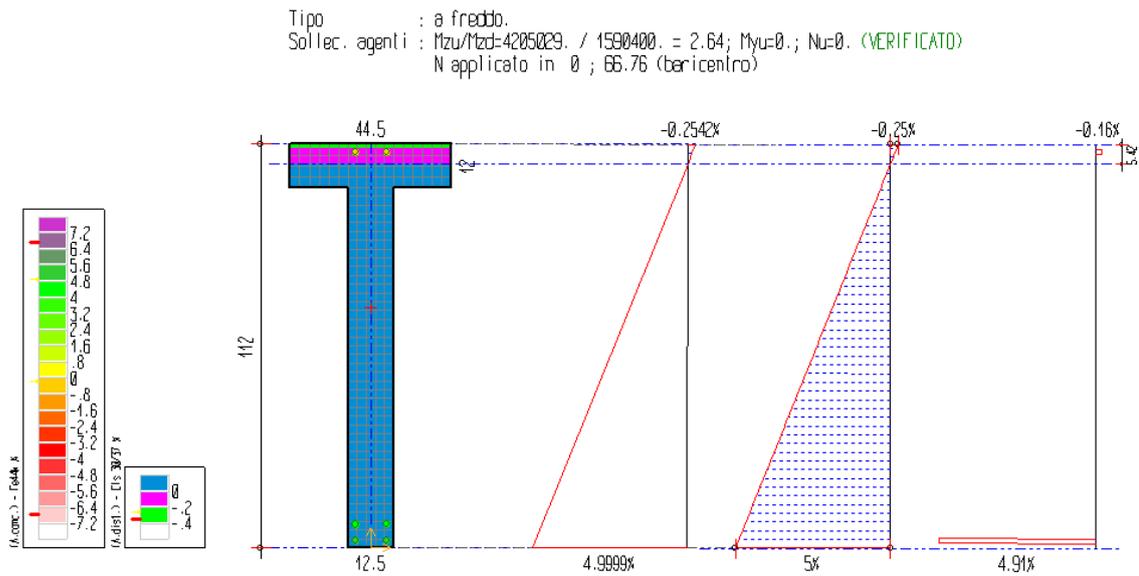


Fig.39 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 2,64}$$

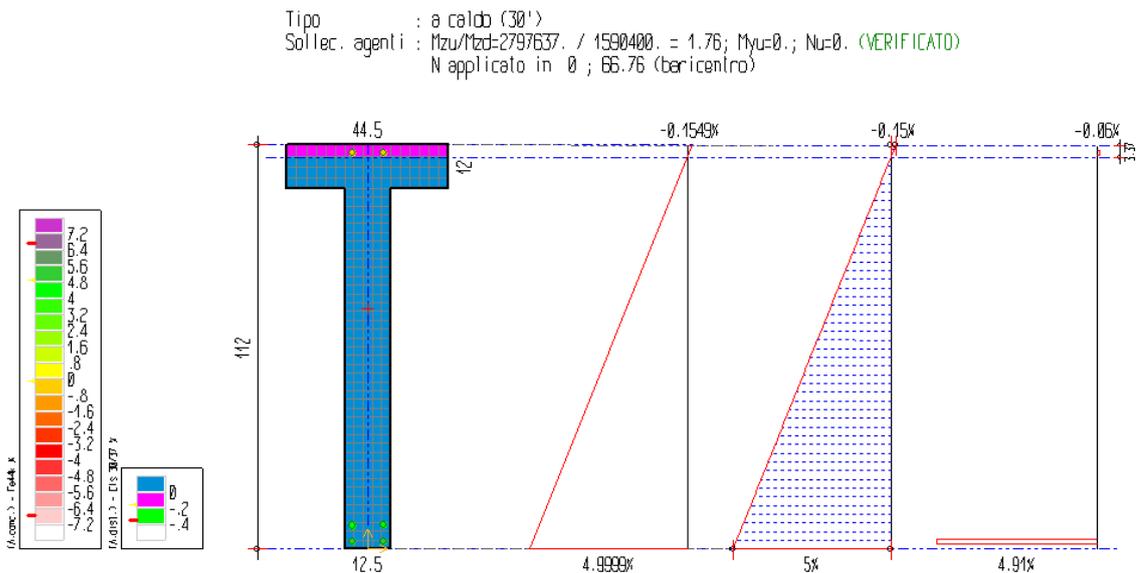


Fig.40 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 1,76}$$

**Verifiche a flessione soddisfatte.**

5.7.7 Trave sezione I - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 380,19$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

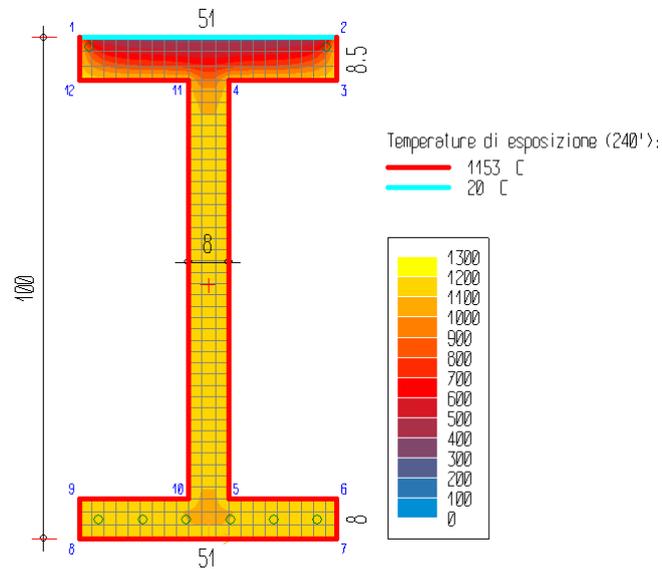


Fig.41 §5. – Analisi termica a 240 minuti

Tipo : a freddo.  
 Sollec. agenti :  $M_{z_d}/M_{z_d} = 5442194. / 3801920. = 1.43$ ;  $M_{y_d} = 0.$ ;  $N_d = 0.$  (VERIFICATO)  
 $N$  applicato in 0; 50.59 (baricentro)

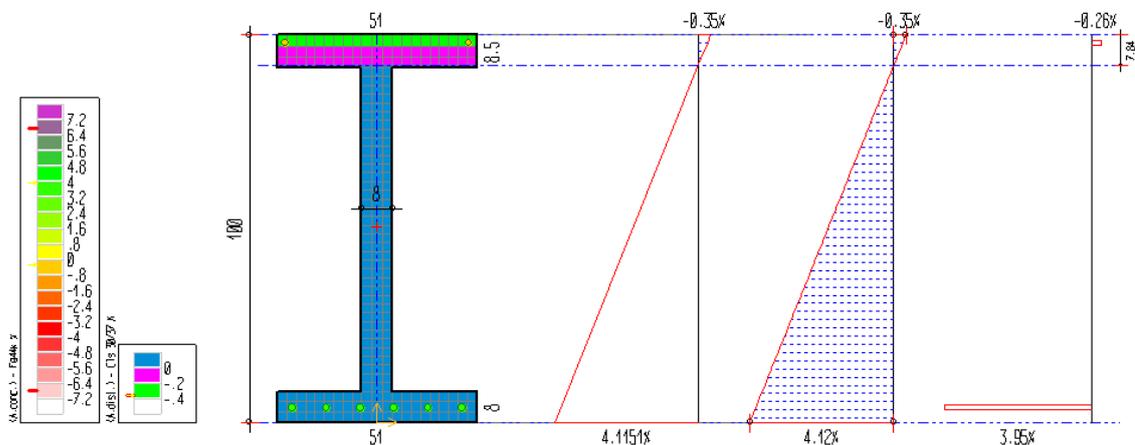


Fig.42 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 1,43}$$

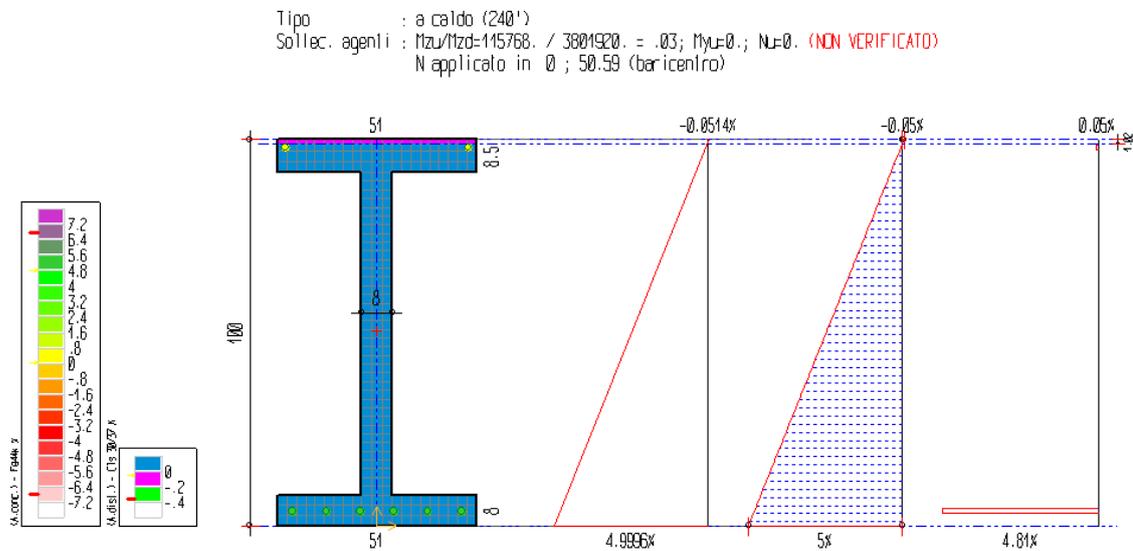


Fig.43 §5. – Verifica a compressione, a caldo

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 0,03}$$

**Verifiche a flessione non soddisfatte.**

5.7.8 Trave sezione I - REI 30

**Tempo di esposizione:** 30 minuti;

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 380,19$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

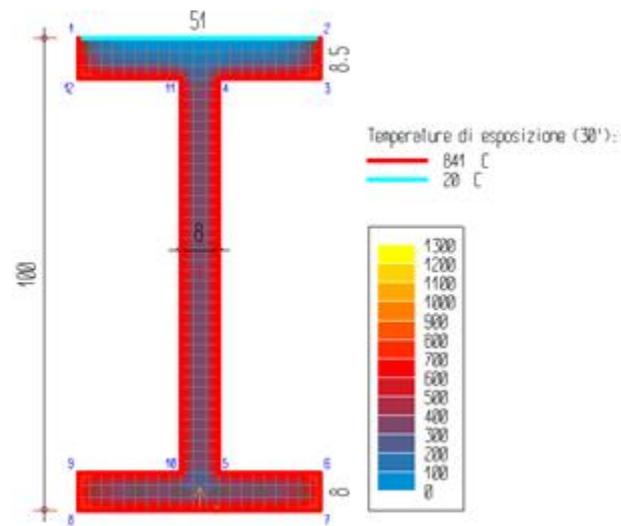


Fig.44 §5. – Analisi termica a 30 minuti

Tipo : a freddo.  
 Sollec. agenti :  $M_z/M_{zd} = 5442194. / 3801920. = 1.43$ ;  $M_y = 0.$ ;  $N_u = 0.$  (VERIFICATO)  
 N applicato in 0 ; 50.59 (baricentro)

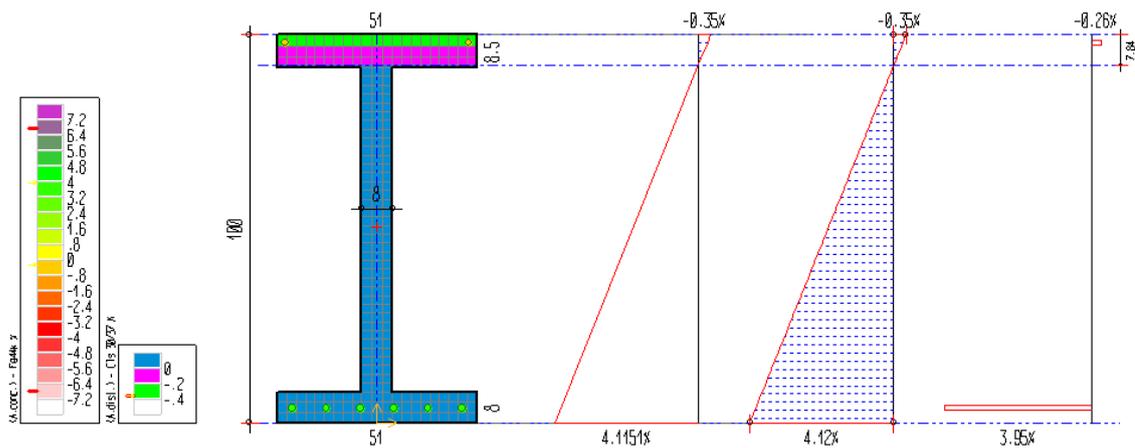


Fig.45 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 1,43}$$

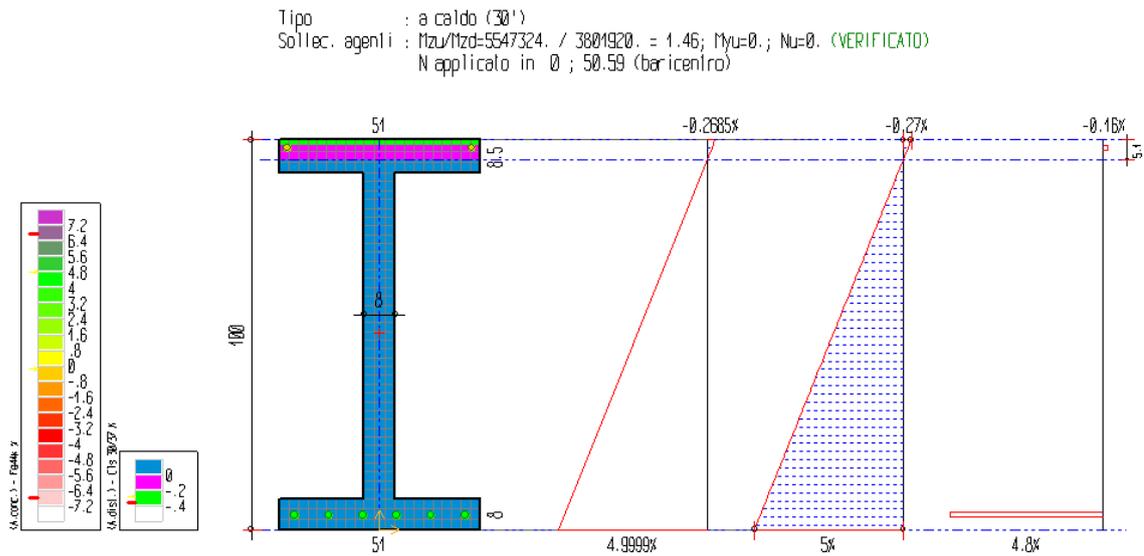


Fig.46 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 1,46$

Verifiche a flessione soddisfatte.

5.7.9 Tegolo H=25 cm - REI 240

Tempo di esposizione: 240 minuti;

Esposizione: solo 1 lato, flusso dal basso;

Curva temperatura tempo: UNI 834;

Sestetto di sollecitazioni agenti:  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 5,30$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

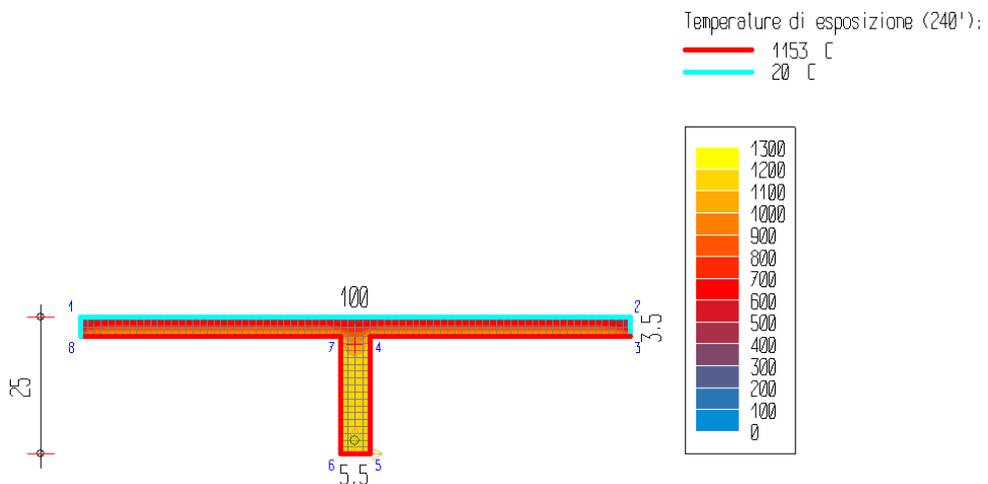


Fig.47 §5. – Analisi termica a 240 minuti

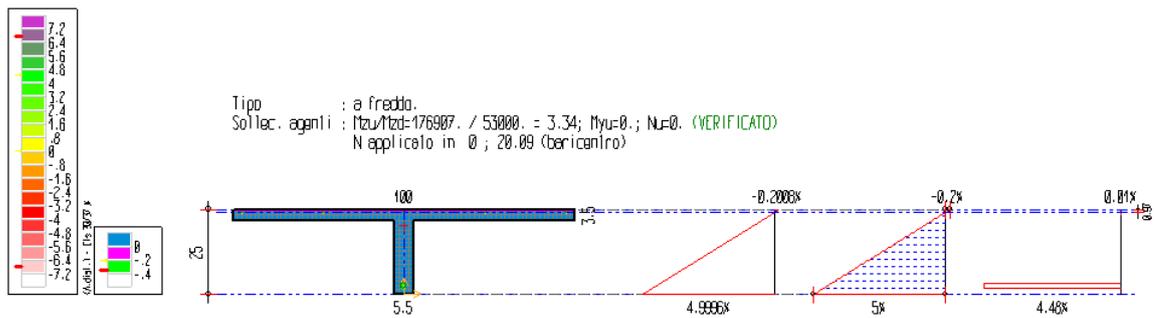


Fig.48 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 3,34}$$

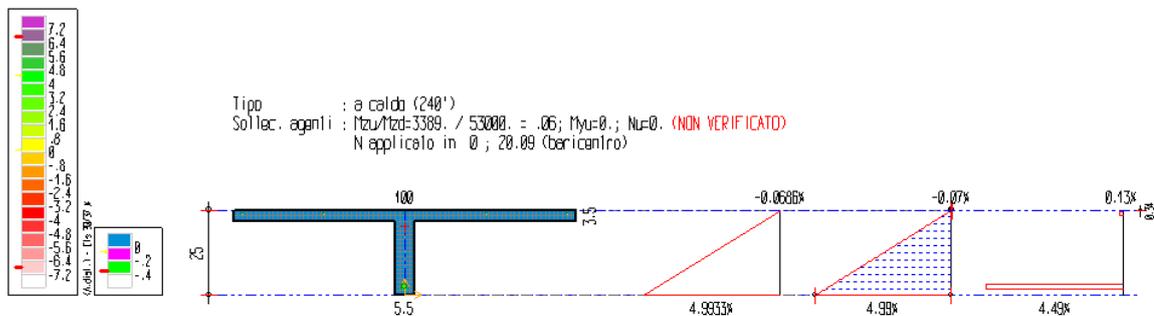


Fig.49 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$$\underline{M_{z_{ult}} / M_{z_d} = 0,06}$$

**Verifiche a flessione non soddisfatte.**

5.7.10 Tegolo H=25 cm - REI 30

**Tempo di esposizione:** 30 minuti;

**Esposizione:** solo 1 lato, flusso dal basso;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 5,30$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m.

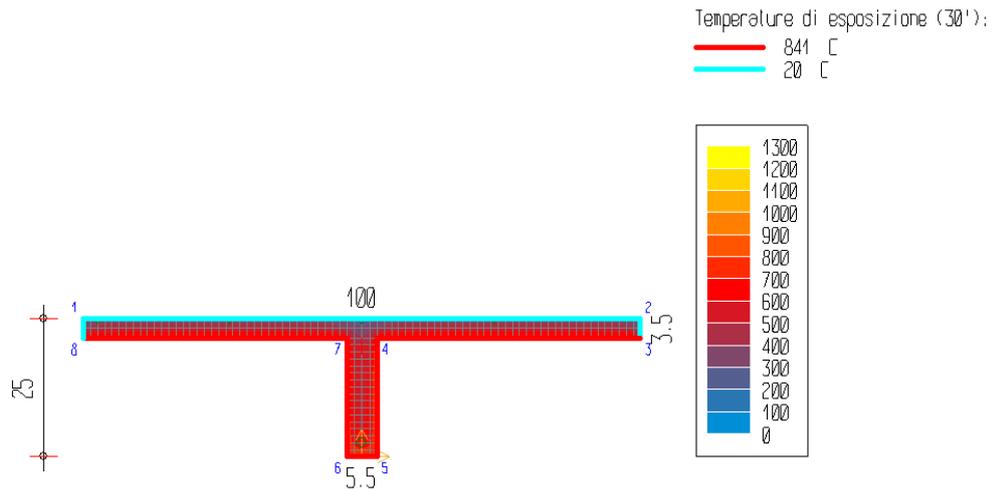


Fig.50 §5. – Analisi termica a 30 minuti

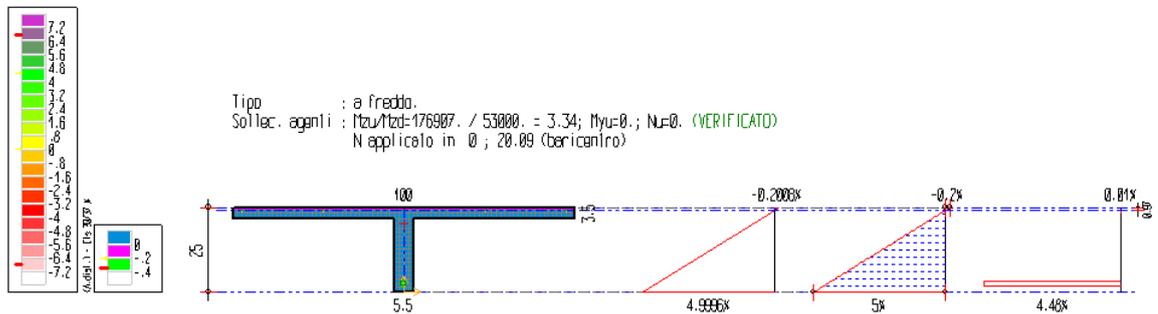


Fig.51 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 3,34$$

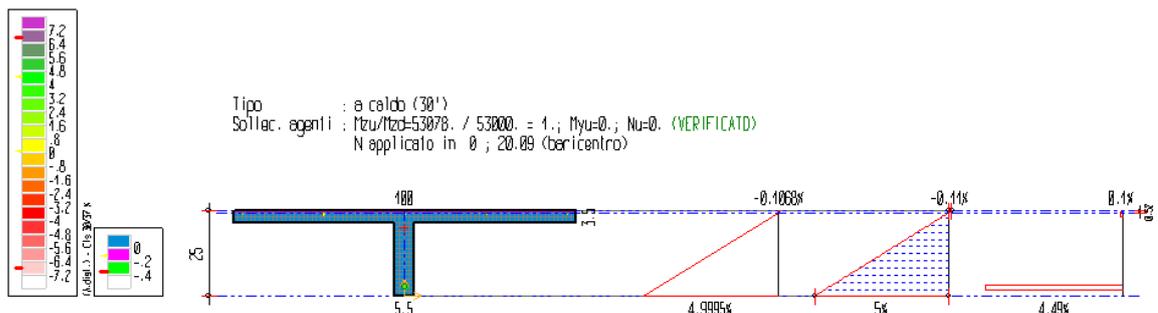


Fig.52 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$$\underline{Mz_{ult} / Mz_d = 1,00}$$

**Verifiche a flessione soddisfatte.**

5.7.11 Tegolo H=40 cm - REI 240

**Tempo di esposizione:** 240 minuti;

**Esposizione:** solo 1 lato, flusso dal basso;

**Curva temperatura tempo:** UNI 834;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $Mz_d = 20,96$  kN m;  $My_d = 0$  kN m.

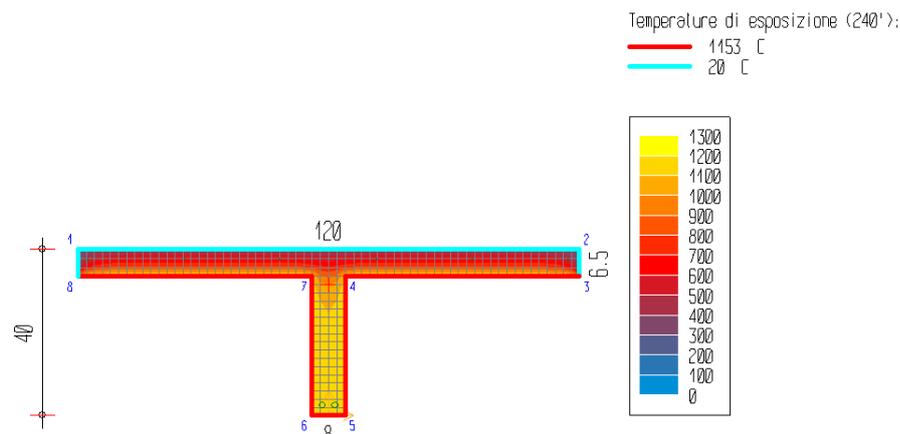


Fig.53 §5. – Analisi termica a 240 minuti

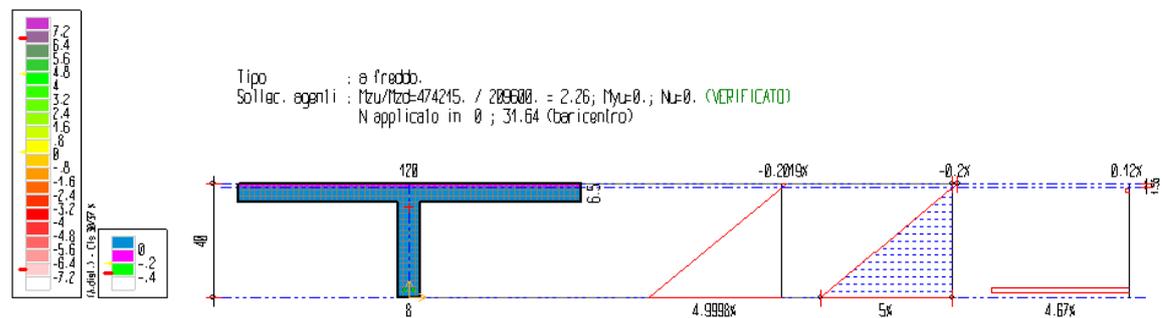


Fig.54 §5. – Verifica a flessione, a freddo

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $Mz$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\underline{Mz_{ult} / Mz_d = 2,26}$$

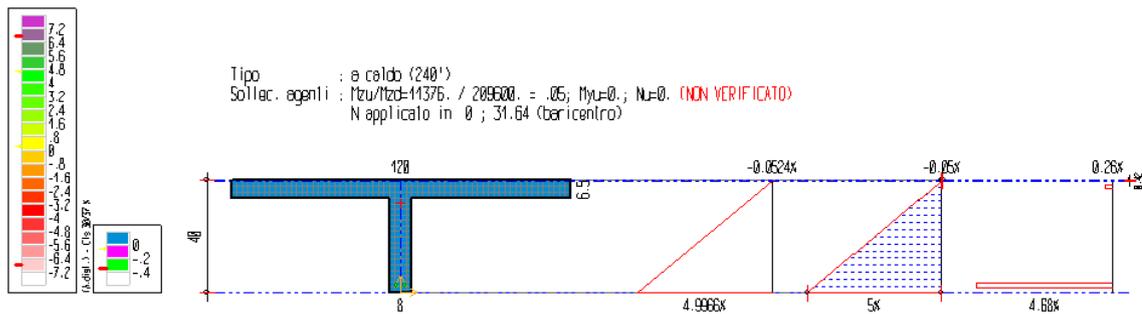


Fig.55 §5. – Verifica a flessione, a caldo

$$\underline{Mz_{ult} / Mz_d = 0,05}$$

### Verifiche a flessione non soddisfatte.

#### 5.8. Analisi di sensibilità: influenza delle resistenze meccaniche dei materiali

E' evidente come i risultati di un'analisi strutturale, a freddo o a caldo, siano largamente influenzati dalla geometria modellata e dalle variabili di ingresso adottate, quali caratteristiche dei materiali, dimensione delle sezioni, diametri di armatura.

Nel presente paragrafo, si è eseguita **un'analisi della sensibilità dei risultati a variazioni subite dai parametri di ingresso**. Nello specifico, per ciascuna sezione verificata al §5.7, si sono determinate le massime durate di esposizione all'incendio standard (ossia  $R_{max}$ ), variando le resistenze meccaniche dei materiali ( $R_{ck}$  e  $f_{yk}$ ).

Per quanto concerne la variabilità dei parametri di ingresso, si è fatto riferimento a due articoli scientifici (si rimanda a [21] e [22] della Bibliografia), il cui obiettivo è stato la determinazione di **leggi di correlazione tra la resistenza media dei materiali (calcestruzzo ed acciaio d'armatura) e l'anno di costruzione dei manufatti**. Tali risultati derivano da una moltitudine di dati raccolti relativi a strutture situate in specifiche aree geografiche e consentono di stimare in maniera semplificata le caratteristiche di resistenza dei materiali da costruzione, senza eseguire test distruttivi (DT) o non distruttivi (NDT).

Nel seguito si sono esplicitate le leggi di correlazione per calcestruzzo (distribuzione reale) e per l'acciaio d'armatura (Eq.(3) di [22]). I valori non in grassetto, sono stati ricavati per interpolazione lineare.

Anno	Calcestruzzo					Acciaio		
	Rc (perc. 5%)	Rc (perc. 25%)	Rc (perc. 50%)	Rc (perc. 75%)	Rc (perc. 95%)	fy (perc. 5%)	fy (perc. 50%)	fy (perc. 95%)
1935	5,97	11,03	18,33	22,78	39,10	202,75	312,25	441,10
1940	6,67	11,86	18,95	23,56	38,58	221,00	329,00	456,40
1945	7,37	12,68	19,58	24,33	38,07	239,25	345,75	471,70
1950	8,06	13,51	20,20	25,11	37,55	257,50	362,50	487,00
1955	8,76	14,33	20,82	25,88	37,03	275,75	379,25	502,30
1960	10,15	16,72	24,04	29,96	41,95	294,00	396,00	517,60
1965	11,55	19,11	27,26	34,05	46,87	312,25	412,75	532,90
1970	12,94	21,50	30,48	38,13	51,79	330,50	429,50	548,20
1975	14,33	23,89	33,70	42,21	56,71	348,75	446,25	563,50
1980	16,85	26,14	35,52	43,42	58,68	367,00	463,00	578,80
1985	19,37	28,38	37,33	44,63	60,66	385,25	479,75	594,10
1990	21,89	30,63	39,15	45,84	62,63	403,50	496,50	609,40
1995	24,41	32,88	40,97	47,05	64,61	421,75	513,25	624,70
2000	26,93	35,12	42,78	48,27	66,58	440,00	530,00	640,00
2002	27,94	36,02	43,51	48,75	67,37	447,30	536,70	646,12

Fig.56 §5. – Valori numerici delle leggi di correlazione ricavate da [21] e [22]

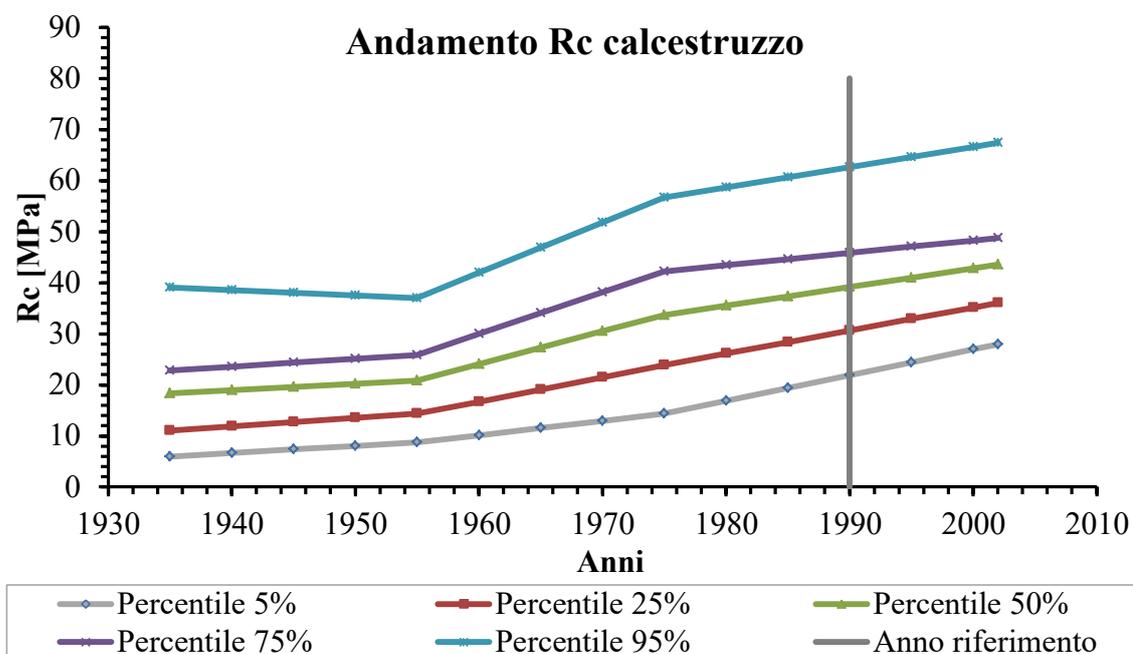


Fig.57 §5. – Andamento della resistenza media del calcestruzzo in funzione del tempo

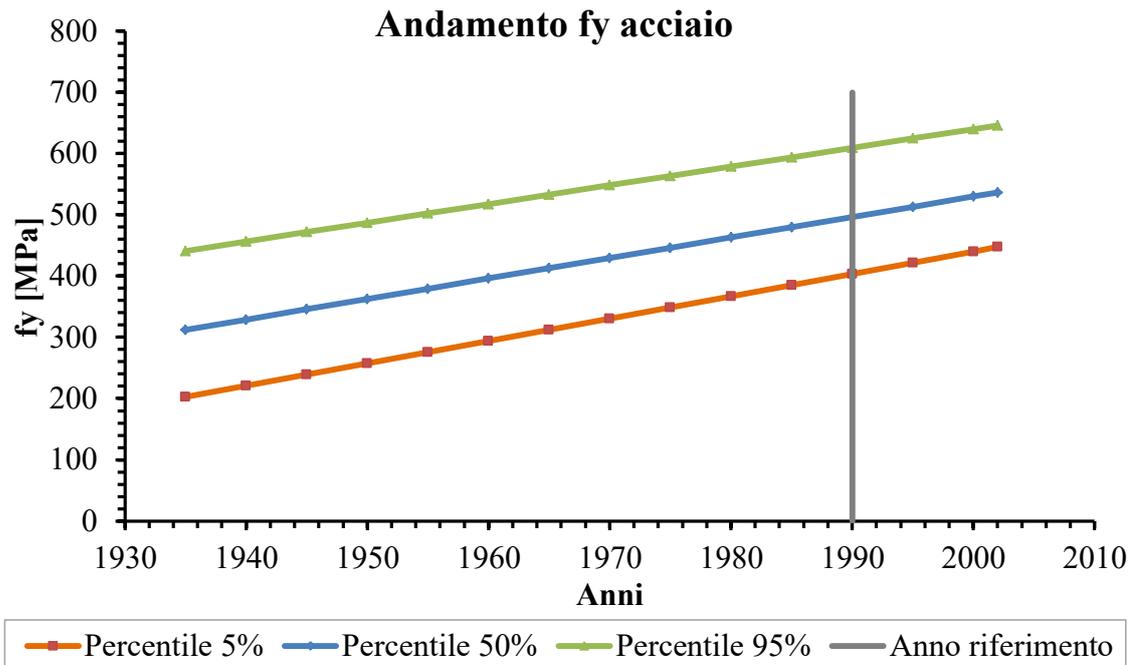


Fig.58 §5. – Andamento della resistenza media dell'acciaio in funzione del tempo

Si è fatto riferimento al 1990, essendo quest'ultimo il presunto anno di costruzione del capannone industriale esaminato. Infine, si precisa che, in via preliminare, è stato necessario ricavare le resistenze caratteristiche dei materiali, a partire da quelle medie. Secondo quanto riportato al paragrafo 11.2.10.1 delle *NTC 2018* [5], per il calcestruzzo:

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{cm} \quad (5.3)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \cdot [MPa] \quad (5.4)$$

Ne consegue, che:

$$R_{ck} = R_{cm} - \frac{8}{0,83} [MPa] \quad (5.5)$$

Dove:

$R_{cm}$  = resistenza media del calcestruzzo, ricavata per ciascun percentile dalla tabella illustrata in Fig. 56;

$R_{ck}$  = resistenza caratteristica del calcestruzzo.

Mentre per quanto concerne l'acciaio d'armatura, non essendo disponibili formule semplificate per realizzare la conversione, si è utilizzata la seguente relazione generale:

$$f_{yk} = f_y - K \cdot s \cdot [MPa] \quad (5.6)$$

Dove:

$f_y$  = resistenza media dell'acciaio, ricavata per ciascun percentile dalla tabella illustrata in Fig. 56;

$f_{yk}$  = resistenza caratteristica dell'acciaio d'armatura;

$K$  ed  $s$  = ricavati ipotizzando una campagna di prove, avente risultati sufficientemente dispersi. E' risultato  $K = 2,318$  ed  $s = 5,770$ .

Infine, si sono ripetute le analisi ipotizzando **diversi valori del Fattore di Confidenza: 1,35, 1,20, 1,00**, rispettivamente relativi ad un **Livello di Conoscenza LC1, LC2, LC3**.

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

*Fig.59 §5. – Livelli di Conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti valori dei Fattori di Confidenza per edifici in calcestruzzo armato, secondo Tabella C8.5.IV della Circolare applicativa n. 7 del 2019*

Come si evince dai paragrafi successivi, **la resistenza dei materiali condiziona in maniera moderata le verifiche di Resistenza al fuoco**. In particolare, è emerso che:

- le verifiche a R30, risultano soddisfatte per ogni elemento anche ipotizzando la peggior combinazione di resistenze meccaniche (5% per acciaio – 5% per calcestruzzo con FC=1,35);
- le verifiche R240 continuano a risultare non soddisfatte, per nessun elemento, pur ipotizzando la miglior combinazione di resistenze meccaniche (95% per acciaio – 95% per calcestruzzo con FC=1);

5.8.1 Trave sezione T

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
<b>FC = 1.35</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>39</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>42</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>48</b>
<b>FC = 1.20</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>41</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>47</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>51</b>
<b>FC = 1.00</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>45</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>50</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>55</b>

Fig.60 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

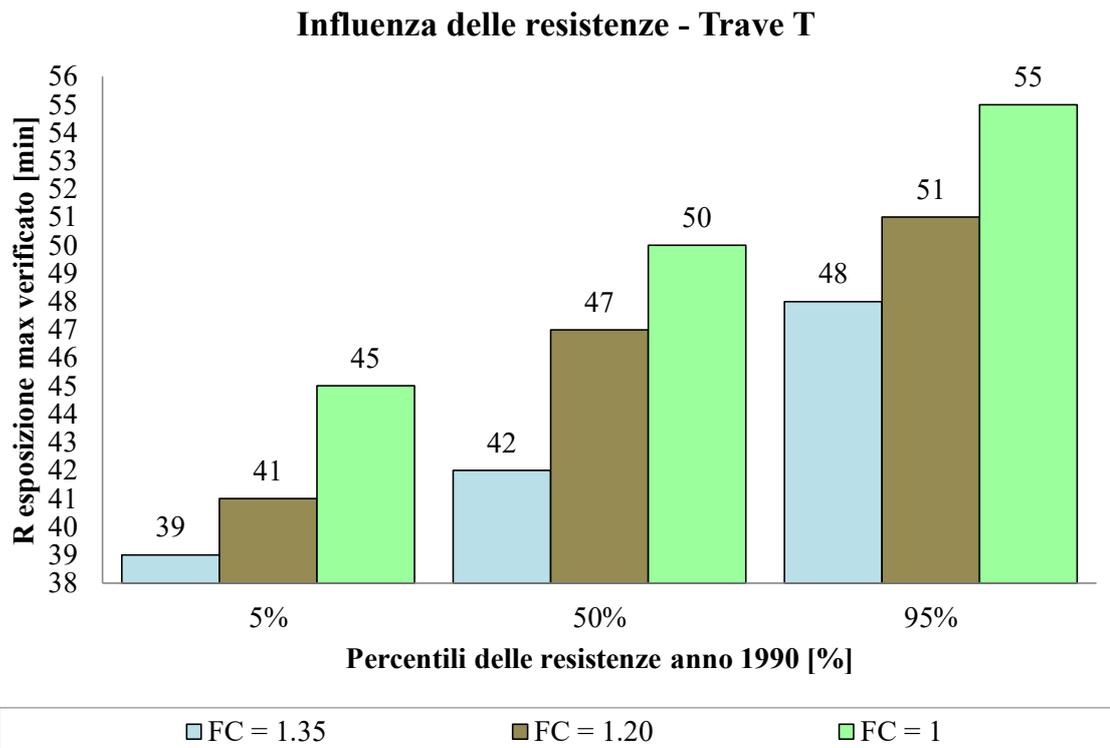


Fig.61 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.8.2 Trave sezione I

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	35
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	41
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	45
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	38
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	43
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	47
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	42
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	46
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	49

Fig.62 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

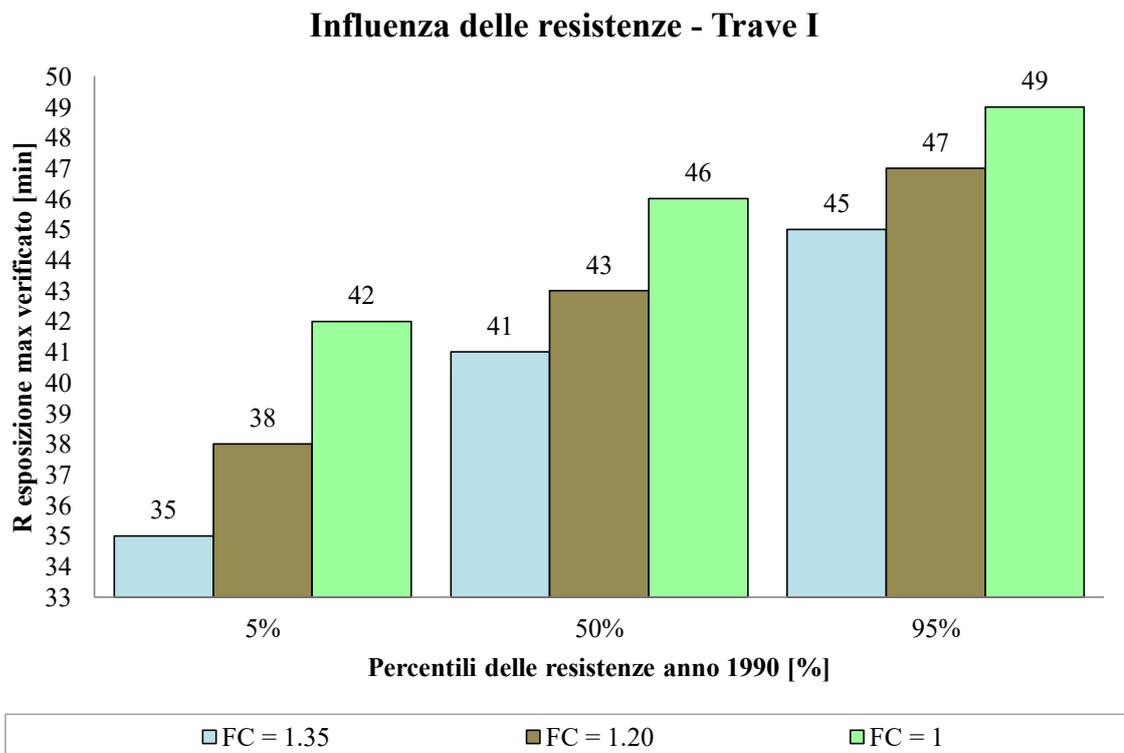


Fig.63 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.8.3 Tegolo H=25 cm

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	29
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	30
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	32
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	30
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	31
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	32
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	31
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	32
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	33

Fig.64 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

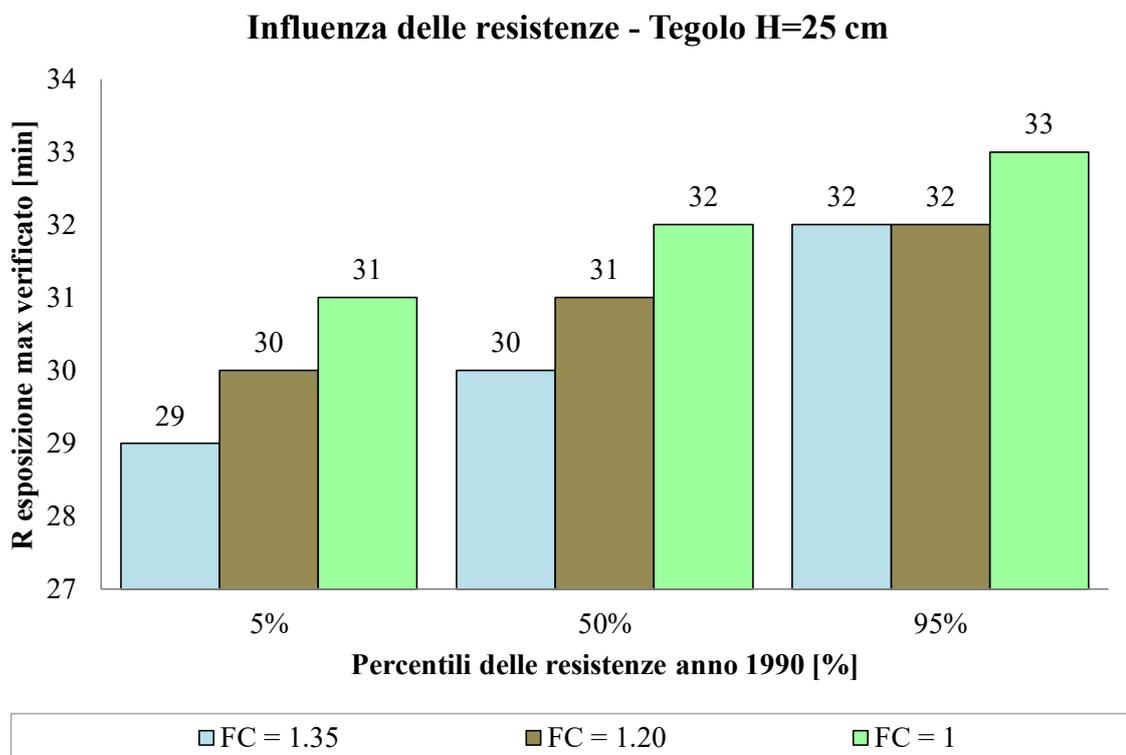


Fig.65 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.8.4 Tegolo H=40 cm

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [Mpa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	31
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	33
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	36
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	32
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	35
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	37
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	34
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	37
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	39

Fig.66 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

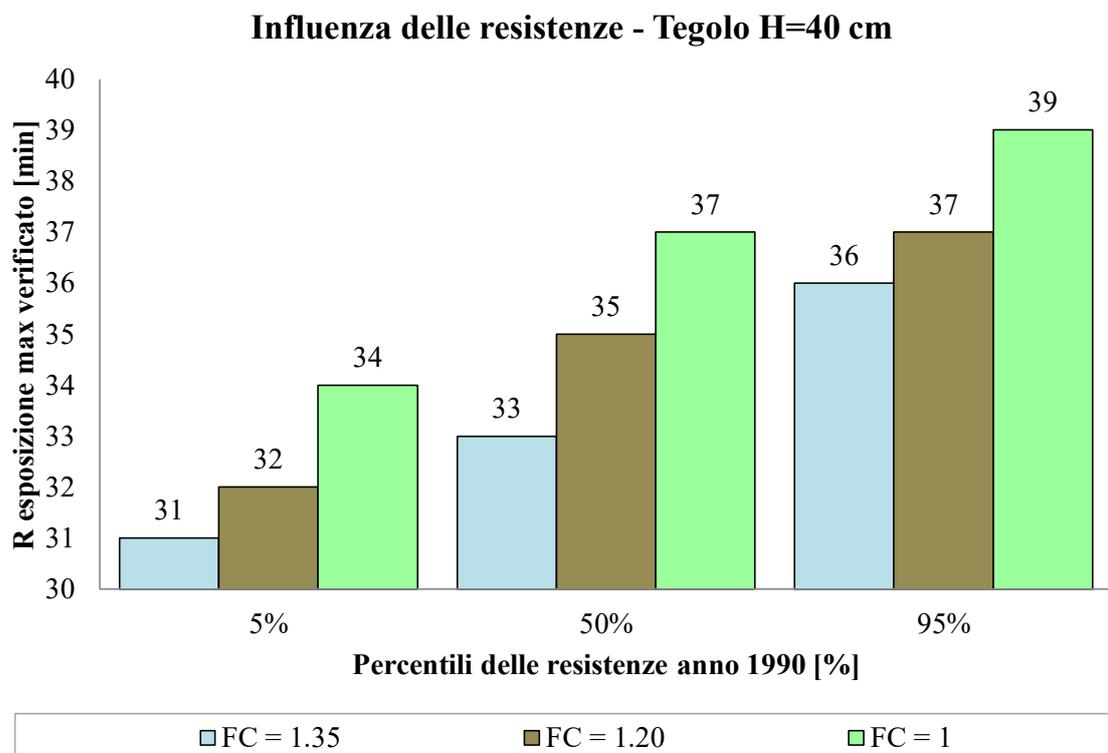


Fig.67 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.8.5 Pilastro sezione I

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [Mpa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	189
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	>240
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	>240
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240

Fig.68 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

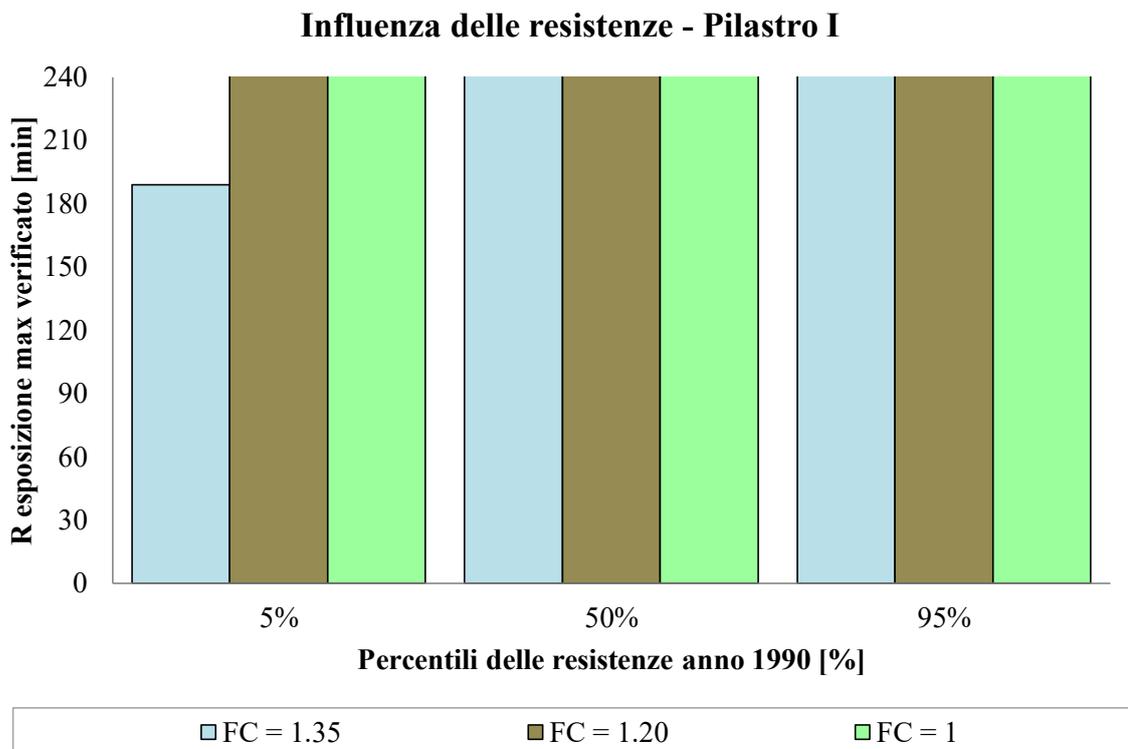


Fig.69 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.8.6 Pilastri rettangolari

Nel seguito, si esplicitano solo i risultati relativi al pilastro rettangolare più sollecitato.

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		R max
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	minuti
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	>240
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	>240
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	>240
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	>240
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	>240

Fig.70 §5. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

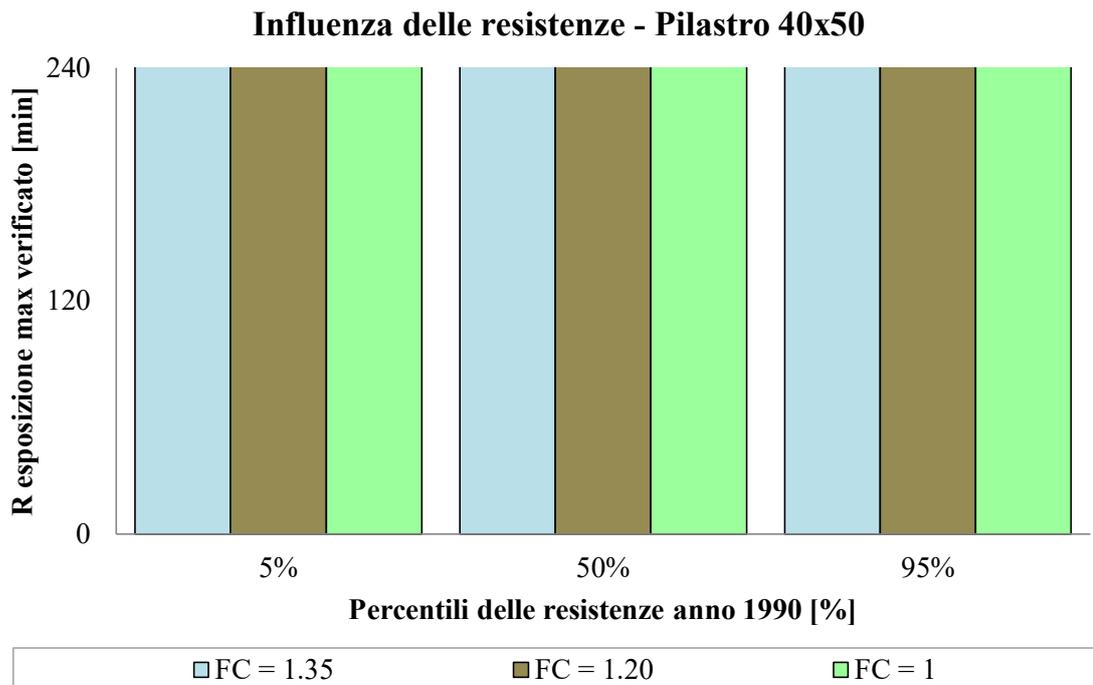


Fig.71 §5. – Diagramma dell'analisi di sensibilità eseguita

5.9. Discussione dei risultati e proposte di intervento

Come si evince dai risultati del §5.7, gli elementi travi e tegoli dei compartimenti *Magazzino 1+2* e *Magazzino 3+4*, non soddisfano le verifiche di resistenza a caldo per la classe minima di resistenza (240 minuti).

Nella tabella sottostante, sono illustrate le possibili soluzioni di intervento, consistenti nella riduzione della classe di resistenza e nell’aggiunta di sistemi di protezione passiva al fuoco (vernice intumescente, intonaco ignifugo e controsoffitti antincendio).

COMPARTIMENTI MAGAZZINO 1+2 e MAGAZZINO 3+4				
	Extra rispetto alle misure minime previste	Nuova Classe di Resistenza	Costo da prevedere	Soddisfacimento verifiche
1	Nessun intervento	240	costo protezione passiva [1]	X
2	Riduzione di qf [2]	120	costo protezione passiva [1]	✓
3	Aggiunta sistema automatico di controllo incendio (es. sprinkler)	120	costo sistema + costo protezione passiva [1]	✓
4	Aggiunta impianto di smaltimento fumi e calore (SEFC)	180	costo SEFC + costo protezione passiva [1]	✓
5	Operatività antincendio liv. IV + moderata riduzione di qf [3]	120	costo protezione passiva [1]	✓

[1]=vernice intumescente o intonaco ignifugo o controsoffitto

[2]=da 3000 a 2200 MJ/m<sup>2</sup> per compartimento magazzino 1+2; da 3576 a 2640 MJ/m<sup>2</sup> per compartimento magazzino 3+4

[3]=da 3000 a 2700 MJ/m<sup>2</sup> per compartimento magazzino 1+2; da 3576 a 3270 MJ/m<sup>2</sup> per compartimento magazzino 3+4

Fig.72 §5. – Elenco delle proposte di intervento

Dall’analisi delle cinque proposte di intervento è scaturito che:

- **Proposta 1:** è da escludersi, in quando non sono disponibili sul mercato sistemi di protezione passiva in grado di risolvere le verifiche strutturali al fuoco, nell’ambito delle peculiarità del caso studio. Le analisi eseguite sugli elementi travi e tegoli con vernici intumescenti o intonaci ignifughi, hanno sempre portato ad esiti negativi, anche utilizzando i massimi spessori di protettivi;

- **Proposta 2:** sebbene la riduzione del carico di incendio specifico  $q_f$  riduca notevolmente la classe di resistenza e comporti un soddisfacimento delle verifiche con l'ausilio di sistemi di protezione passiva, si esclude tale proposta, in quanto ritenuta troppo limitante per le esigenze di stoccaggio della Committenza;
- **Proposta 3 e 4:** le verifiche risultano soddisfatte, a fronte tuttavia di un costo ritenuto eccessivo. Oltre alla spesa del sistema di protezione passiva, è da prevedersi infatti anche quella per i sistemi/impianti;
- **Proposta 5:** è risultata la migliore fra tutte, in termini economici e di rispetto delle esigenze di stoccaggio.

Nel paragrafo che segue, si è condotto l'adeguamento al fuoco degli elementi non verificati al §5.7, mediante alcuni sistemi di protezione passiva comunemente presenti sul mercato. Tutti distribuiti dalla ditta Promat. La nuova classe di resistenza, nel rispetto del quale soddisfare le verifiche è: **REI 120**.

#### 5.10. Sistemi di protezione passiva al fuoco

Gli elementi che non possiedono una sufficiente resistenza intrinseca al fuoco, possono essere protetti con prodotti capaci di limitarne il danneggiamento e rallentarne il riscaldamento, quando sottoposti ad elevate temperature. Secondo la definizione proposta dall'ETAG 018-1 si tratta di “prodotti capaci di incrementare la resistenza al fuoco o di fornire protezione antincendio agli elementi costruttivi (travi, colonne, partizioni) o ai servizi (canalizzazioni, estrattori, ecc.). Sono inclusi i rivestimenti intumescenti, i prodotti spruzzati ed altri rivestimenti reattivi o passivi.”

Tutti i prodotti devono essere classificati e valutati da laboratori autorizzati e in accordo con le norme EN 13501-x. Inoltre, è richiesto che rispondano alle normative di collaudo Europee della serie EN 13381-x (nel caso di protettivi per il calcestruzzo si tratta della EN 13381-3).

Per risultare efficaci, i protettivi vanno correttamente dimensionati. A questo proposito, i rapporti di classificazione associano a ciascuno di essi uno **spessore equivalente di calcestruzzo**, cioè tale da garantire lo stesso isolamento termico dello strato protettivo. Tale spessore può essere usato nelle verifiche strutturali secondo gli Eurocodici, semplificando notevolmente il calcolo. In alternativa, il risultato delle prove è presentato sotto forma di **tabella degli spessori** o **fattore di equivalenza**, con significato del tutto simile allo spessore equivalente.

A titolo esemplificativo, si riporta la tabella degli spessori equivalenti di calcestruzzo relativa all'intonaco ignifugo del tipo Promaspray P300:

PROMASPRAY®P300					
Tipo di struttura	spessore di protettivo (mm)	Spessore equivalente di calcestruzzo (mm)			
		R 30	R 60	R 90	R 120
soletta	10	33	40	41	40
	50	>85	>85	>85	>85
trave	9	10	27	25	--
	29	20	50	62	70
	49	24	74	80	87

Fig.73 §5. – Esempio di tabella con spessori equivalenti di calcestruzzo

Infine, si specifica che affinché i risultati delle prove e le relative valutazioni, abbiano validità, devono essere rispettati tutti i requisiti e le limitazioni imposte. Nel seguito si citano le più rilevanti:

- i risultati sono validi solo per gli spessori di protettivo oggetto di prova, compresi tra un minimo e un massimo;
- i risultati relativi ad elementi bidirezionali non possono essere applicati ad elementi monodirezionali e viceversa;
- il protettivo deve essere applicato con modalità identiche a quelle adottate durante la prova;
- la quantità e le caratteristiche delle cavità non possono essere inferiori rispetto alla prova eseguita;
- la tipologia di materiali presenti nell'intercapedine deve essere ugualmente analoga;

#### 5.10.1 Protettivi reattivi: pitture intumescenti

Si tratta di prodotti in grado di mutare il loro stato fisico durante il riscaldamento e di proteggere le strutture su cui sono applicati grazie alle peculiarità del nuovo stato variato. Tra questi i più comuni sono le pitture intumescenti.

Nel caso in esame, si è optato per una vernice denominata “Promapaint-W” (Promat). Da scheda tecnica del prodotto: “pittura intumescente monocomponente in emulsione acquosa a base di resine sintetiche per la protezione al fuoco di elementi posti all'interno di calcestruzzo e legno”. Lo spessore equivalente di calcestruzzo si è desunto dalla tabella ricavata dai rapporti di prova n° 99-U-487 e n° 00-U-330.

Struttura	Spessore di film secco protettivo [μm]	Temperatura massima d'interfaccia [°C]		Spessori equivalenti di calcestruzzo [mm]		
		Emulsione	Olio	1 h	1 ½ h	2 h
Soletta piana	440	608	553	40	45	45
Lati di trave	230	860	809	19	19	-
Fondo di trave	230	745	768	17	17	-
Lati di trave	650	860	809	53	53	53
Fondo di trave	650	860	809	48	48	48

Fig.74 §5. – Tabella con spessori equivalenti di calcestruzzo Promapaint-W

Nel seguito si riporta il dettaglio delle sezioni trattate con il prodotto e le relative verifiche a caldo. Su tutti i lati esposti al fuoco, è stato applicato un film secco di protettivo di spessore 650 μm.

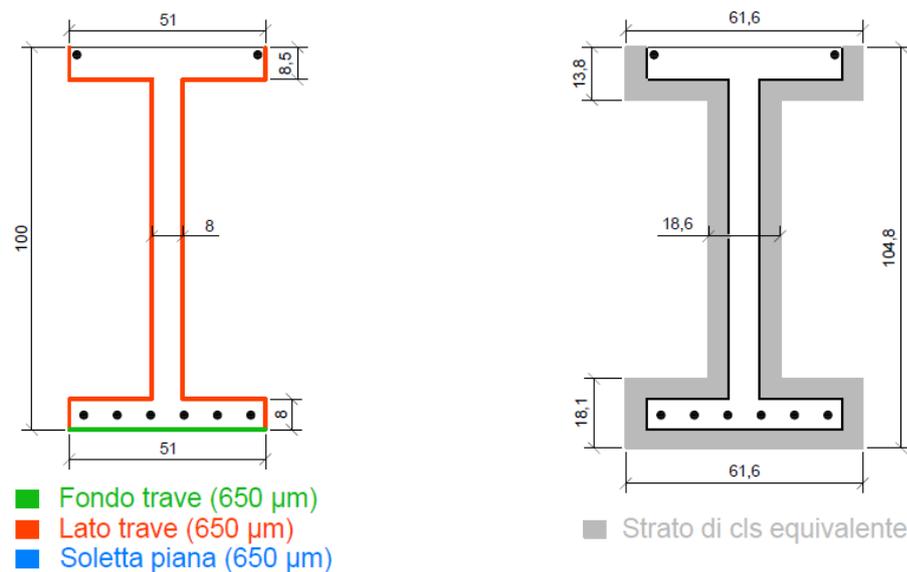


Fig.75 §5. – Trave ad “I” con vernice intumescente. Scala 1:20, misure in cm

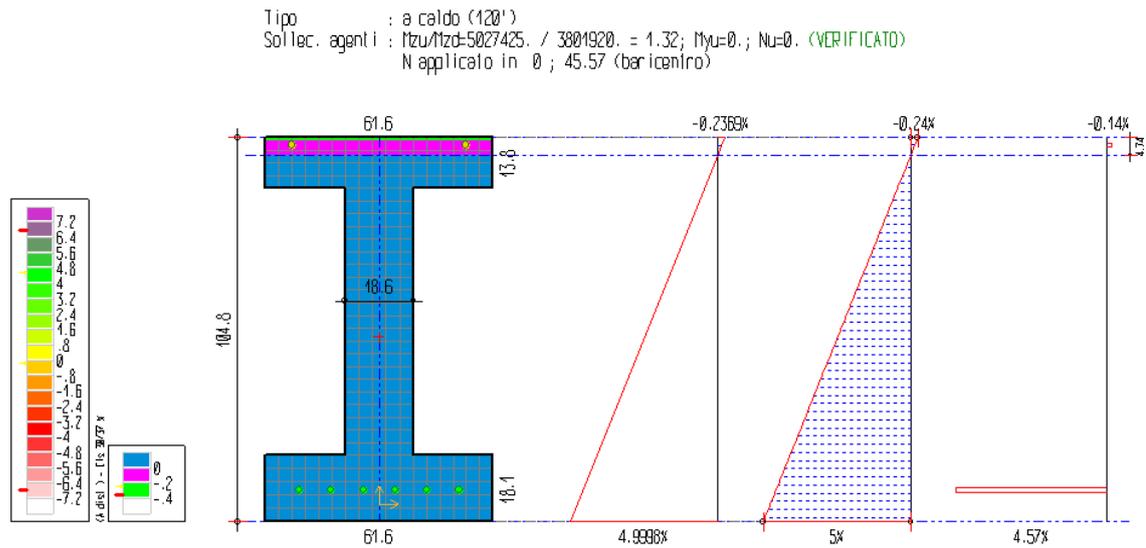


Fig.76 §5. – Verifica a flessione trave ad “I”, a caldo (120 minuti)

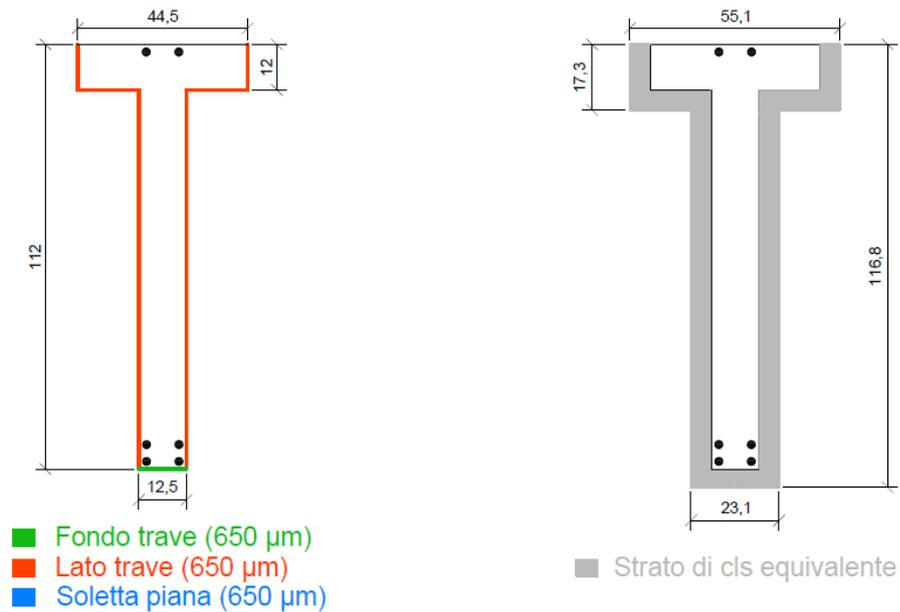


Fig.77 §5. – Trave a “T” con vernice intumescente. Scala 1:20, misure in cm

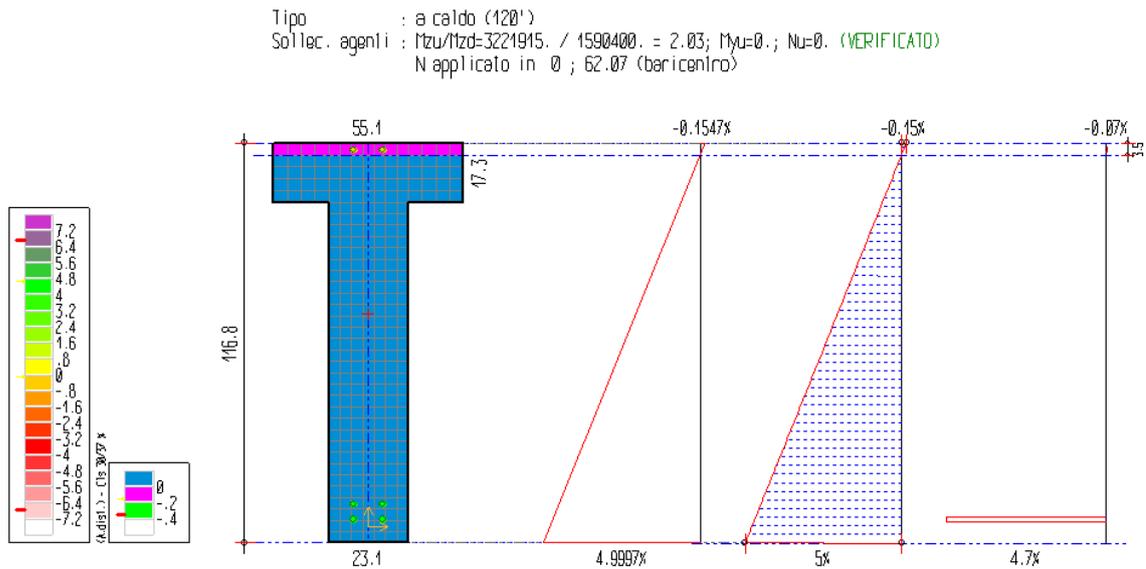


Fig.78 §5. – Verifica a flessione trave a “T”, a caldo (120 minuti)

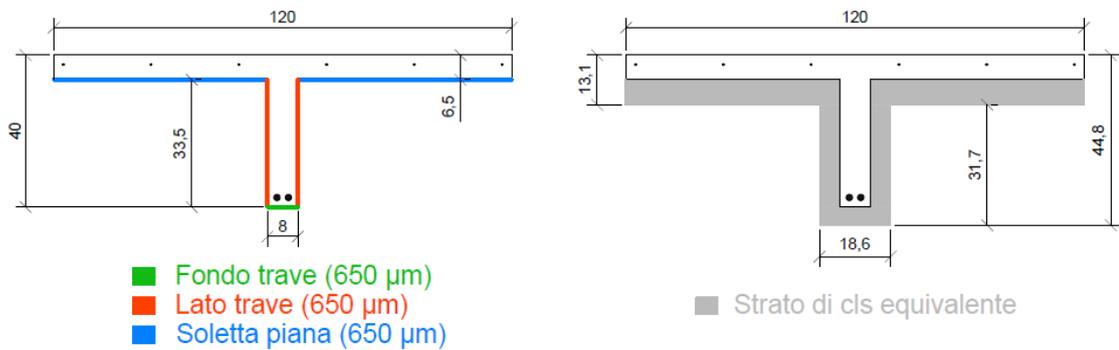


Fig.79 §5. – Tegolo  $H=40$  cm con vernice intumescente. Scala 1:20, misure in cm

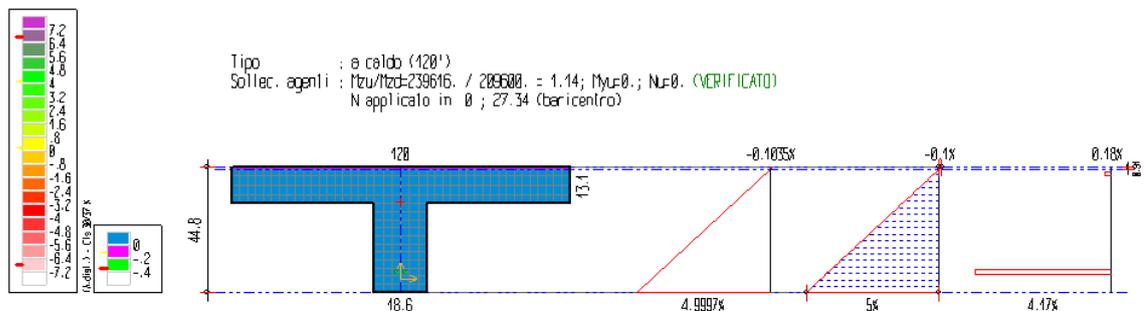


Fig.80 §5. – Verifica a flessione tegolo  $H=40$  cm, a caldo (120 minuti)



Lo spessore equivalente di calcestruzzo si è desunto dalla tabella ricavata dai rapporti di prova n° 11-U-239.

Struttura	Spessore di intonaco Promaspray-P300 [mm]	Spessori equivalenti di calcestruzzo [mm]			
		Durata di esposizione EN 1363-1			
		30 min	60 min	90 min	120 min
Soletta	10	33	40	41	40
	50	>85	>85	>85	>85
Trave	9	10	27	25	-
	29	20	50	62	70
	49	24	74	80	87

Fig.83 §5. – Tabella con spessori equivalenti di calcestruzzo Promaspray-P300

Nel seguito si riporta il dettaglio delle sezioni trattate con il prodotto e le relative verifiche a caldo. Su tutti i lati esposti al fuoco, è stato applicato uno strato di intonaco pari a 29 mm.

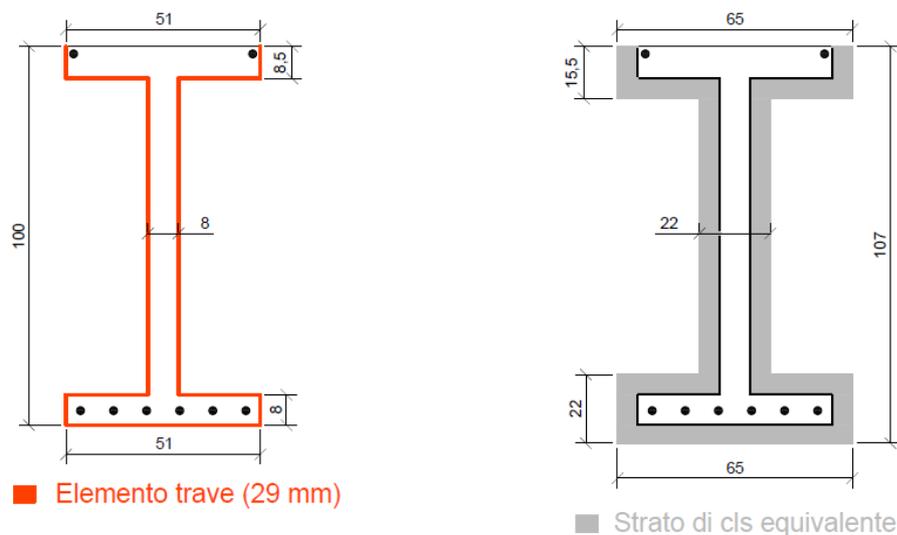


Fig.84 §5. – Trave ad “I” con intonaco ignifugo. Scala 1:20, misure in cm

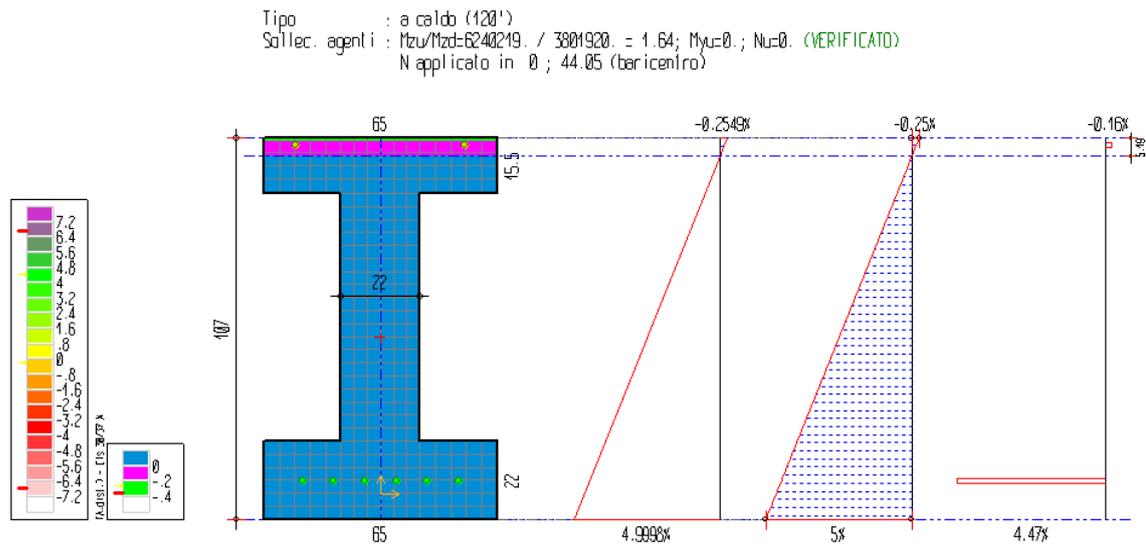


Fig.85 §5. – Verifica a flessione trave a “I”, a caldo (120 minuti)

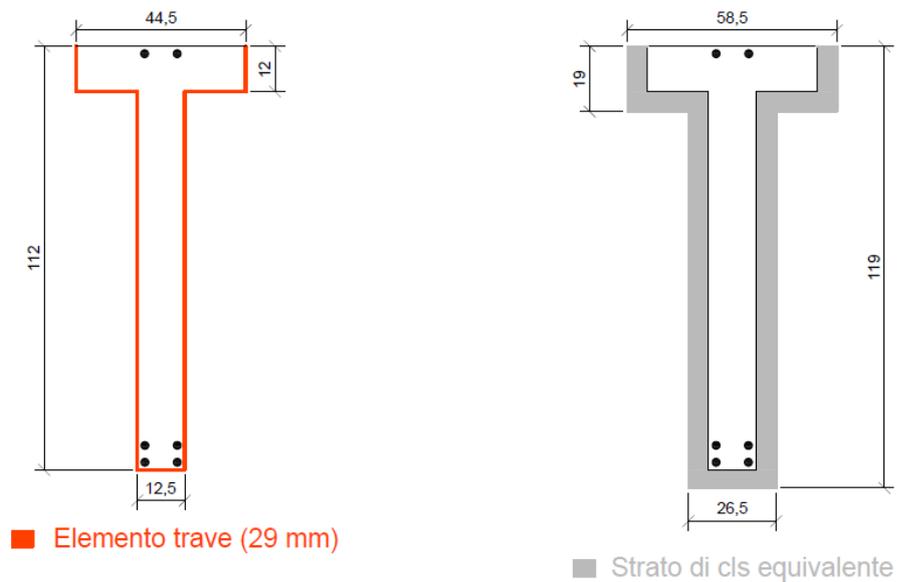


Fig.86 §5. – Trave ad “I” con intonaco ignifugo. Scala 1:20, misure in cm

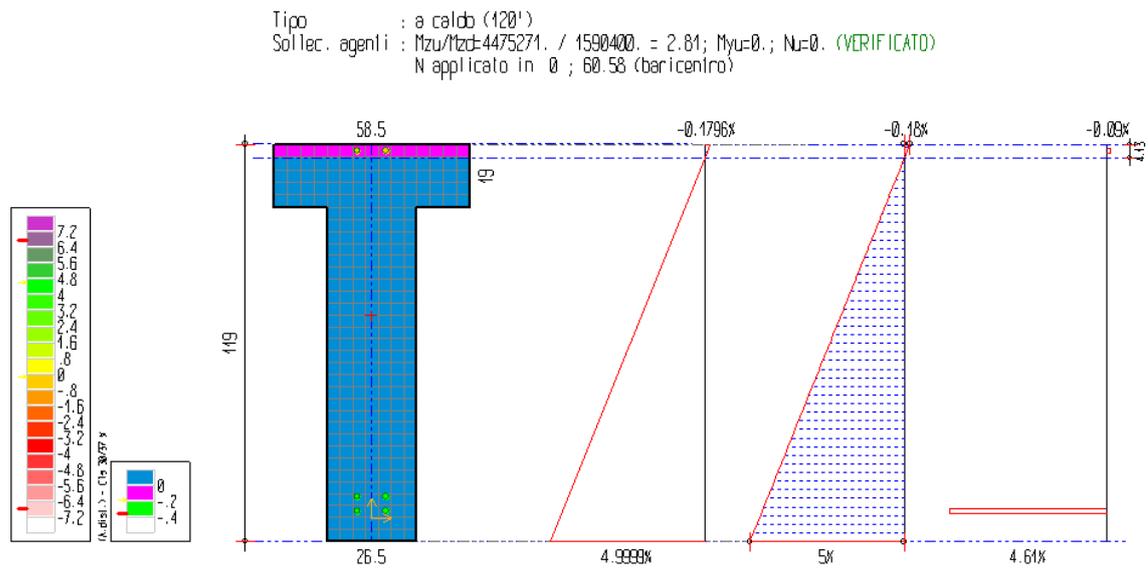


Fig.87 §5. – Verifica a flessione trave a “T”, a caldo (120 minuti)

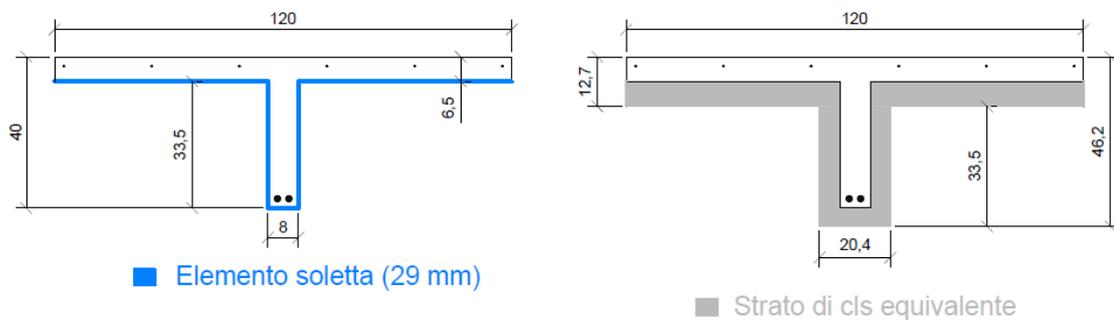


Fig.88 §5. – Tegolo  $H=40$  cm con vernice intumescente. Scala 1:20, misure in cm

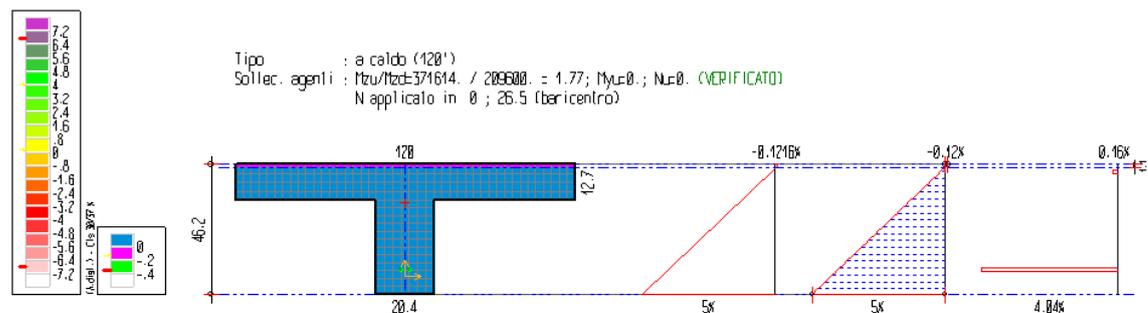


Fig.89 §5. – Verifica a flessione tegolo  $H=40$  cm, a caldo (120 minuti)

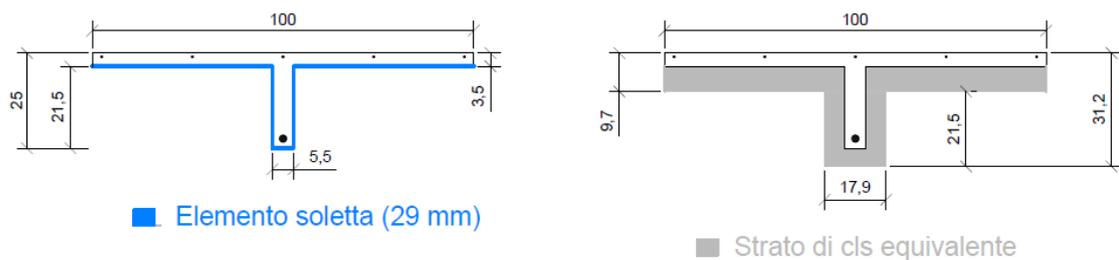


Fig.90 §5. – Tegolo  $H=25$  cm con vernice intumescente. Scala 1:20, misure in cm

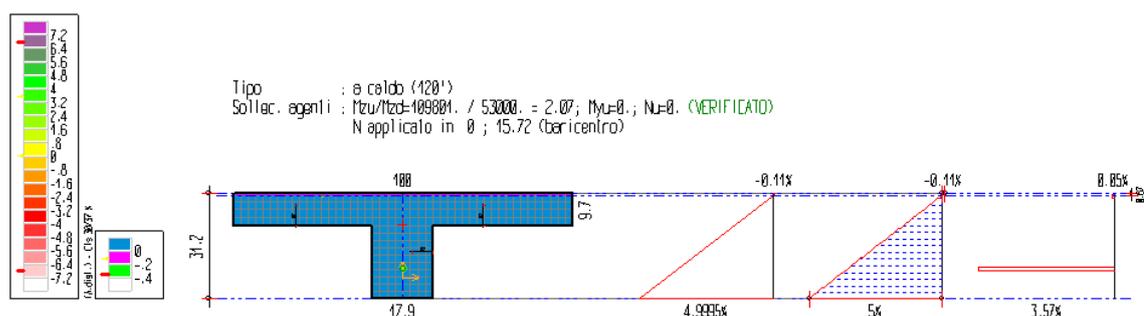


Fig.91 §5. – Verifica a flessione tegolo  $H=25$  cm, a caldo (120 minuti)

Come si evince dai risultati esposti, **tutte le verifiche risultano soddisfatte.**

### 5.10.3 Protettivi in lastre: controsoffitti antincendio

Sono definiti in generale come “prodotti costituiti essenzialmente da fibre minerali, vermiculite, calcio silicato, cemento, gesso o altri materiali, destinati a conservare o aumentare le prestazioni al fuoco degli elementi strutturali o di compartimentazione”. Fanno parte dei rivestimenti protettivi di tipo passivo.

Fra i protettivi in lastre, sono compresi anche i controsoffitti, che dal punto di vista della resistenza al fuoco, possono essere classificati in 3 tipologie, con funzioni distinte:

- **Controsoffitti protettivi strutturali:** sono capaci di incrementare la resistenza al fuoco dell’elemento portante sul quale sono applicati. In tal senso si dicono “collaboranti” ai fini della resistenza al fuoco. Le prove standard, mirano a certificare ciascun controsoffitto, con le sue peculiarità specifiche (dimensioni cavità, tipologia elementi presenti, sistemi di aggancio, cornici perimetrali ecc.) in accoppiamento con il sovrastante solaio strutturale, che dev’essere standardizzato.

Nel caso in esame, è risultato idoneo il **controsoffitto collaborante in lastre Promatech-H (Promat)**. Il sistema è testato su solai a tegoli, prefabbricati e precompressi. Inoltre, risulta compatibile sia con la presenza di impianti nell'intercapedine sia con i relativi attraversamenti. La certificazione è superiore alla classe richiesta: REI 180.

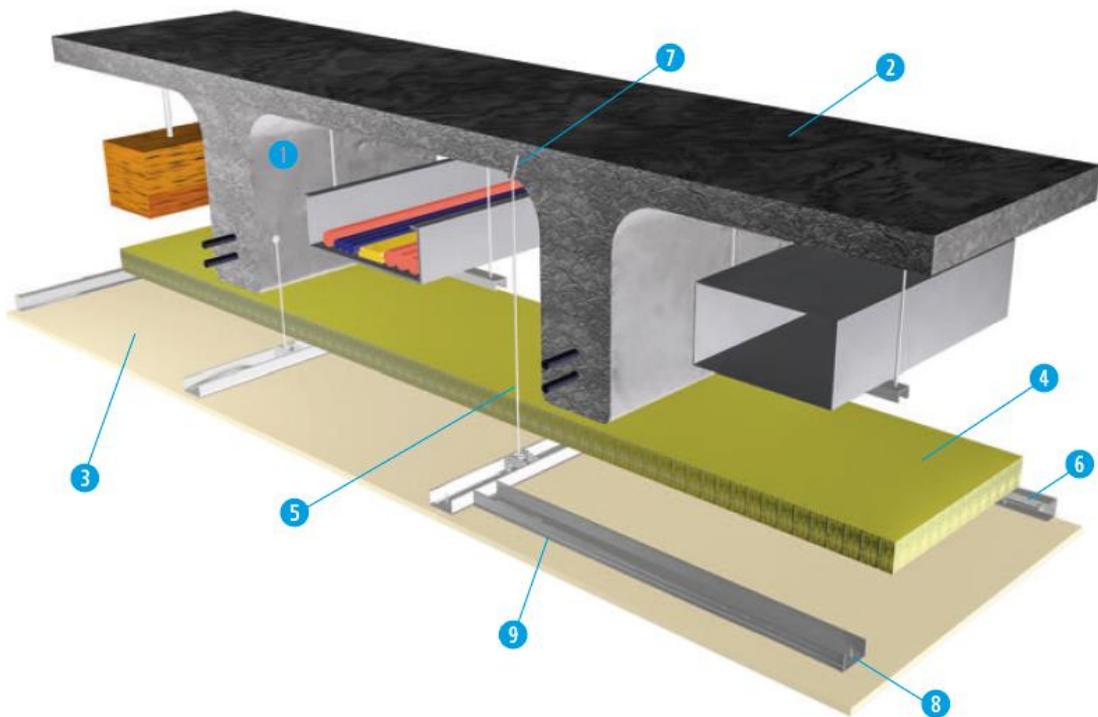


Fig.92 §5. – Spaccato assonometrico controsoffitto collaborante

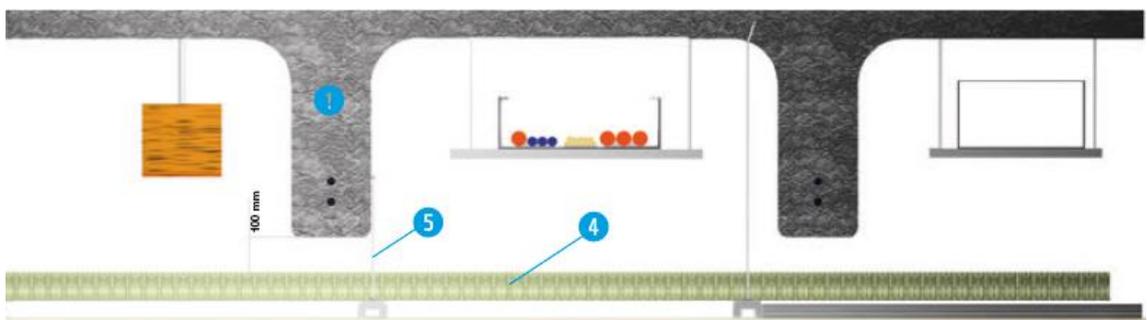


Fig.93 §5. – Sezione verticale controsoffitto collaborante

Legenda tecnica	
❶	<b>Tegolo in cemento armato precompresso</b> a TT
❷	<b>Soletta superiore in calcestruzzo</b> di spessore complessivo 50 mm
❸	<b>Lastra in PROMATECT®H</b> spessore mm 12
❹	<b>Materassino in lana di roccia</b> spessore 50 mm, densità 80 kg/m <sup>3</sup>
❺	<b>Pendinatura metallica</b> diametro 4 mm posta a passo 700 mm
❻	<b>Profilo metallico perimetrale</b> con sezione a C di dimensioni 27x28x04 mm
❼	<b>Tassello metallico ad espansione</b> tipo SBS 9/45
❽	<b>Viti autosvasanti</b> lunghezza 25 mm ad interasse 250 mm
❾	<b>Profilo metallico</b> con sezione a C di dimensioni 48x27x06 mm

Fig.94 §5. – Legenda tecnica controsoffitto collaborante

- **Controsoffitti componenti di solaio:** partecipano alla resistenza al fuoco dell'intero elemento di compartimentazione solaio.
- **Controsoffitti indipendenti o membrane:** presentano resistenza al fuoco intrinseca, fungono da separatori fra il piano e qualsiasi altro tipo di struttura posta sopra di essi. Per definizione, possono essere applicati sotto diversi tipi di struttura e di solai, garantendo comunque la medesima prestazione. Come ribadito per le altre tipologie di controsoffitti, anche in questo caso il campione sottoposto alla prova deve essere pienamente rappresentativo del soffitto posto in opera, comprese le cornici perimetrali, i giunti, le dimensioni della cavità, presenza di corpi illuminanti ecc. L'adeguamento al fuoco del capannone industriale può avvenire mediante l'installazione di un **controsoffitto membrana consistente in 2 lastre tipo Promatect 100x dello spessore di 20 mm ciascuna** (Promat). Sono previsti specifici accessori, per consentire la presenza di attraversamenti, nonché l'installazione di corpi illuminanti e rivelatori di fumo direttamente al controsoffitto.

Le figure sottostanti, illustrano la soluzione con controsoffitto indipendente, avente la medesima tipologia di lastre, ma con triplo strato 15+15+15. Tutti gli altri dettagli risultano invece rappresentativi del controsoffitto selezionato.

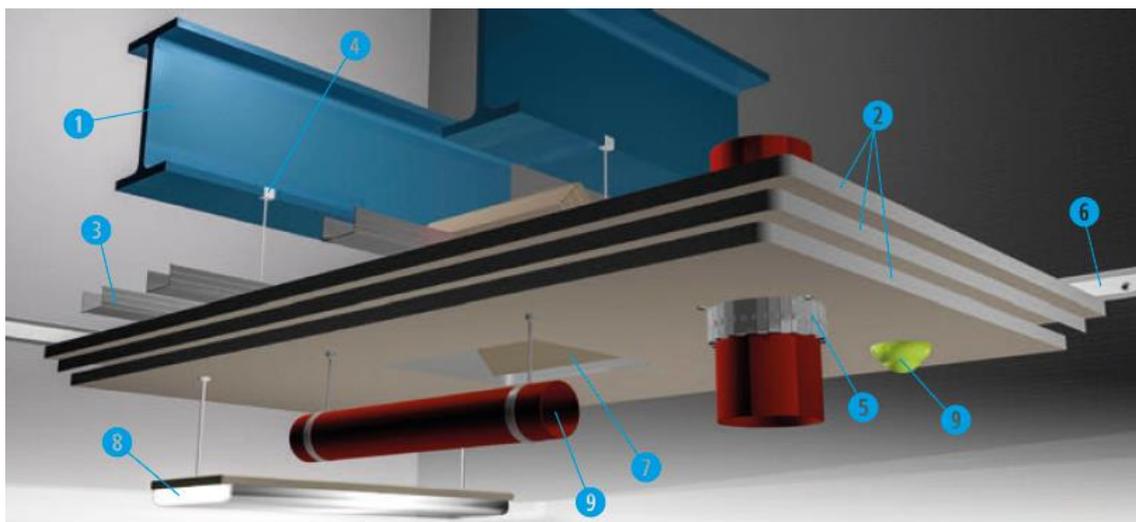


Fig.95 §5. – Spaccato assometrico controsoffitto a membrana

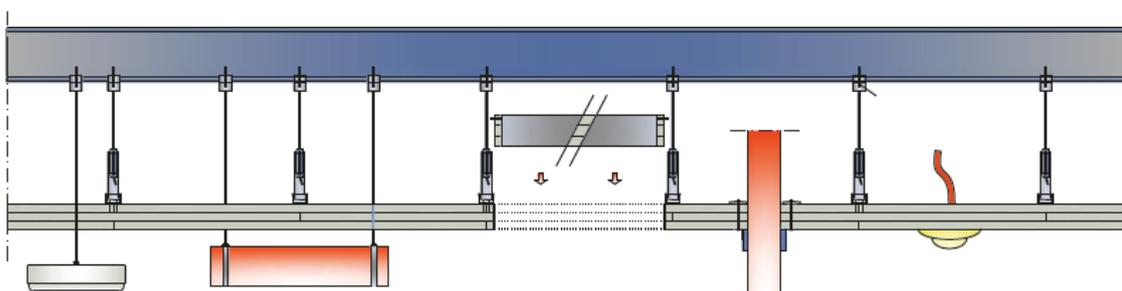


Fig.96 §5. – Sezione verticale controsoffitto a membrana

Legenda tecnica	
❶	<b>Strutture metalliche</b> di sostegno all'orditura metallica
❷	<b>Lastra in PROMATECT® 100</b> spessore mm 15 cad.
❸	<b>Orditura metallica principale a "U"</b> dim. 50 x 27x 0.6 mm, + viti e graffe metalliche di fissaggio
❹	<b>Sospensione a pendini</b> diam. 6 mm + clip metallica di ancoraggio
❺	<b>Sistema a collare PROMASTOP®U</b> fissato direttamente al controsoffitto in PROMATECT®100
❻	<b>Profilo perimetrale ad "C"</b> dim. 30 x 30 sp. 0,6 tassellato alla parete a passo 800 mm
❼	<b>Botola di ispezione</b> realizzata in triplice lastra in PROMATECT®100
❽	<b>Corpo illuminante</b>
❾	<b>Impianti</b> attraversanti il controsoffitto in PROMATECT®100

Fig.97 §5. – Legenda tecnica controsoffitto a membrana

### 5.11. Confronto tra i sistemi di protezione

Scopo del presente paragrafo è confrontare i diversi sistemi di protezione passiva al fuoco, secondo un approccio multicriteriale, mettendone in luce i vantaggi e gli elementi di debolezza. La trattazione, volutamente generale, consente l'estensione delle osservazioni anche a capannoni con caratteristiche diverse da quello analizzato.

Come si evince dalla Fig. 102, la soluzione più economica è rappresentata dagli intonaci spruzzati. Soprattutto quando la superficie da proteggere è di grandi dimensioni, il delta costo rispetto ad altri sistemi, è elevato e per nulla trascurabile. Ad esempio, nel caso del capannone industriale trattato, a fronte di una superficie esposta al fuoco da proteggere di circa 2057 m<sup>2</sup> e di un'area orizzontale di soffitto di 1200 m<sup>2</sup>, è risultato:

$$\text{Costo}_{\text{vernice}} = m^2_{\text{esposti}} \cdot \text{€}_{\text{unitario}} = 2'057 \cdot 32 = 65'814\text{€} \quad (5.7)$$

$$\text{Costo}_{\text{intonaco}} = m^2_{\text{esposti}} \cdot \text{€}_{\text{unitario}} = 2'057 \cdot 25 = 51'471\text{€} \quad (5.8)$$

$$\text{Costo}_{\text{collaborante}} = m^2_{\text{soffitto}} \cdot \text{€}_{\text{unitario}} = 1'200 \cdot 55 = 66'000\text{€} \quad (5.9)$$

$$\text{Costo}_{\text{membrana}} = m^2_{\text{soffitto}} \cdot \text{€}_{\text{unitario}} = 1'200 \cdot 75 = 90'000\text{€} \quad (5.10)$$

In allegato, è riportato il computo metrico estimativo completo con esplicitazione dei m<sup>2</sup> per ciascun elemento. I costi unitari derivano da preventivi ricevuti dalle imprese che commercializzano i prodotti, nella fattispecie di marchio Promat. Sono da intendersi come indicativi, utili esclusivamente a condurre una preliminare valutazione economica.

Gli intonaci spruzzati hanno inoltre il vantaggio di essere leggeri e di non variare in modo sostanziale la geometria degli elementi protetti. Tuttavia, a causa della bassa densità, possono essere soggetti a rapidi aumenti di temperatura nelle prime fasi dell'incendio. La bassa resistenza meccanica e l'effetto estetico li rendono adatti ad edifici industriali in cui non si abbiano specifiche pretese estetiche.



Fig.98 §5. – Protezione antincendio tegoli in c.a. prefabbricato con intonaco ignifugo



*Fig.99 §5. – Protezione antincendio travi in c.a. prefabbricato con intonaco ignifugo*

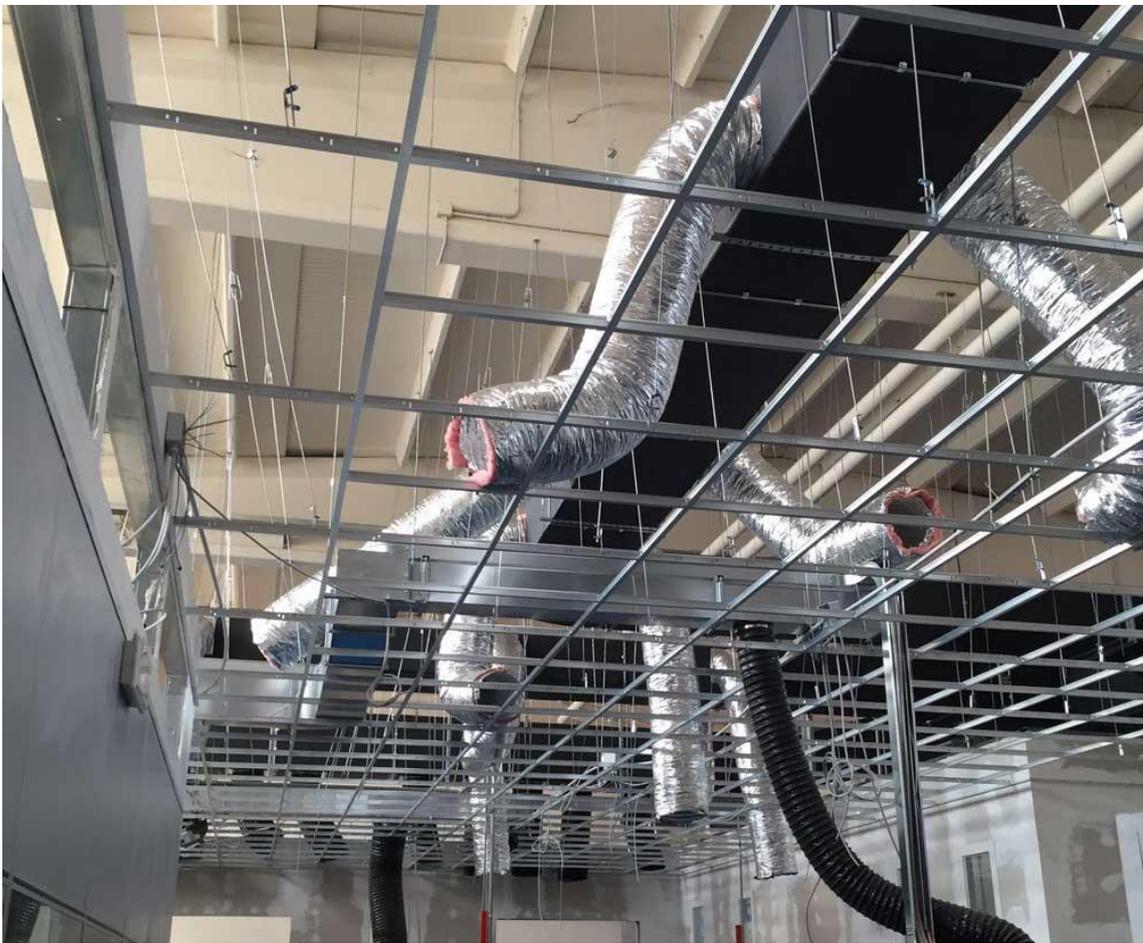
Resa estetica, che è invece un elemento di forza delle vernici intumescenti, le quali a fronte di un costo maggiore, uniscono alle buone prestazioni al fuoco, un effetto paragonabile a quello delle tradizionali pitture decorative.



*Fig.100 §5. – Protezione antincendio strutture prefabbricate con vernice intumescente*

Come gli intonaci ignifughi, non hanno alcuna funzione mascherante nei confronti di impianti tecnologici a soffitto o canali per cavi elettrici. Qualora l'esigenza sia non solo di provvedere all'adeguamento al fuoco del manufatto, ma anche di conferirgli un maggior pregio estetico, nascondendo elementi impiantistici ed architettonici a soffitto, la soluzione più adatta è rappresentata dai controsoffitti antincendio.

Tuttavia, a meno di casi sporadici, il loro impiego in campo industriale rimane raro. Tra gli svantaggi si annoverano: il sovraccarico alla struttura, non trascurabile; gli elevati costi, soprattutto per i controsoffitti a membrana i quali devono sopperire integralmente alla scarsa resistenza al fuoco degli elementi soprastanti; la difficoltosa compresenza con elementi impiantistici e architettonici esistenti. A questo proposito basti pensare alla necessità di predisporre opportuni attraversamenti antincendio per le tubazioni o per gli impianti di illuminazione passanti. Inoltre, da non sottovalutare è la presenza delle aperture lucernario a soffitto, molto comuni nei capannoni industriali, la cui compatibilità con sistemi a controsoffitto è un ulteriore elemento disincentivante.



*Fig.101 §5. – Protezione antincendio strutture prefabbricate con controsoffitti*

Infine, per quanto concerne le tempistiche di posa in opera, da indagini dirette presso alcune imprese del settore, è emerso che in media è possibile trattare 250 m<sup>2</sup>/giorno di superficie con pittura o intonaci. Di contro, sono realizzabili mediamente solo 70 m<sup>2</sup>/giorno di controsoffitto antincendio.

Al termine del confronto, si precisa che, indipendentemente dalle differenze evidenziate (costi, tempi ecc.) lo scopo ultimo dei sistemi passivi è proteggere le strutture scongiurandone il danneggiamento in caso di incendio. Pertanto il criterio dominante per la scelta del protettivo, dev'essere il raggiungimento dei requisiti antincendio prefissati. Esistono casi in cui, lo spessore degli elementi strutturali, le incompatibilità architettoniche, l'esposizione ad agenti aggressivi, impongono una scelta univoca del sistema passivo da adottare.

Sistema di protezione passiva adottato	Costo a m <sup>2</sup> di superficie [1] [€/m <sup>2</sup> ]	Tempistiche di posa in opera [1] [m <sup>2</sup> /giorno]	Sovraccarico alla struttura	Pregio estetico e funzione mascherante	Compatibilità con altri elementi architettonici e impiantistici
Pittura intumescente	32,00 €	250	buono	sufficiente	ottimo
Intonaco ignifugo	25,00 €	250	ottimo	scarso	ottimo
Controsoffitto collaborante	55,00 €	70	scarso	ottimo	scarso
Controsoffitto indipendente	75,00 €	70	scarso	ottimo	scarso

[1] = m<sup>2</sup> di superficie esposta nel caso di vernici/intonaci e m<sup>2</sup> di superficie orizzontale di soffitto per controsoffitti

**Legenda cromatica**

	ottimo
	buono
	sufficiente
	scarso

Fig.102 §5. – Confronto multicriterio tra i diversi sistemi di protezione passiva

## **CAPITOLO VI**

---

### **VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO: APPROCCIO PRESTAZIONALE**

6.1. Premessa metodologica

Nel presente Capitolo, si eseguono le verifiche di Resistenza al fuoco in termini di **mantenimento della capacità portante**, secondo **approccio prestazionale**. In accordo con quanto anticipato al Capitolo II, la soluzione alternativa al livello di prestazione III presuppone che le **analisi si eseguano con curve naturali**, “**dall’innescio della combustione fino a quando, nella fase di raffreddamento, gli effetti dell’incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti**” [7].

Le **curve naturali di incendio**, si sono costruite mediante modelli di simulazione incendio avanzati. Nello specifico, **il software utilizzato è stato Pyrosim**. Si tratta dell’interfaccia grafica di un modello di campo elaborato dai ricercatori del NIST, che in base a leggi di fluidodinamica computazionale, consente di simulare la propagazione dell’incendio e dei suoi effetti (Fire Dynamics Simulator – FDS), tenendo conto delle reali caratteristiche dell’ambiente e dei materiali stoccati.

In accordo con quanto previsto alla sezione “M – Metodi” del *D.M. 3 agosto 2015* [7], si sono selezionati alcuni degli scenari di incendio ragionevolmente verificabili, ciascuno dei quali è stato sottoposto a simulazione Pyrosim.

Infine, ricavate le curve naturali, le verifiche strutturali si sono eseguite per ciascuna membratura con **metodo analitico avanzato (3° livello)**, con l’ausilio del software di calcolo **CDM Dolmen** e in particolare del modulo **IS Fuoco**, **in maniera simile a quanto descritto al Capitolo V**, dedicato all’approccio prescrittivo.

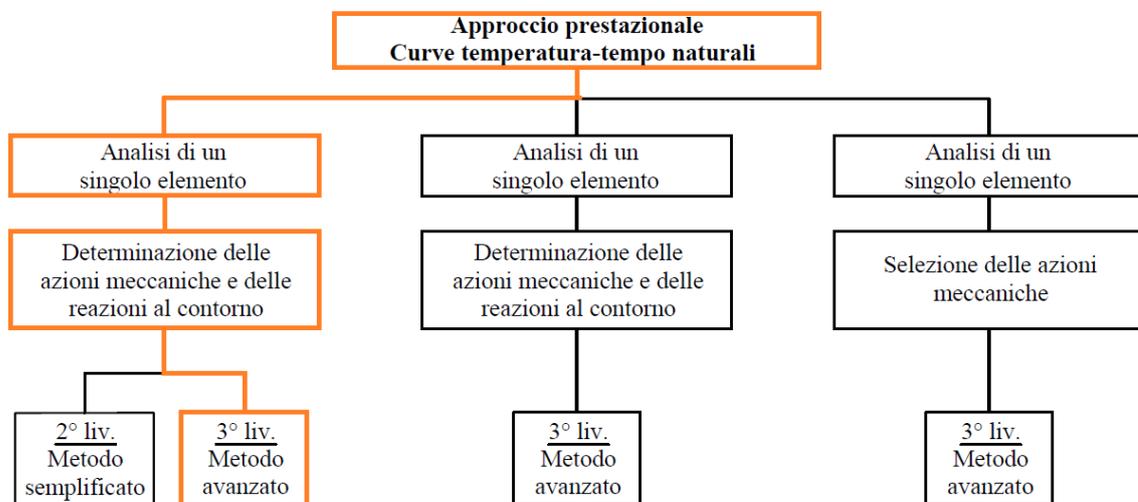


Fig.1 §6. – Evidenziazione metodo di progettazione adottato

Tenuto conto che l'obiettivo della Tesi fosse illustrare il metodo di applicazione dei due approcci in vista di un loro confronto finale, piuttosto che la mera risoluzione di un caso studio con caratteristiche del tutto peculiari, **si è optato per analizzare solo il compartimento *Magazzino 1+2***. Quest'ultimo è stato selezionato tra i 4 compartimenti presenti, in ragione del maggiore carico di incendio specifico  $q_f$ , oltre che per la presenza di elementi strutturali più critici in termini di verifiche strutturali al fuoco: travi a "T" e tegoli  $H = 25$  cm.



*Fig.2 §6. – Evidenziazione del compartimento analizzato: Magazzino 1+2*

## 6.2. Individuazione e selezione scenari di incendio

Gli scenari di incendio rappresentano la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività in relazione alle caratteristiche del focolare, dell'edificio e degli occupanti.

Secondo quanto emerge dai documenti reperiti, all'interno del compartimento sono stoccati cassoni di materiale plastico (polipropilene) e pedane di materiale finito, concentrati nelle zone evidenziate in Fig. 2 dai rettangoli.

Tra gli scenari di incendio prevedibili, si sono selezionati quelli che presentano il focolare (innesco dell'incendio) **nelle zone a maggior concentrazione di materiale, come evidenziato in Fig. 3: Scenari A e B**. Infatti, ipotizzando una distribuzione di materiale uniforme in termini di tipologia, in tali zone risulta maggiore la probabilità di innesco. Inoltre, nonostante, come è stato sottolineato nel §6.3, il regime di incendio sia

di ipoventilazione e pertanto il valore massimo della potenza termica  $HRR_{max}$  non sia funzione del combustibile presente, si ricorda che la durata della fase stazionaria e di decadimento, risultano fortemente condizionate dal quantitativo di materiale coinvolto nella combustione: ai fini del mantenimento della capacità portante, è più gravoso un incendio lento in grado di sollecitare a lungo le strutture, piuttosto che un incendio rapido e velocemente estinguibile.



Fig.3 §6. – Evidenziazione degli scenari selezionati all'interno del compartimento

### 6.3. Quantificazione degli scenari e modellazione Pyrosim

#### 6.3.1 Scenario A

**Il focolare** è nella zona sud-ovest del compartimento in esame, dove è previsto lo stoccaggio di una grande quantità di materiale plastico (prevalentemente polipropilene), utilizzato per realizzare l'involucro dei pennarelli/penne per la scrittura.

Come anticipato nei precedenti capitoli, è noto che gli effetti che un incendio provoca all'interno di un edificio, tra cui la curva naturale T-t, dipendono dal valore che assume **la potenza termica rilasciata in funzione del tempo: curva HRR(t) o similmente la curva normalizzata RHR(t)**. Per tale motivo, è di fondamentale importanza procedere alla sua stima durante le varie fasi di sviluppo di un incendio. Questo risulta peraltro obbligatorio, se si pensa che “nell'ambito del metodo avanzato per la stima delle curve naturali, la maggior parte dei modelli d'incendio numerici presenti in commercio (tra

cui Pyrosim) richiedono come principale dato di input l'andamento temporale della potenza termica rilasciata" [18].

Nella caso in esame, si è optato per stimare la curva HRR e la relativa RHR, secondo quanto descritto al §M.2.6 del [7] e sul testo [1]. Inoltre sono risultati utili e spesso esaustivi, gli esempi applicativi illustrati nel testo *Ingegneria della Sicurezza Antincendio* di La Malfa [18].

La curva HRR può essere qualitativamente divisa in 3 fasi conseguenti: fase di propagazione, fase stazionaria e fase di decadimento.

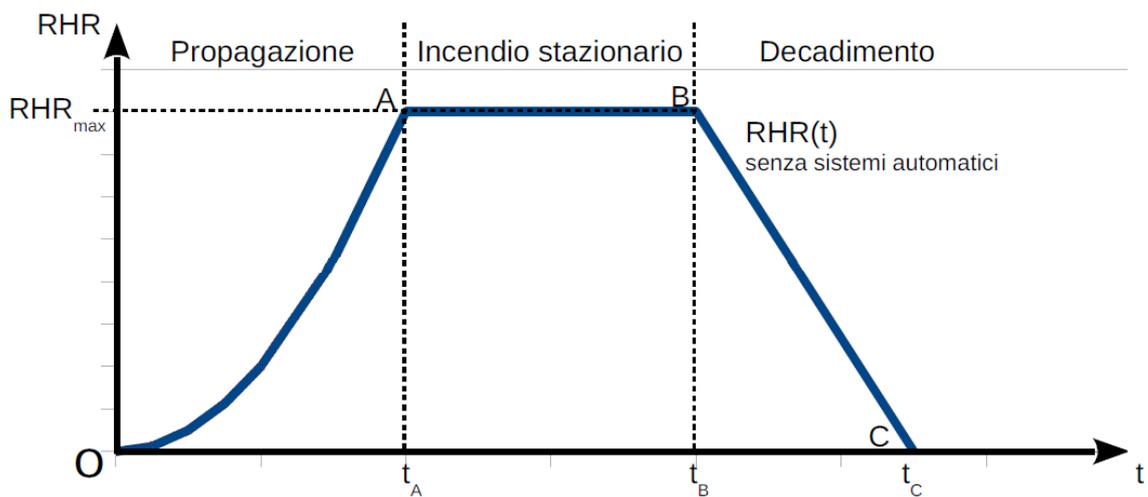


Fig.4 §6. – Illustrazione M.2-1 del D.M. 3 agosto 2015 [7]: Fasi dell'incendio

Nel seguito, è riportata la definizione quantitativa di ciascuna fase dell'incendio:

- **Fase di propagazione.** La potenza termica rilasciata, può essere rappresentata dalla relazione quadratica:

$$HRR(t) = 1000 \cdot \left( \frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (6.1)$$

Dove:

$HRR(t)$  = potenza termica rilasciata dall'incendio [kW];

$t$  = tempo [s];

$t_\alpha$  = tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga il valore di 1000 kW, espresso in [s]. **Questo valore è stato assunto pari a 150 s**, in accordo

con la tabella G.3-2 del [7] per materiali plastici impilati e secondo quanto consigliato dalla norma *C/VM2 Verification Method: Framework for Fire Safety Design* [19], la quale indica che per i depositi, nei quali il materiale combustibile è disposto con altezze di impilamento comprese fra 3 m e 5 m, può assumersi un  $t_{\alpha}$  di 150 s.

$\delta_{\alpha}$	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio $t_{\alpha}$ [s]	Esempi
1	600 Lenta	Materiali poco combustibili distribuiti in modo discontinuo o inseriti in contenitori non combustibili.
2	300 Media	Scatole di cartone impilate; pallets di legno; libri ordinati su scaffale; mobili in legno; automobili; materiali classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1)
3	150 Rapida	Materiali plastici impilati; prodotti tessili sintetici; apparecchiature elettroniche; materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco.
4	75 Ultra-rapida	Liquidi infiammabili; materiali plastici cellulari o espansi e schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

Fig.5 §6. – Tabella G.3-2 del D.M. 3 agosto 2015 [7]: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

- **Fase stazionaria:** lo sviluppo di un incendio in fase avanzata di evoluzione all'interno di un locale dipende dal valore che assume il fattore di ventilazione "O". Infatti, esso modifica significativamente il valore massimo che può raggiungere la velocità di combustione (kg/s di combustione bruciato) ed è definito dalla seguente relazione:

$$O = \frac{A_V \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_T} \quad (6.2)$$

Dove:

$A_V$  = superficie delle aperture di ventilazione ricavate sulle pareti del locale [ $m^2$ ];

$A_T$  = superficie totale del compartimento [ $m^2$ ];

$h_{eq}$  = altezza equivalente, valutata come:

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{vi} \cdot h_i}{A_V} \quad (6.3)$$

Abaco aperture <i>Magazzino 1+2</i>				
N°	$b_i$ [m]	$h_i$ [m]	$A_{vi}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{vi} \cdot h_i$ [m <sup>3</sup> ]
1	3,00	1,50	4,50	6,75
2	3,00	1,50	4,50	6,75
3	3,00	1,50	4,50	6,75
4	3,00	1,50	4,50	6,75
5	3,00	1,50	4,50	6,75
6	3,00	1,50	4,50	6,75
7	1,20	0,70	0,84	0,59
8	1,20	0,70	0,84	0,59
9	3,00	1,50	4,50	6,75
10	3,00	1,50	4,50	6,75

Fig.6 §6. – Parametri per il calcolo del fattore di ventilazione  $O$

Essendo  $A_t = 2084 \text{ m}^2$ , è risultato:

$$h_{eq} = \frac{55,18}{33,68} = 1,46m \quad (6.4)$$

$$O = \frac{37,68 \cdot \sqrt{1,46}}{2084} = 0,022m^{0,5} \quad (6.5)$$

Il **fattore di ventilazione  $O$  pari a  $0,022 \text{ m}^{0,5}$**  è caratteristico per gli **incendi controllati dalla ventilazione (ipoventilati)**, per i quali la velocità massima di combustione è condizionata dall'aria entrante attraverso le aperture e non dalle peculiarità del combustibile. Infatti, secondo quanto riportato a pagina 83 di [1], il passaggio tra i due regimi (ipoventilazione e iperventilazione) avviene in corrispondenza di  $O = 0,07 \text{ m}^{0,5}$ .

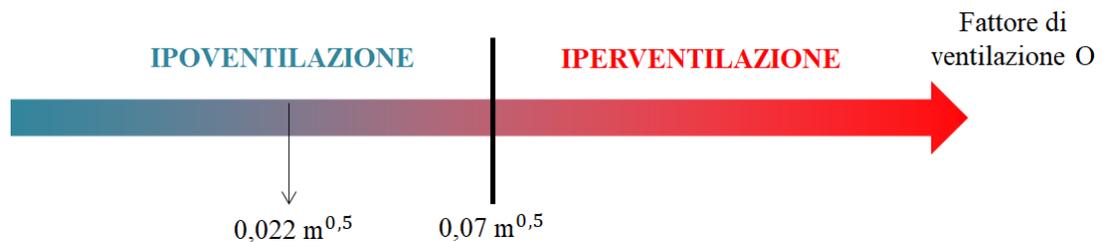


Fig.7 §6. – Illustrazione del passaggio tra i due regimi

Pertanto, il valore della potenza massima rilasciata  $HRR_{max}$  è stato ricavato in funzione delle aperture presenti nel compartimento, secondo la formula suggerita a pagina 112 di [18]:

$$HRR_{max} = \chi_A \cdot P_c \cdot 0,5 \cdot A_{Vequiv} \cdot \sqrt{h_{Vequiv}} \quad (6.6)$$

Dove:

$\chi_A$  = efficienza della combustione che può assumersi in genere pari ad 1;

$P_c$  = energia termica, espressa in kJ/kg<sub>aria</sub>, rilasciata dal combustibile per unità di massa di aria consumata;

$A_{Vequiv} = W_{Vequiv} \cdot h_{Vequiv}$  = area di un'apertura equivalente ai fini del calcolo di HRR, ricavata nelle pareti del locale;

$h_{Vequiv}$  = differenza in m fra l'altezza del punto più alto e quella del punto più basso fra tutte le aperture di ventilazione presenti nelle pareti del locale;

$W_{Vequiv}$  = larghezza in m della predetta apertura equivalente che viene calcolata come:

$$W_{Vequiv} = \frac{\sum_i b_i \cdot h_i^{1,5}}{h_{Vequiv}^{1,5}} \quad (6.7)$$

In particolare, per il compartimento analizzato:

<b>Abaco aperture Magazzino 1+2</b>				
<b>N°</b>	<b>b<sub>i</sub> [m]</b>	<b>h<sub>i</sub> [m]</b>	<b>h<sub>i</sub><sup>1,5</sup></b>	<b>W<sub>i</sub>·h<sub>i</sub><sup>1,5</sup></b>
1	3,00	1,50	1,66	4,97
2	3,00	1,50	1,66	4,97
3	3,00	1,50	1,66	4,97
4	3,00	1,50	1,66	4,97
5	3,00	1,50	1,66	4,97
6	3,00	1,50	1,66	4,97
7	1,20	0,70	0,59	0,70
8	1,20	0,70	0,59	0,70
9	3,00	1,50	1,66	4,97
10	3,00	1,50	1,66	4,97

Fig.8 §6. – Parametri per il calcolo della larghezza equivalente  $W_{Vequiv}$

Essendo  $h_{V_{equiv}} = 1,50$  m, è risultato:

$$W_{V_{equiv}} = \frac{41,16}{1,50^{1,5}} = 22,41m \quad (6.8)$$

$$A_{V_{equiv}} = 22,41 \cdot 1,50 = 33,61m^2 \quad (6.9)$$

Infine, considerando per  $P_c$  un valore di 2940 kJ/kg, come suggerito nella tabella 2.2 a pagina 62 di [18] per il combustibile polipropilene, si è ottenuto:

$$HRR_{max} = 1 \cdot 2940 \cdot 0,5 \cdot 33,61 \cdot \sqrt{1,50} = 60508kW \quad (6.10)$$

Noto il valore della massima potenza termica prodotta, il tempo  $t_A$  di inizio della fase di incendio stazionario, si è calcolato con la seguente espressione:

$$t_A = \sqrt{HRR_{max} \frac{t_a^2}{1000}} = \sqrt{60508 \frac{150^2}{1000}} = 1167s \quad (6.11)$$

“La fase di incendio stazionario termina al tempo  $t_B$ , tempo di inizio della fase di decadimento, in cui il 70% dell’energia termica inizialmente disponibile è stata rilasciata nel compartimento antincendio” (§M.2.6.3 del D.M. 3 agosto 2015).

Se lo sviluppo dell’incendio fosse risultato controllato dal combustibile, il valore di  $HRR_{max}$  si sarebbe valutato come:

$$HRR_{max} = HRR_f \cdot A_f \quad (6.12)$$

Essendo  $HRR_f$  il massimo della potenza raggiunto in fase stazionaria di incendio pienamente sviluppato, valutato mediante prove sperimentali eseguite in aria libera (quindi, in regime di iperventilazione). Il valore di  $HRR_f$  può essere desunto per molti materiali dalla tabella 3.4 riportata a pagina 93 del testo di La Malfa [18]. Nel suddetto testo, viene inoltre suggerito di utilizzare la seguente espressione:

$$HRR(t) = HRR_f \cdot A_f(t) \quad (6.13)$$

per stimare l’effettiva superficie del pavimento del locale e, quindi, la massa di combustibile che al massimo può essere coinvolta nell’incendio al tempo  $t$ , noto il valore che assume la potenza termica a quel determinato istante.

Nel caso in esame, assumendo  $HRR_f = 4426 \text{ kW/m}^2$ , relativo alla combustione in aria libera di tinozze in polipropilene impacchettate, è risultato che:

$$A_{f,\max} = \frac{HRR_{\max}}{HRR_f} = \frac{60508}{4426} = 14 \text{ m}^2 \quad (6.14)$$

Quindi l'energia disponibile all'interno del locale si è determinata come:

$$Energia_{\text{disponibile}} = q_{f,\text{effettivo}} \cdot A_{f,\max} \quad (6.15)$$

Dove:

$q_{f,\text{effettivo}}$  = carico di incendio di progetto effettivo, ottenuto distribuendo il carico totale nelle aree effettive di stoccaggio, evidenziate sulla Tavola grafica dai rettangoli colorati:

$$q_{f,\text{effettivo}} = \frac{Energia_{\text{termica}}}{A_{\text{effettiva}}} = \frac{2250000}{196} = 11459 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad (6.16)$$

Parametri	Area di competenza	Valore	Energia termica
$q_f$	$750 \text{ m}^2$	$3000 \text{ MJ/m}^2$	$2250000 \text{ MJ}$
$q_{f,\text{effettivo}}$	$196 \text{ m}^2$	$11459 \text{ MJ/m}^2$	$2250000 \text{ MJ}$

Fig.9 §6. – Dettaglio della redistribuzione del carico specifico di incendio

Pertanto, è risultato:

$$Energia_{\text{disponibile}} = 11459 \cdot 14 = 156657 \text{ MJ} \quad (6.17)$$

Dopo aver verificato che l'energia disponibile fosse sufficiente affinché l'incendio superasse la fase di propagazione raggiungendo la potenza massima  $HRR_{\max}$ :

$$70\% \cdot (Energia_{\text{disponibile}}) \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3 \quad (6.18)$$

$$70\% \cdot (156657) \geq \frac{1}{3} \frac{1000}{150^2} 1157^3 \quad (6.19)$$

Si è valutato il tempo  $t_B$  come:

$$t_B = t_A + \frac{70\% \cdot (Energia_{disponibile}) - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{HRR_{max}} \quad (6.20)$$

$$t_B = 1167 + \frac{70\% \cdot (156657) - \frac{1}{3} \frac{1000}{150^2} 1167^3}{60508} = 2590s \quad (6.21)$$

- **Fase di decadimento:** secondo il §M.2.6.4 del D.M. 3 agosto 2015 [7], “il tempo  $t_C$  trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall’incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento, è consumato il restante 30% dell’energia termica inizialmente disponibile”:

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\% \cdot (Energia_{disponibile})}{HRR_{max}} \quad (6.22)$$

$$t_C = 2590 + \frac{2 \cdot 30\% \cdot (156657)}{60508} = 4144s \quad (6.23)$$

Inoltre, “durante la fase di decadimento l’andamento della potenza prodotta dall’incendio è lineare e quindi:

$$HRR(t) = HRR_{max} \frac{t_C - t}{t_C - t_B} \quad (6.24)$$

$$HRR(t) = 60508 \frac{4144 - t}{4144 - 2590} \quad (6.25)$$

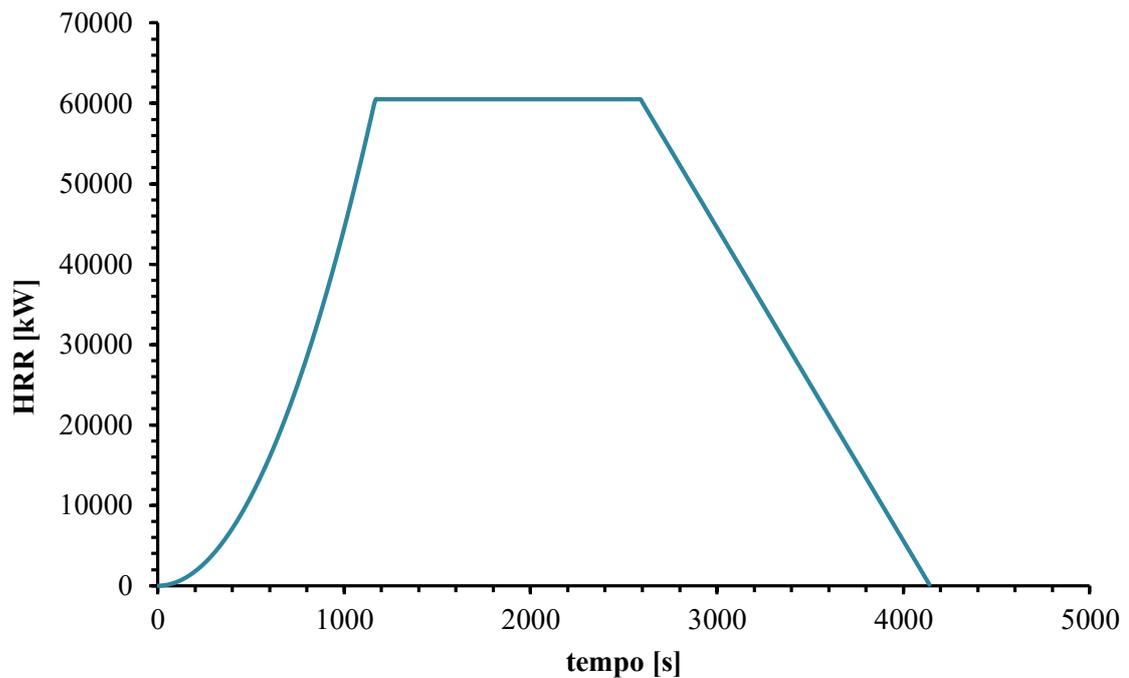


Fig.10 §6. – Potenza termica rilasciata dal focolare in funzione del tempo:  $HRR(t)$

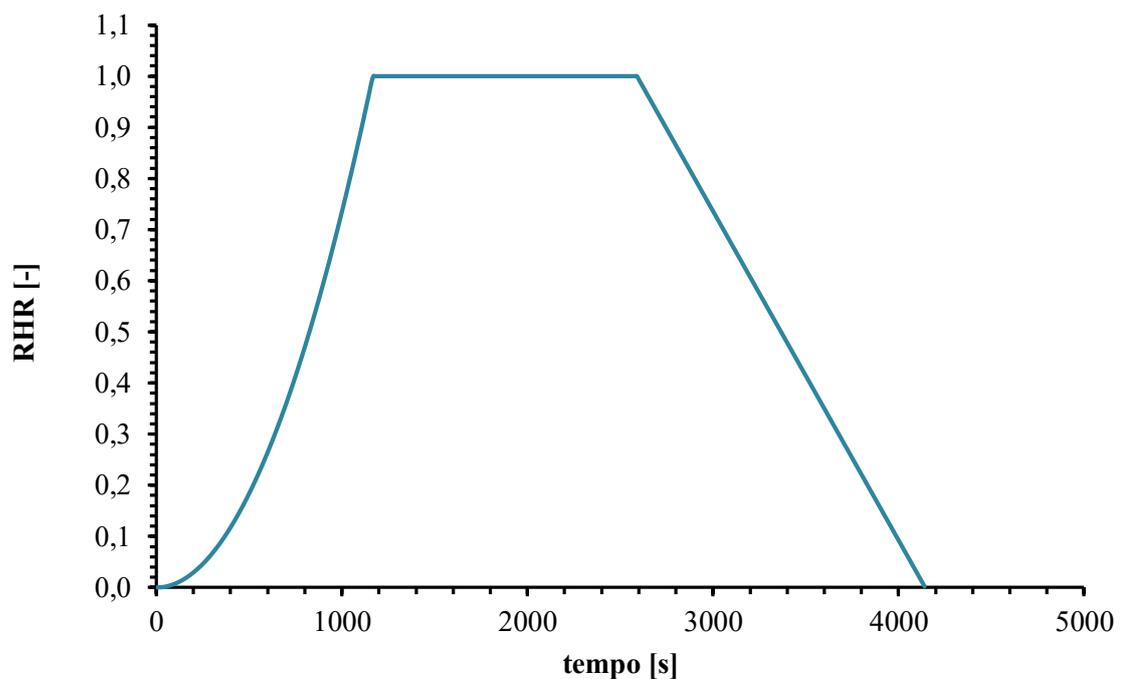
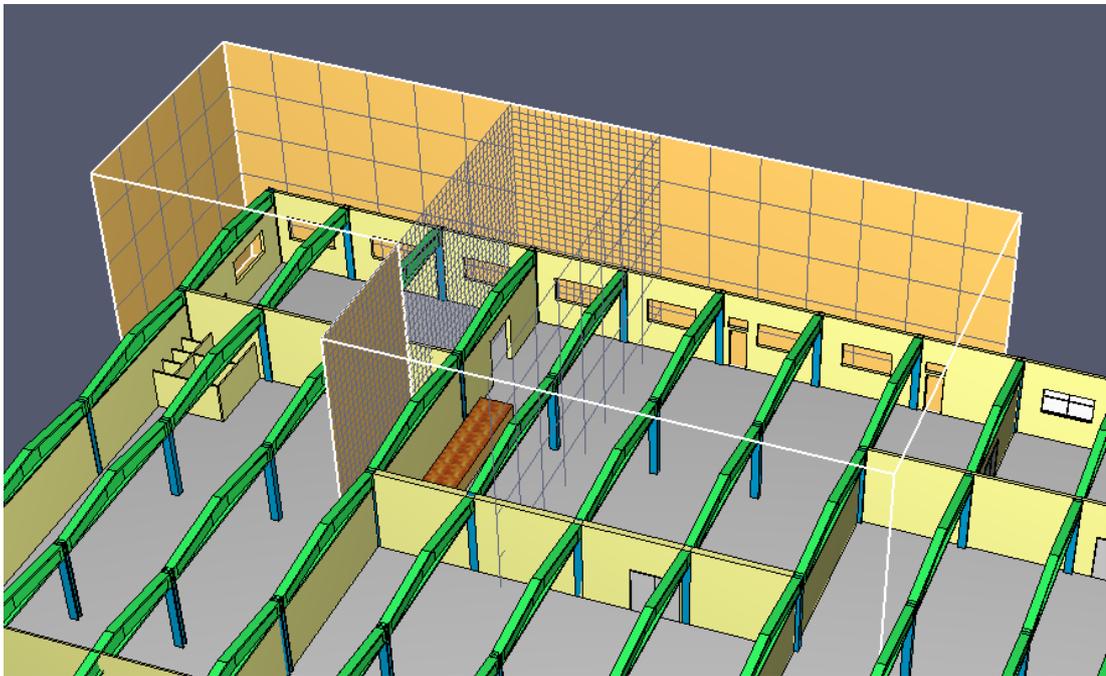


Fig.11 §6. – Potenza termica normalizzata rilasciata dal focolare in funzione del tempo:  $HRR(t)$

Nel seguito, si sono illustrate le **caratteristiche dell’attività ipotizzate** e i dati di **input inseriti nel software di simulazione Pyrosim**:

- il modello 3D architettonico è stato realizzato con **Autodesk Revit** e **successivamente importato in Pyrosim in formato FBX**. Tutti gli elementi architettonici sono intesi come “Obstructions”, ad eccezione delle aperture finestre, che risultano essere “Block holes”;
- il **dominio computazionale è stato suddiviso in celle cubiche**, di lato 0,5 m (nella zona limitrofe al focolare) e di lato 3,0 m nelle aree lontane dal focolare, dove non essendo presenti dispositivi “Devices” di raccolta dati, non è risultata necessaria una maggiore precisione di analisi. La scelta di infittire la “**Mesh**” solo in corrispondenza dell’area interessata è stata dettata dall’esigenza di ridurre i tempi di simulazione;



*Fig.12 §6. – Dettaglio Mesh e Obstruction con superficie Burner inseriti in Pyrosim*

- è stato inserito nel modello un “**Obstruction**”, **avente superficie superiore di tipo “Burner”**, con **curva di rilascio termico coincidente con quella stimata**. Come si evince dalle figure sottostanti, c’è stata perfetta corrispondenza tra la curva output post simulazione e da quella di input inserita;

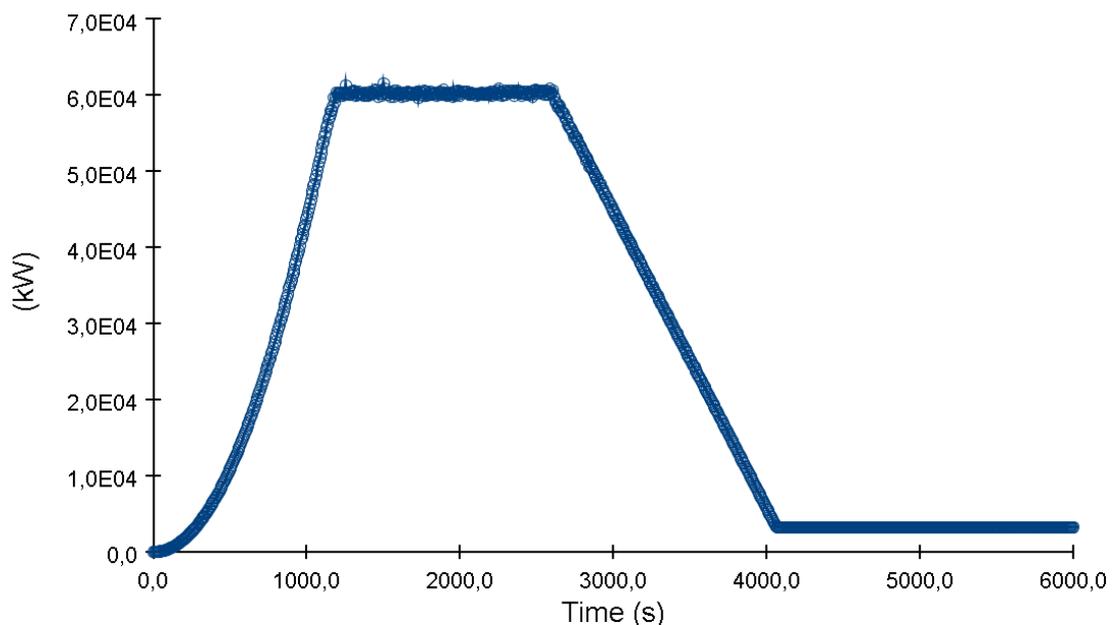


Fig.13 §6. – Curva HRR di output post simulazione in Pyrosim

- tutte le altre superfici del modello, sono state **impostate come inerti**: mantengono fissa la temperatura e non partecipano agli scambi di calore dell'ambiente;
- **per la reazione di combustione**, si è adottato come combustibile il Polipropilene  $C_3H_6$ . I valori di resa dei prodotti, si sono determinati mediante la tabella a pagina 3467/3512 del testo *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [20].

Material	$\Delta H_T$ (kJ/g)	$\gamma_{CO_2}$ (g/g)	$\gamma_{CO}$ (g/g)	$\gamma_{ch}$ (g/g)	$\gamma_S$ (g/g)	$\Delta H_{ch}$ (kJ/g)	$\Delta H_{con}$ (kJ/g)	$\Delta H_{rad}$ (kJ/g)
PP	43.4	2.79	0.024	0.006	0.059	38.6	22.6	0

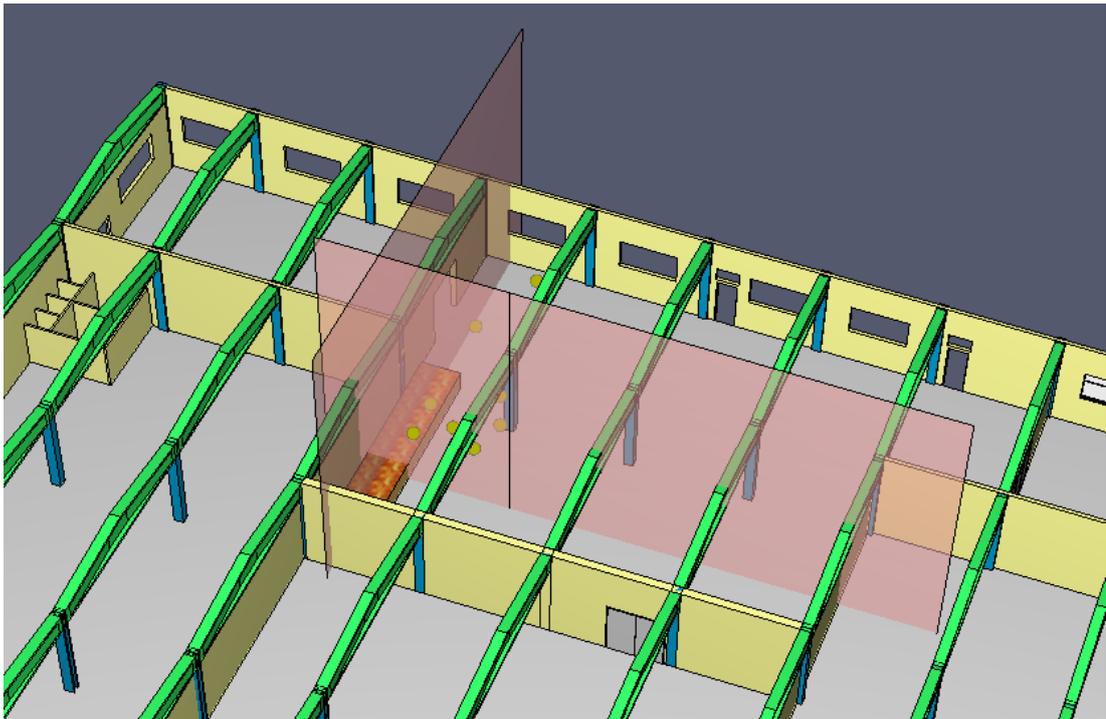
Fig.14 §6. – Estratto tabella pagina 3467/3512 di *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [20]

In particolare **il valore di combustione ( $\Delta H_C$ ) è stato forzatamente aumentato rispetto al valore di 43,4 kJ/kg suggerito**. Questo per consentire che durante la simulazione fosse percorsa interamente la curva HRR, nonostante la limitata quantità di ossigeno presente all'interno del dominio computazionale impostato;

- come suggerito nell'esempio a pagina 258 del testo *Ingegneria della Sicurezza Antincendio* di La Malfa [18], durante lo sviluppo dell'incendio le due porte REI di separazione con i compartimenti adiacenti, vengono mantenute chiuse, mentre le

restanti aperture (finestre) sono state disabilitate, risultando completamente aperte sin dall’inizio della combustione;

- **fanno eccezione i lucernari a soffitto, la cui apertura automatica con attivazione asservita ad IRAI** rappresenta peraltro l’unica soluzione progettuale prevista. Si rimanda al paragrafo 6.4;
- **il tempo di simulazione è stato fissato a 6000 s.** Nelle analisi strutturali eseguite a posteriori, si è verificato che oltre tale valore non si registrano effetti significativi dell’incendio in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti;
- **per l’analisi degli output di simulazione** e la costruzione delle curve naturali T-t, sono state inserite delle **“Thermocouples”** in prossimità degli elementi strutturali da sottoporre a successive verifiche di resistenza: travi, tegoli e pilastri;
- infine, per ottenere una **rappresentazione in scala cromatica del parametro temperatura** all’interno del compartimento analizzato, sono state inserite alcune **“Slices”** poste ortogonalmente tra loro.

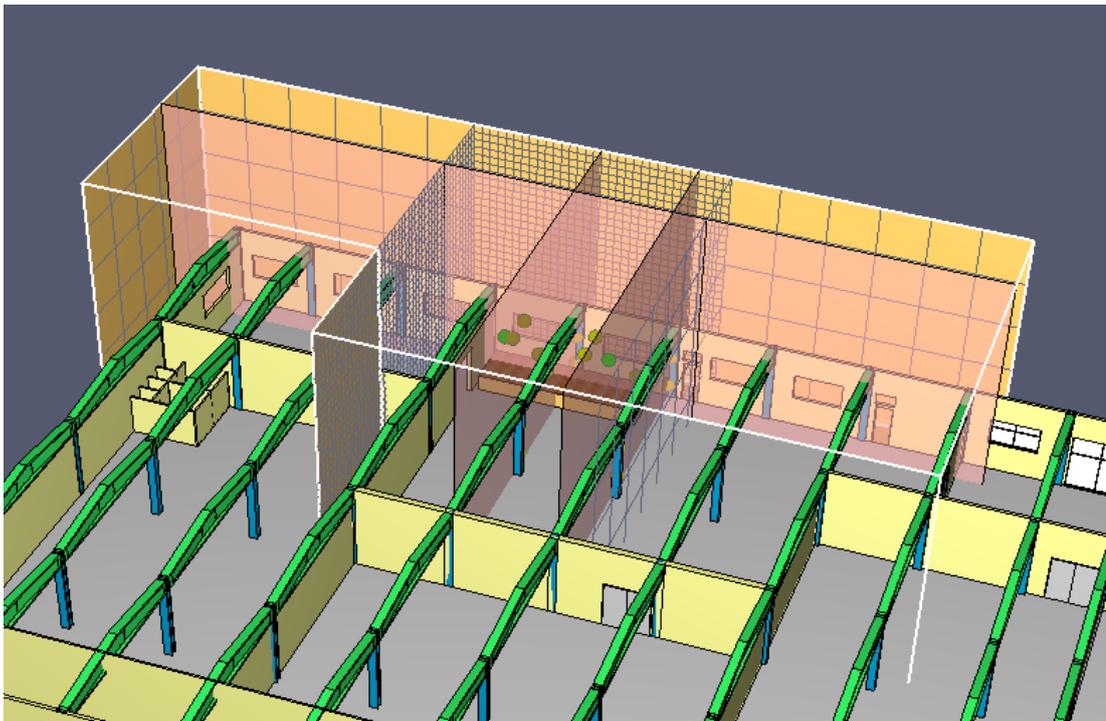


*Fig.15 §6. – Dettaglio posizionamento Termocoppie e Slices temperatura in Pyrosim*

### 6.3.2 Scenario B

Ad eccezione della **posizione del focolare**, che è nella zona nord-centrale del compartimento, tutte le altre considerazioni fatte per lo scenario A, sono state qui ripetute. E' risultata infatti del tutto analoga:

- la costruzione della **curva HRR(t)**;
- la scelta di **infittire la Mesh nella zona del dominio computazionale vicina al focolare** e quindi ai dispositivi di raccolta dati (Termocoppie);
- l'inserimento dei dati di input per la **reazione di combustione**;
- la **disattivazione delle aperture presenti**, eccetto le porte REI;
- la **durata della simulazione: 6000 s**;
- la scelta di collocare **Termocoppie** e **Slice** per raccogliere i dati di output inerenti la temperatura all'interno del compartimento.



*Fig.16 §6. – Dettaglio Mesh, Obstruction con Burner, Slices e Termocouples inseriti in Pyrosim per lo scenario di incendio B*

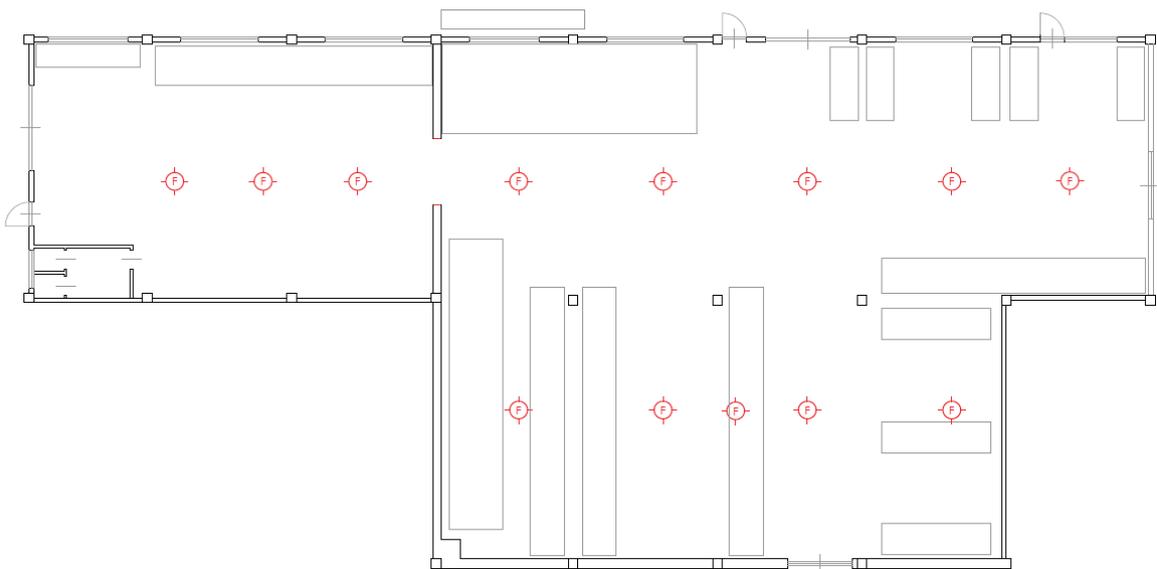
#### 6.4. Elaborazione soluzione progettuale

Come anticipato al precedente paragrafo, l'unica misura prevista per ridurre la temperatura all'interno del compartimento e quindi aumentare la possibilità di soddisfare le verifiche di resistenza, è consistita nell'**apertura automatica di alcune porzioni di lucernari a soffitto, con attivazione asservita ad IRAI**. Si tratta peraltro della **soluzione minima conforme individuata al Capitolo IV** per la strategia antincendio “Controllo di fumi e calore” (§4.8.1 della presente Relazione di Tesi).

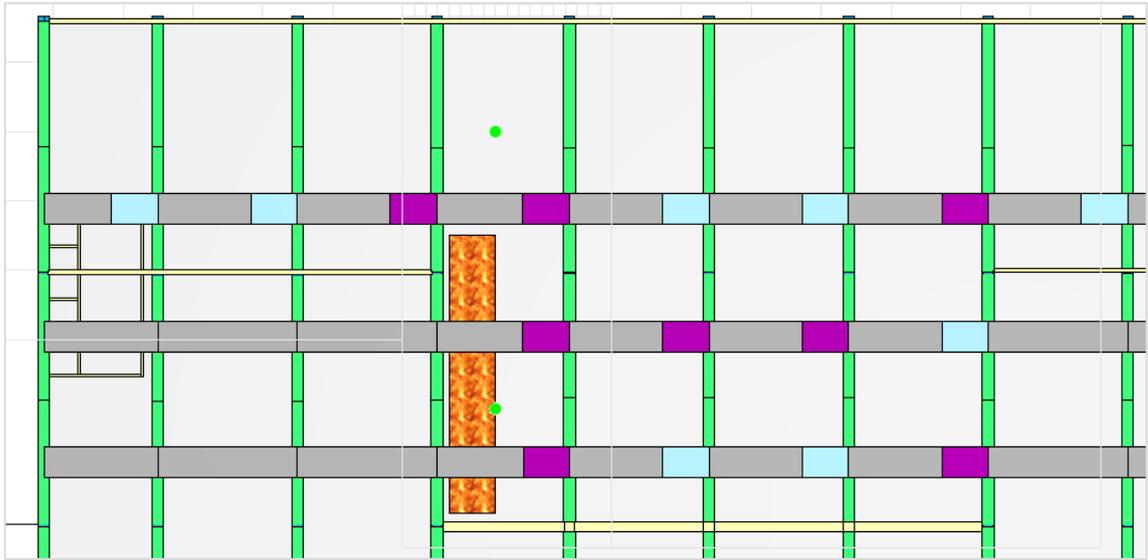
In termini di **modellazione Pyrosim**, sono stati **inseriti degli “Smoke Detectors”** nei punti previsti da progetto, che mediante apposito **“Control”** azionassero l'apertura dei **lucernari di tipo SEb (colore viola)**, con un tempo di ritardo  $t_{\text{delay}}$  **impostato a 120 s**.

I lucernari di tipo SEd (colore azzurro) si sono invece considerati chiusi durante l'intera simulazione, ipotizzando che nessun addetto li azionasse da posizione non protetta.

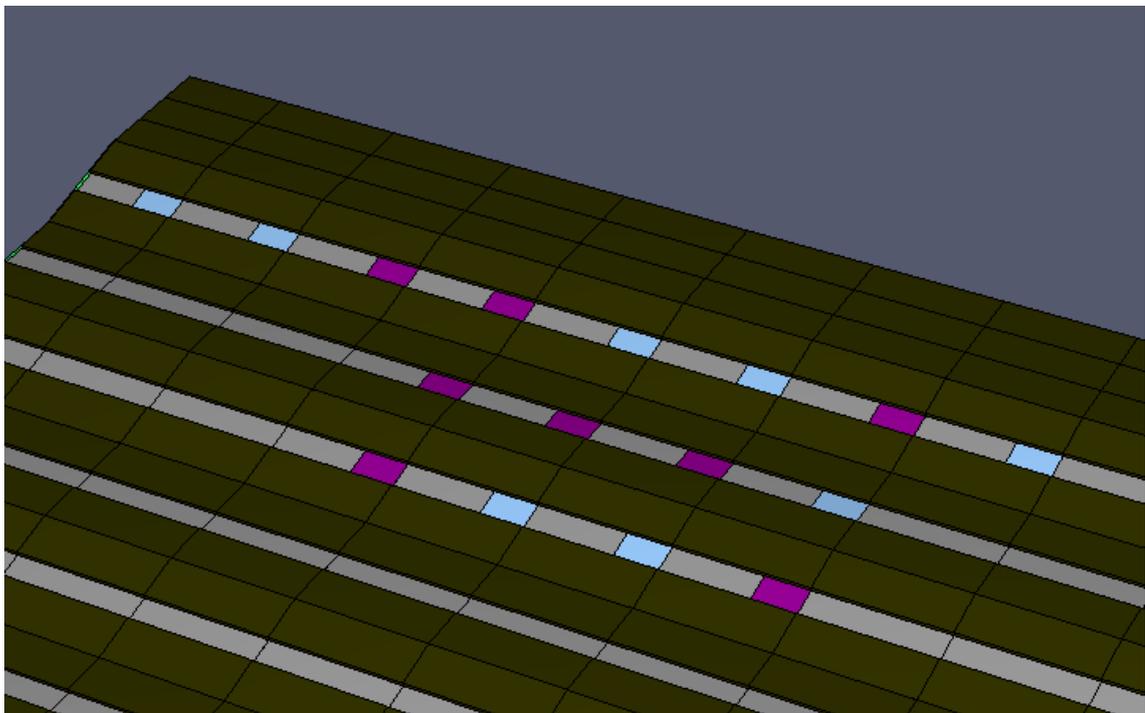
Non si sono previsti impianti automatici di controllo e spegnimento dell'incendio, né SEFC per lo smaltimento dei prodotti della combustione.



*Fig.17 §6. – Posizionamento dei rivelatori di fumo puntiformi foto-ottici secondo soluzione conforme per la strategia antincendio Controllo di fumi e calore [7]*



*Fig.18 §6. – Esempio di modellazione degli Smoke Detector in Pyrosim nel caso dello scenario A: estesi alla sola zona di interesse*



*Fig.19 §6. – Dettaglio lucernari tipo SEb (colore viola) e di tipo SEd (colore azzurro) modellati in Pyrosim: estesi al solo compartimento in esame*

6.5. Risultati simulazione degli scenari

Al termine delle simulazioni con Pyrosim, si sono estratti dal software gli output ottenuti. La rielaborazione è avvenuta mediante Microsoft Excel. Nello specifico, sono state ricavate le curve naturali T-t, grazie ai valori registrati dalle Thermocouples.

Nel seguito, sono illustrate le curve naturali ottenute per gli elementi strutturali collocati nelle zone limitrofe ai due focolari. Per ogni elemento è stata selezionata solo la curva più gravosa tra le due derivanti dagli scenari di incendio A e B. Nell'allegato A.3. si sono riportati alcuni estratti delle tabelle numeriche costruite in Excel per diagrammare le curve: in alto in corsivo, è stato riportato lo scenario che ha fornito la curva T-t più gravosa per l'elemento considerato.

		<i>scenario A</i>	<i>scenario B</i>	<i>scenario B</i>
<b>t</b>	<b>T-t UNI 834</b>	<b>T-t naturale Trave CD5</b>	<b>T-t naturale Trave DE5</b>	<b>T-t naturale Trave DE6</b>
<b>[s]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[°C]</b>	<b>[°C]</b>

Fig.20 §6. – Estratto tabelle numeriche Excel: intestazione superiore con indicazione dello scenario di riferimento per l'elemento considerato (il più gravoso tra i 2)

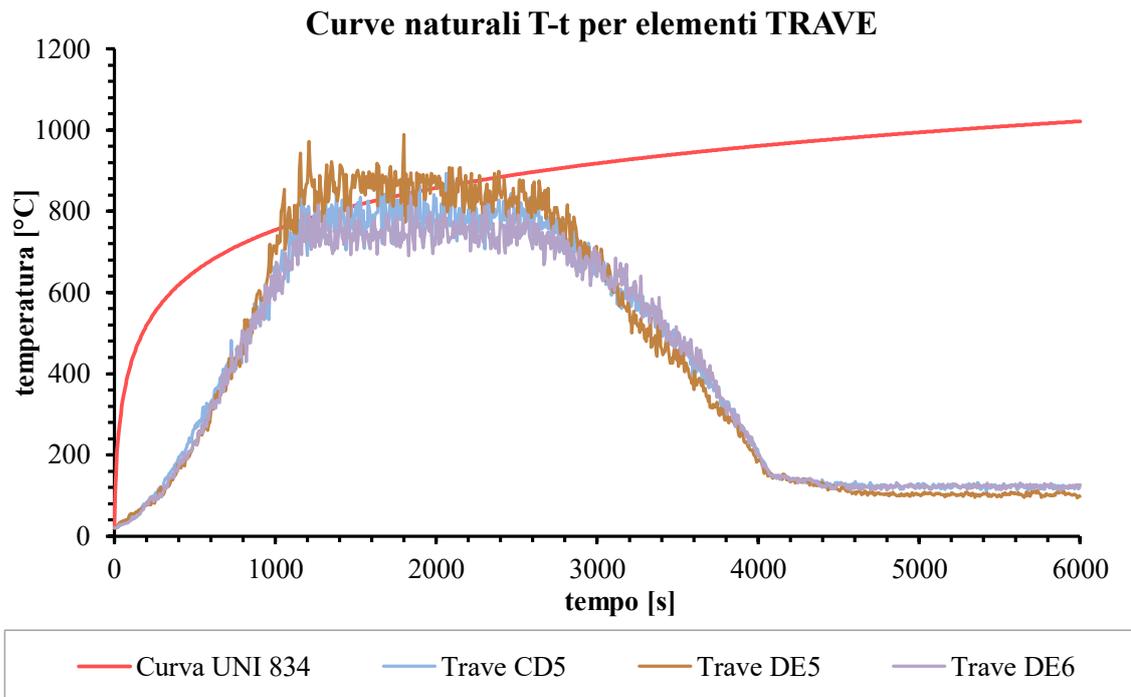


Fig.21 §6. – Curve naturali T-t per elementi di tipo Trave

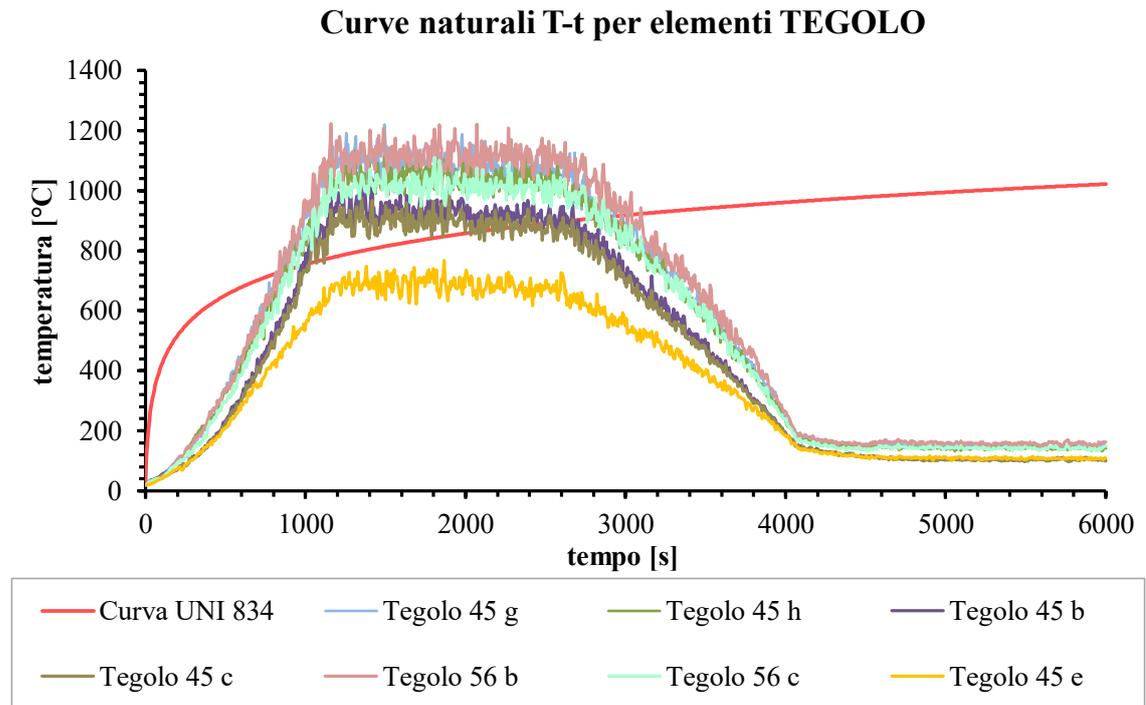


Fig.22 §6. – Curve naturali T-t per elementi di tipo Tegolo

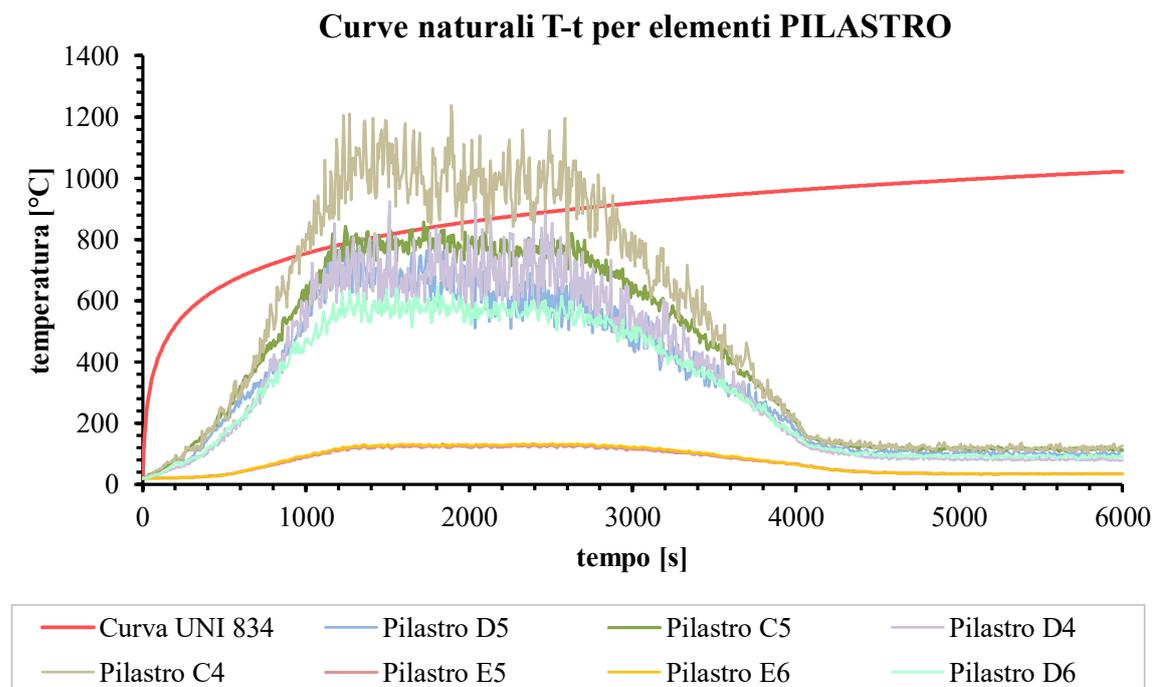


Fig.23 §6. – Curve naturali T-t per elementi di tipo Pilastro

## 6.6. Verifiche strutturali con curve naturali

Nel seguito si riportano le analisi termiche e le verifiche sezionali a caldo eseguite. E' stato analizzato il numero minimo di elementi, necessario ad estendere le considerazioni su tutti gli altri. Tale generalizzazione dei risultati è stata trattata nel paragrafo 6.7.

Nello specifico, gli elementi verificati in via diretta sono stati i seguenti:

- **Trave a T denominata DE5:** si tratta della trave più sollecitata termicamente. La verifica è stata eseguita considerando le medesime sollecitazioni agenti sulla trave più caricata a freddo (Trave CD 5);
- **Tegolo H = 25 cm denominato 45 c:** è il secondo tegolo meno sollecitato termicamente tra i 7 analizzati;
- **Tegolo H = 25 cm denominato 45 e:** è il tegolo meno sollecitato termicamente tra i 7 analizzati;
- **Pilastro rettangolare 45,5x50 denominato C4:** è il pilastro più sollecitato termicamente tra i 7 analizzati. La verifica è stata eseguita considerando le medesime sollecitazioni agenti sul pilastro più caricato a freddo (Pilastro D5);

Tutte le verifiche sono state eseguite con le **curve naturali di incendio** (illustrate per ciascun elemento nel paragrafo precedente), estendendo le analisi per una **durata tale da non riscontrare ulteriori diminuzioni del fattore di sicurezza**, ovvero del rapporto tra la massima sollecitazione agente e la massima sollecitazione resistente.

In particolare, non essendo possibile inserire nel modulo IS Fuoco di CDM Dolmen una curva temperatura tempo avente più di 50 punti, è stato necessario **discretizzare le curve** ricavate per un numero inferiore di punti.

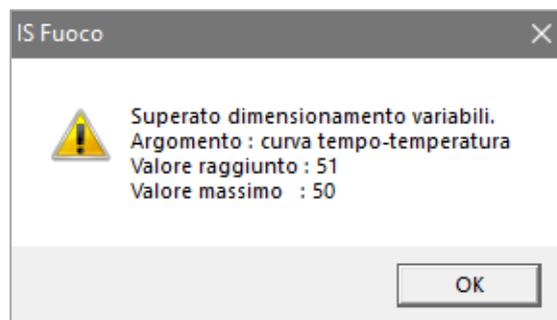


Fig.24 §6. – Avviso superamento punti di discretizzazione, IS Fuoco CDM Dolmen

6.6.1 Trave a T – DE5

**Esposizione:** su 3 lati;

**Curva temperatura tempo:** curva naturale discretizzata per un numero di punti < 50;

**Istante con coefficiente di sicurezza più basso:** 50 minuti;

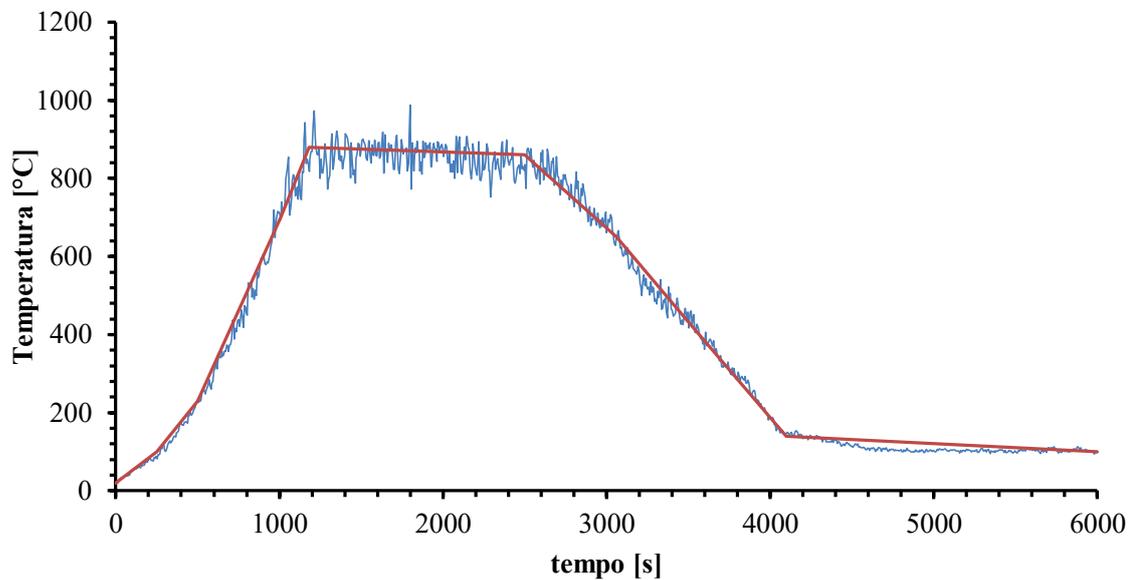


Fig.25 §6. – Discretizzazione curva naturale T-t Trave DE5

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $Mz_d = 159,04$  kN m;  $My_d = 0$  kN m;

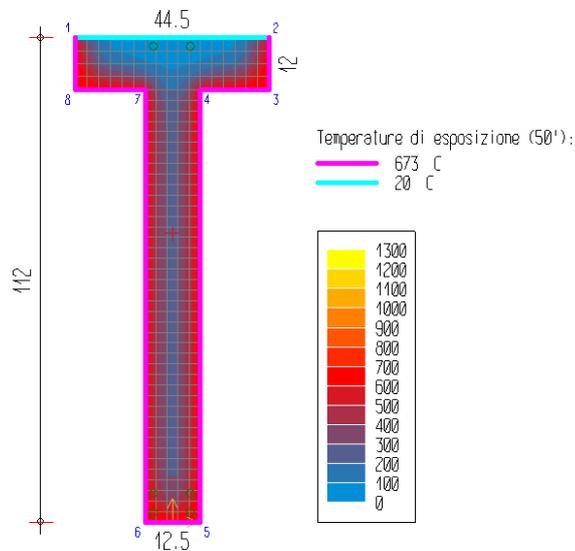


Fig.26 §6. – Analisi termica a 50 minuti

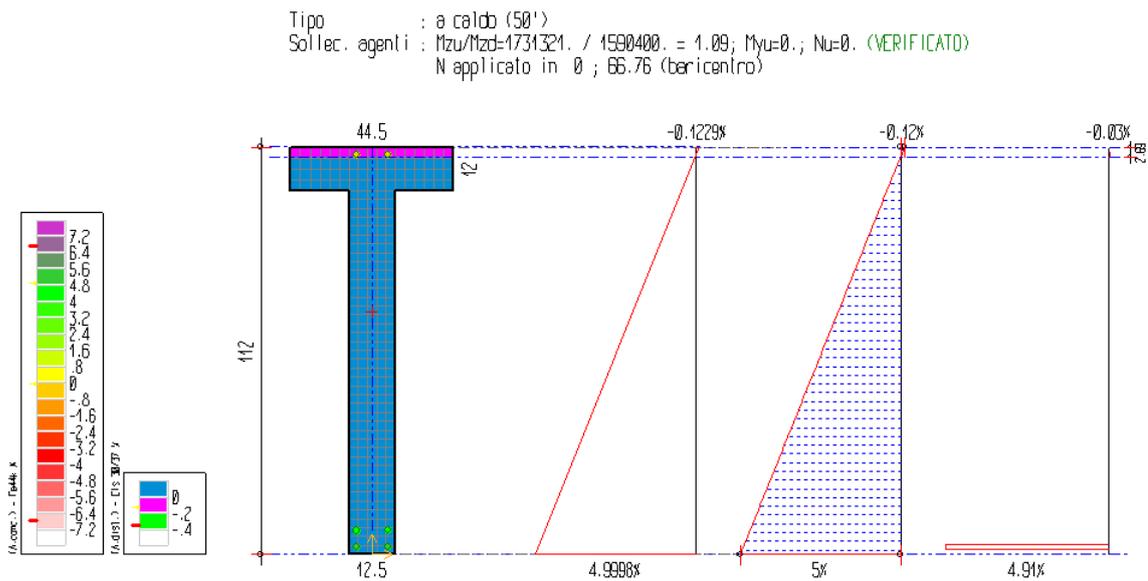


Fig.27 §6. – Verifica a flessione, a caldo (50 minuti)

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 1,09$$

**Verifiche a flessione soddisfatte.**

### 6.6.2 Tegolo H=25 cm – 45 c

**Esposizione:** solo 1 lato, flusso dal basso;

**Curva temperatura tempo:** curva naturale discretizzata per un numero di punti < 50;

**Istante con coefficiente di sicurezza più basso:** 50 minuti;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 5,30$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m;

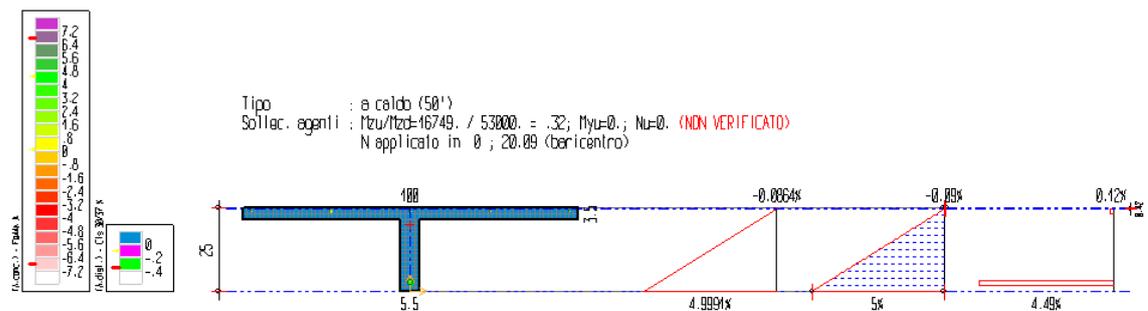


Fig.28 §6. – Verifica a flessione, a caldo (50 minuti)

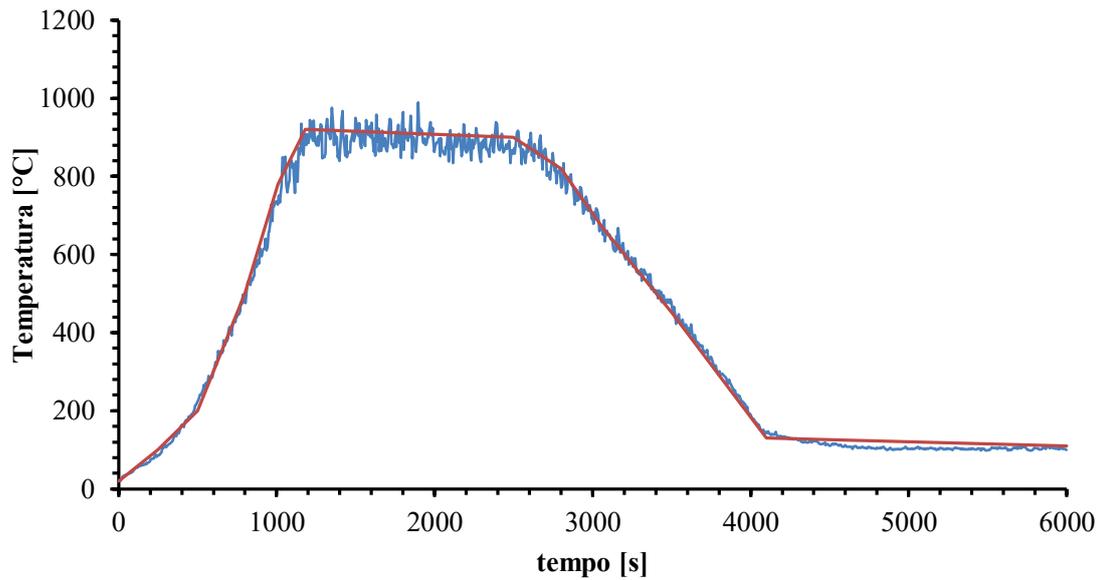


Fig.29 §6. – Discretizzazione curva naturale T-t Tegolo 45 c

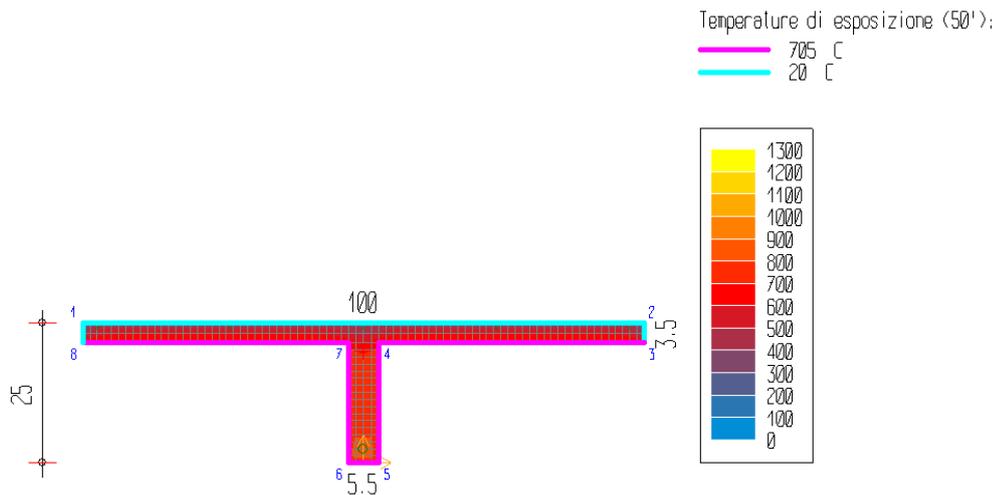


Fig.30 §6. – Analisi termica a 50 minuti

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 0,32$$

**Verifiche a flessione non soddisfatte.**

6.6.3 Tegolo H=25 cm – 45 e

**Esposizione:** solo 1 lato, flusso dal basso;

**Curva temperatura tempo:** curva naturale discretizzata per un numero di punti < 50;

**Istante con coefficiente di sicurezza più basso:** 50 minuti;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = 0$  kN;  $M_{z_d} = 5,30$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m;

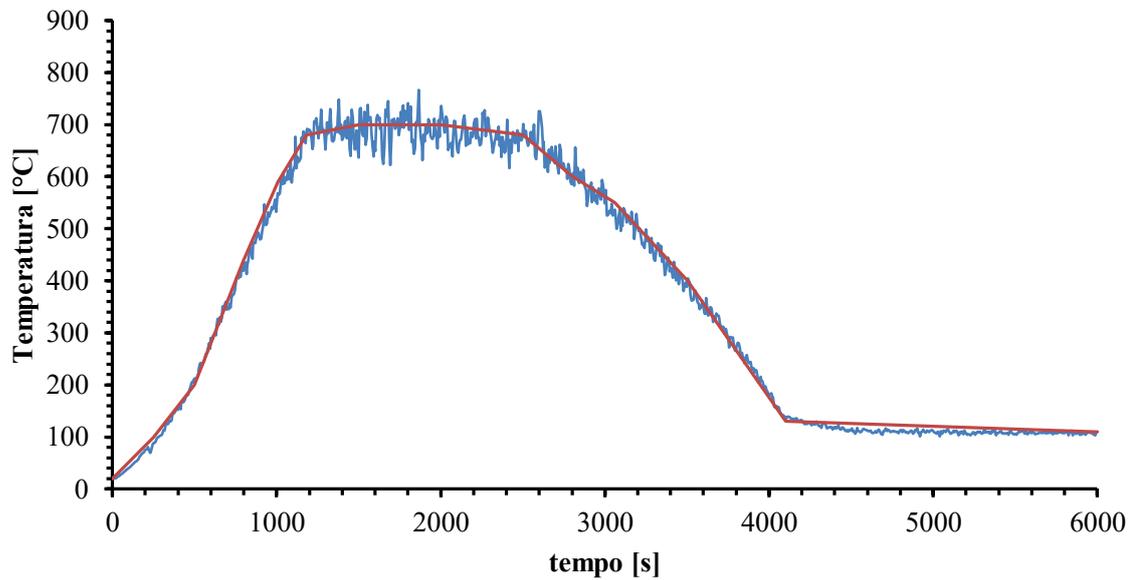


Fig.31 §6. – Discretizzazione curva naturale T-t Tegolo 45 e

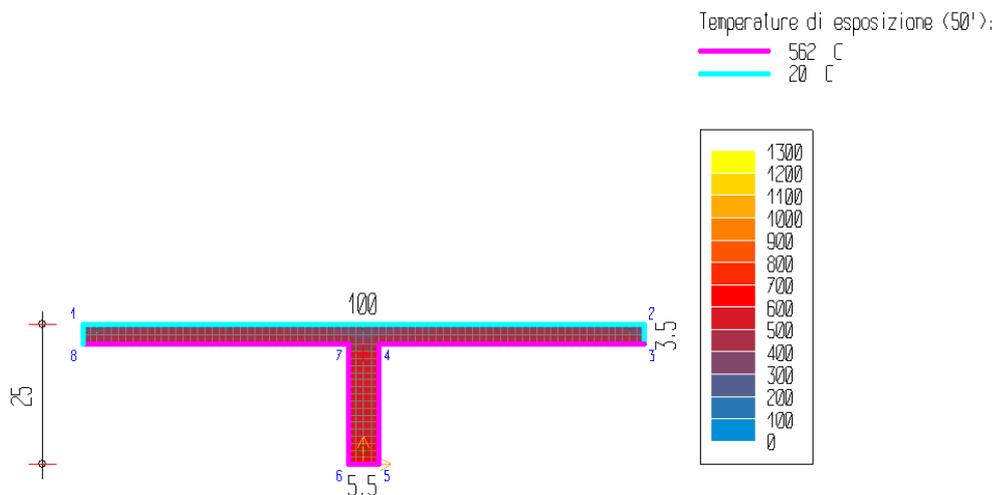


Fig.32 §6. – Analisi termica a 50 minuti

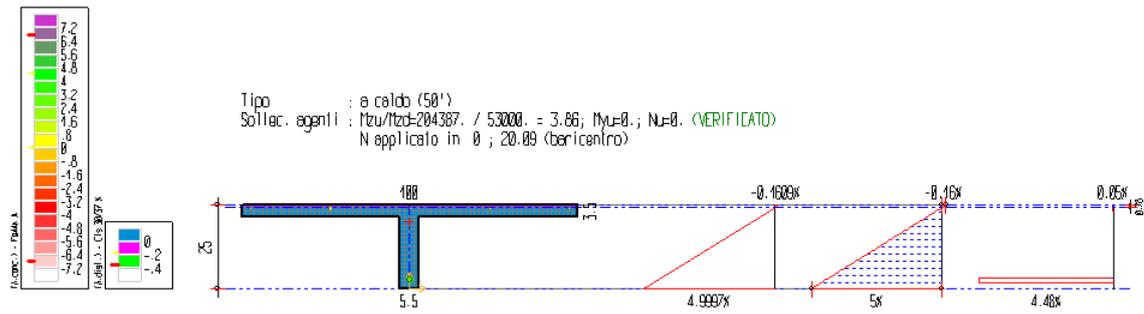


Fig.33 §6. – Verifica a flessione, a caldo (50 minuti)

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione  $M_z$ , in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{M_{z_{ult}}}{M_{z_d}} = 3,86$$

**Verifiche a flessione soddisfatte.**

#### 6.6.4 Pilastro rettangolare 45,5x50 – C4

**Esposizione:** completa su tutti i lati;

**Curva temperatura tempo:** curva naturale discretizzata per un numero di punti < 50;

**Istante con coefficiente di sicurezza più basso:** 50 minuti;

**Sestetto di sollecitazioni agenti:**  $N_d = -150$  kN;  $M_{z_d} = 0$  kN m;  $M_{y_d} = 0$  kN m;

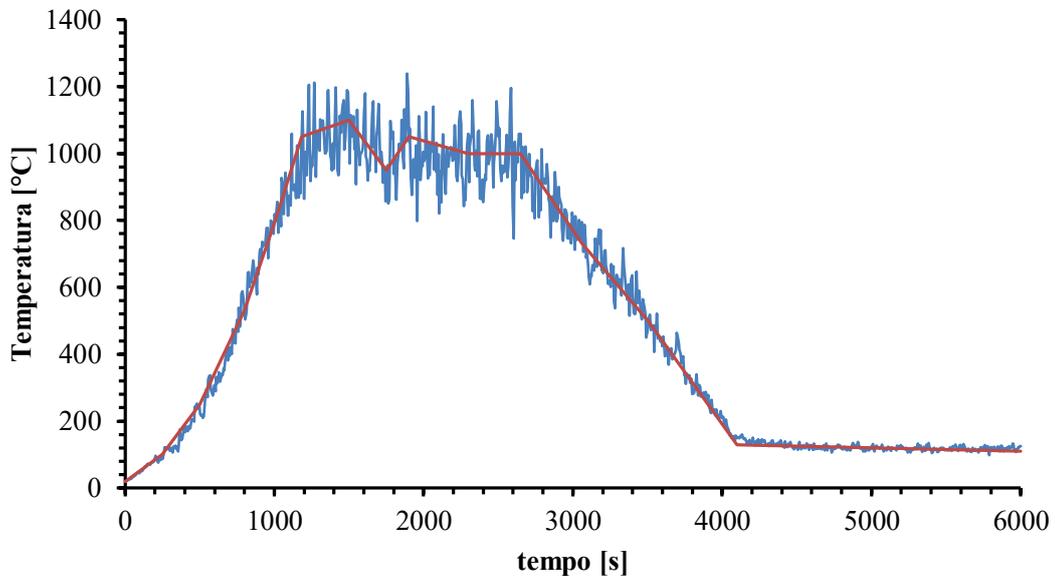


Fig.34 §6. – Discretizzazione curva naturale T-t Pilastro C4

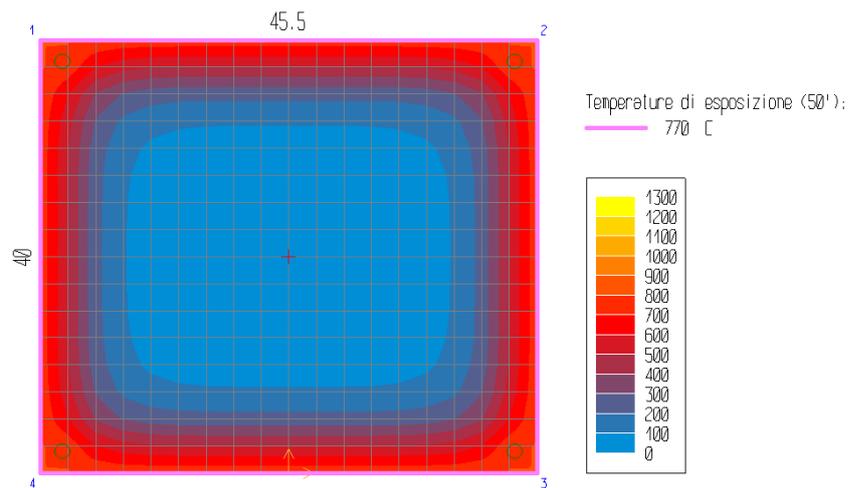


Fig.35 §6. – Analisi termica a 50 minuti

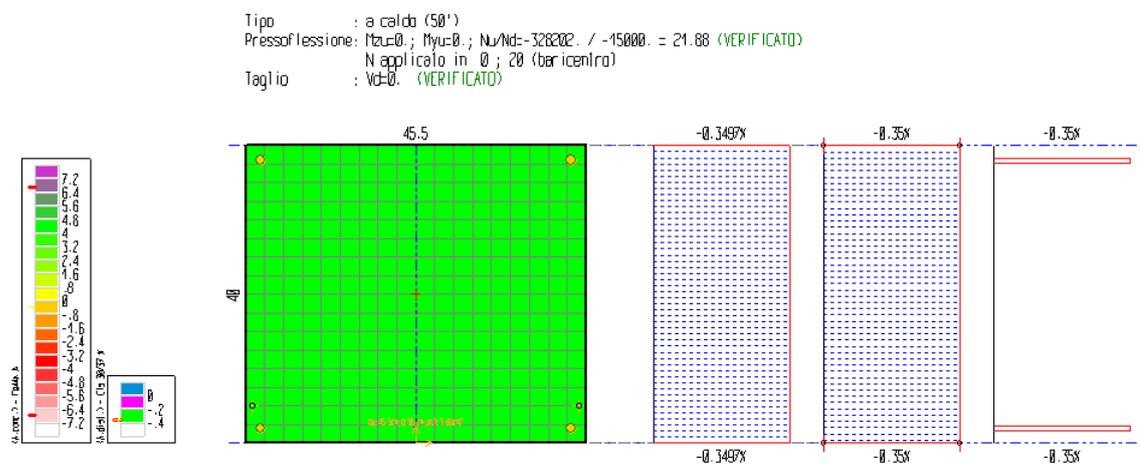


Fig.36 §6. – Verifica a flessione, a caldo (50 minuti)

Si è ricercato il valore di rottura della sollecitazione N, in corrispondenza dei valori agenti delle altre sollecitazioni. Il rapporto tra il valore di rottura della sollecitazione (pedice "ult") e quello agente di calcolo (pedice "d") è pari a:

$$\frac{N_{ult}}{N_d} = 21,88$$

**Verifiche a compressione soddisfatte.**

## 6.7 Analisi di sensibilità: influenza delle resistenze meccaniche dei materiali

Le considerazioni sono analoghe al §5.8, ma trattandosi di curve naturali, **per ciascuna sezione del §6.6, è stata determinato il fattore di sicurezza delle verifiche, variando le resistenze dei materiali ( $R_{ck}$  e  $f_{yk}$ )**. Ciò è dovuto al fatto che le curve termiche non presentano in questo caso andamento logaritmico monotono crescente.

## 6.7.1 Trave a T – DE5

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		-
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	Fattore di sicurezza
<b>FC = 1.35</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>0,98</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>1,22</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>1,50</b>
<b>FC = 1.20</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>1,11</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>1,37</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>1,70</b>
<b>FC = 1.00</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>1,33</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>1,65</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>2,04</b>

Fig.37 §6. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

## 6.7.2 Tegolo H=25 cm – 45 c

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		-
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	Fattore di sicurezza
<b>FC = 1.35</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>0,28</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>0,35</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>0,43</b>
<b>FC = 1.20</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>0,31</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>0,39</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>0,48</b>
<b>FC = 1.00</b>	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	<b>0,37</b>
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	<b>0,47</b>
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	<b>0,57</b>

Fig.38 §6. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

## 6.7.3 Tegolo H=25 cm – 45 e

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		-
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	Fattore di sicurezza
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	1,08
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	1,35
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	1,67
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	1,22
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	1,52
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	1,88
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	1,46
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	1,82
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	2,25

Fig.39 §6. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

## 6.7.4 Pilastro rettangolare 45,5x50 – C4

	1990	Calcestruzzo		Acciaio		-
	Percentili [%]	Rc [MPa]	Rck [MPa]	fy [MPa]	fyk [MPa]	Fattore di sicurezza
FC = 1.35	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	8,99
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	21,54
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	38,61
FC = 1.20	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	9,91
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	24,23
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	43,43
FC = 1.00	5%	21,89	12,25	403,50	390,13	11,89
	50%	39,15	29,51	496,50	483,13	29,08
	95%	62,63	52,99	609,40	596,03	52,12

Fig.40 §6. – Analisi di sensibilità parametri di resistenza dei materiali

Si osserva quanto emerso già nel §5.8: le analisi di sensibilità **riconfermano il soddisfacimento delle verifiche con esito positivo**, indipendentemente dai valori di resistenza adottati, ma **non consentono di risolvere le problematiche connesse alle verifiche con esito negativo**.

## 6.8 Estrapolazione dei risultati delle verifiche strutturali

Scopo del seguente paragrafo è estrapolare i risultati ottenuti nel §6.6, in cui, come anticipato, sono stati verificati in via diretta soltanto alcuni elementi strutturali. In particolare, si può osservare che:

- per quanto concerne gli **elementi trave**, il soddisfacimento della verifica di resistenza al fuoco per l'elemento DE5 è **condizione sufficiente per estendere i risultati alle restanti travi non analizzate: CD5 e DE6**. Infatti, la trave DE5 non solo risulta la più sollecitata termicamente (si rimanda alla Fig.21 §6.), ma è anche stata verificata in riferimento al sestetto sollecitazionale più gravoso nell'ambito delle travi a T del caso studio ( $Mz_d = 159,04$  kN m). Inoltre, ipotizzando che all'interno del *Magazzino 1+2*, non esistano scenari (plausibilmente verificabili) in grado di sollecitare termicamente un elemento trave più di quanto fatto dallo scenario B nei confronti della Trave DE5, allora può concludersi che: **tutte le travi a T del compartimento considerato, rientrano nella soluzione alternativa** per il livello di prestazione III della strategia di Resistenza al fuoco [7];
- riguardo gli **elementi tegolo**, come si osserva al paragrafo 6.6.2, per l'elemento 45 c non risultano soddisfatte le verifiche di resistenza al fuoco con curve naturali. **Pertanto si può concludere lo stesso anche per i tegoli 45 g, 45 h, 45 b, 56 b, 56 c**, i quali presentano curve naturali T-t più gravose (si rimanda alla Fig.22 §6.). Quindi la sola eccezione è rappresentata dal tegolo 45 e, per il quale la verifica a flessione ha mostrato esito positivo;
- infine, per quanto concerne gli **elementi pilastro**, possono ripetersi considerazioni simili a quelle fatte per l'elemento trave. Il soddisfacimento della verifica di resistenza al fuoco per l'elemento C4 è **condizione sufficiente per estendere i risultati ai restanti pilastri non analizzati: C5, D4, D5, D6, E5, E6**. I motivi sono gli stessi individuati per l'elemento trave: curva naturale più gravosa e sestetto di sollecitazioni maggiore.

## **CAPITOLO VII**

---

### **CONCLUSIONI**

**L'incendio rappresenta spesso una criticità per gli edifici esistenti, come la maggior parte dei capannoni industriali in cemento armato**, soprattutto se datati e costruiti senza particolari accorgimenti in merito alla Resistenza al Fuoco. Sebbene la natura maggiormente isolante del materiale impiegato, renda tali capannoni meno sensibili agli effetti della temperatura rispetto a quelli in acciaio, la presenza di copriferro sottili o la scarsa resistenza meccanica dell'acciaio d'armatura, può rendere gli elementi strutturali in c.a. ugualmente vulnerabili al fuoco.

Mentre in passato l'incendio veniva considerato una sciagura inevitabile, oggi le normative antincendio consentono di trattarlo come un **evento controllabile, tale da poterne ridurre il rischio e mitigare gli effetti**. Nella presente Relazione di Tesi si è analizzata la Sicurezza Strutturale in caso d'incendio secondo il **D.M. 3 agosto 2015**, divenuto il testo normativo di riferimento per tutte le attività soggette e non normate, in seguito agli aggiornamenti introdotti dal D.M. 12 aprile 2019.

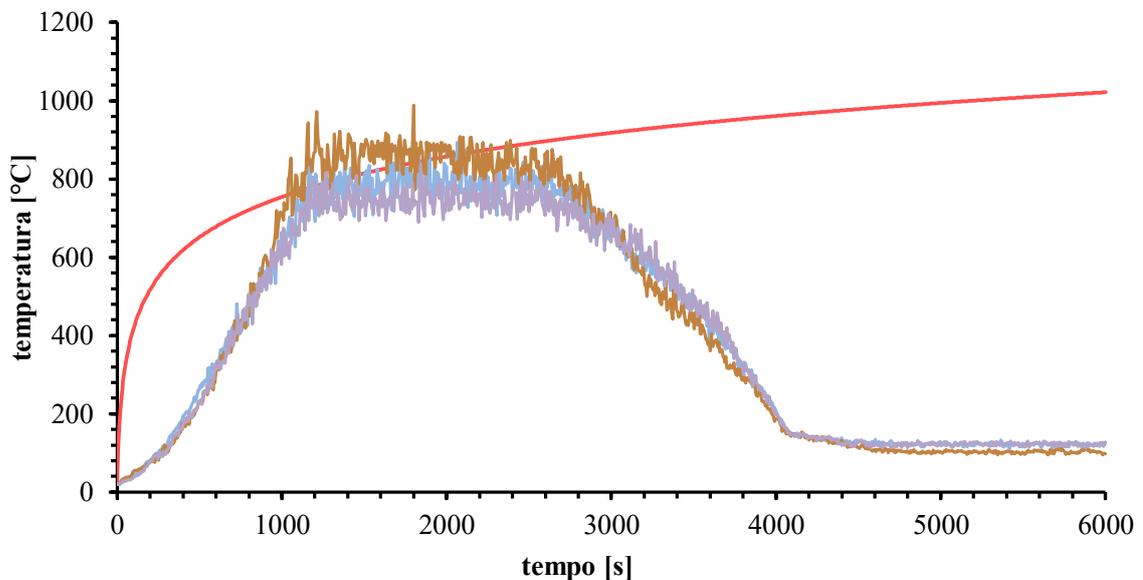
In particolare, la trattazione di un caso applicativo reale ha consentito di confrontare le due soluzioni progettuali previste nell'ambito del livello di prestazione III per la strategia S.2 Resistenza al fuoco: **approccio prescrittivo**, ovvero soluzione conforme, ed **approccio prestazionale**, ovvero soluzione alternativa.

**Come emerge dai risultati ottenuti, l'applicazione dell'approccio prescrittivo può mettere a dura prova il soddisfacimento delle verifiche di resistenza a caldo**, portando nella maggior parte dei casi all'adozione di sistemi di protezione passiva quali pitture intumescenti, intonaci ignifughi, controsoffitti antincendio. Tali soluzioni, perseguono l'obiettivo di adeguamento al fuoco, ma spesso solo a fronte di un elevato costo di intervento o di tempi di posa non trascurabili. Senza considerare le problematiche connesse alla compatibilità con altri elementi architettonici presenti (nel caso dei controsoffitti). Le difficoltà nel soddisfare le verifiche con approccio prescrittivo sono da ricercarsi sia nell'obbligo di utilizzare le curve nominali d'incendio (esempio curva UNI 834), spesso eccessivamente gravose, sia nelle elevate classi di Resistenza al fuoco che si riscontrano negli edifici industriali. Classi, che rappresentano peraltro, il riferimento temporale per le verifiche in caso di soluzione conforme.

Ad esempio, nel caso del capannone industriale trattato, non solo si è dovuta prevedere l'applicazione di un sistema di protezione passiva, ma è anche risultato necessario attenuare la classe di Resistenza al fuoco (da R240 a R120) mediante:

- riduzione del carico di incendio specifico  $q_f$  ;
- aumento del livello di prestazione per la strategia S.9 "Operatività antincendio" da III a IV.

In alternativa all’approccio prescrittivo, nell’ambito dell’adeguamento antincendio di un edificio industriale, è possibile ricorrere alle soluzioni alternative mediante l’utilizzo dell’approccio prestazionale: Fire Safety Engineering. **Il pregio principale di tale approccio ingegneristico consiste nella determinazione delle reali curve di sollecitazione termica**, che risultano generalmente **meno gravose** delle curve nominali, in quanto ottenute come output di modellazioni d’incendio avanzate, che tengono conto delle reali condizioni ambientali, come carico di incendio, ventilazione, presenza di sistemi o impianti. Inoltre, si rammenta che nella curva nominale, la temperatura dei gas di combustione cresce continuamente nel tempo in modo logaritmico, non presentando la fase finale di decadimento, che nella realtà, invece, esiste a causa dell’esaurimento del combustibile. Ciò emerge nella Fig.21 §6., sotto richiamata a titolo di esempio, dove la curva UNI 834 è confrontata con le curve naturali ricavate con il software Pyrosim.



*Richiamo “Fig.21 §6. – Curve naturali T-t per elementi di tipo Trave”*

Nel seguito si evidenziano i risultati ottenuti dall’analisi del compartimento *Magazzino I+2* del capannone trattato. La Fire Safety Engineering ha consentito di:

- **attestare l’idoneità in termini di Resistenza al fuoco delle travi** con sezione a T;
- **riconfermare la verifica dei pilastri** rettangolari 45,5 cm x 50 cm;
- **non prevedere alcuna limitazione per la Committenza**, in termini di riduzione del carico specifico d’incendio  $q_f$ ;
- **non prevedere il passaggio al livello di prestazione IV** per la strategia S.9 “Operatività antincendio”.

Compartimento <i>Magazzino 1+2</i>		
Operazione	Approccio prescrittivo	Approccio prestazionale
Riduzione di $q_f$	necessaria X	non necessaria ✓
Operatività antincendio	necessario liv. IV X	sufficiente liv. III ✓
Verifica strutturale al fuoco PILASTRI	✓	✓
Verifica strutturale al fuoco TRAVI	X	✓
Verifica strutturale al fuoco TEGOLI	X	X

Fig.1 §7. – Confronto tra approccio prescrittivo e approccio prestazionale

Sebbene nella presente Relazione di Tesi, si siano evidenziati gli aspetti positivi connessi all’approccio prestazionale, è doveroso precisare che, **non sempre una modellazione realistica dell’incendio porta all’ottenimento di curve naturali meno gravose e quindi al soddisfacimento delle verifiche strutturali**. Basti pensare ai tegoli di copertura del caso studio trattato: i copriferro eccessivamente sottili sono risultati un valico insormontabile. Un altro elemento cruciale della FSE è il **mantenimento nel tempo delle condizioni simulate**: una variazione sostanziale delle caratteristiche dell’attività, può avere ripercussioni non trascurabili sugli scenari di incendio ipotizzati e quindi sui risultati delle simulazioni eseguite. E’ compito del Professionista antincendio individuare i parametri di input e renderli noti al Titolare dell’attività, il quale ha la responsabilità di attestarne la veridicità in fase di progettazione e di provvedere al loro mantenimento nel tempo.

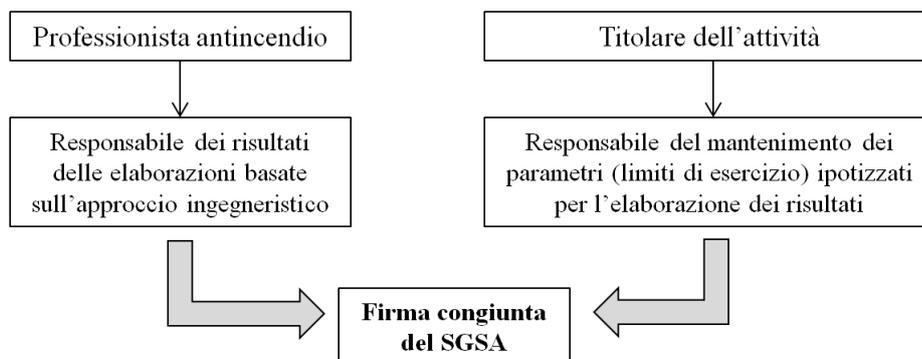


Fig.2 §7. – Schematizzazione Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio

Infine, per quanto concerne i risultati delle analisi di sensibilità, può concludersi che, sebbene la **resistenza meccanica dei materiali condizioni moderatamente le verifiche di Resistenza al fuoco**, nel caso studio trattato, **tale avvantaggiamento non è mai stato sufficiente per risolvere le problematiche** connesse alle verifiche aventi esito negativo.

## **BIBLIOGRAFIA**

---

- [1] Pietro G. Gambarova, Alessandro P. Fantilli, Sergio Tattoni (2017). *Strutture Resistenti al Fuoco – Metodi di calcolo, tecnologie e procedure per una concreta sicurezza strutturale all’incendio*. EPC Editore. Roma.
- [2] Andrew H. Buchanan, curatori Pietro G. Gambarova e Roberto Felicetti (2009). *Progetto delle strutture resistenti al fuoco*. Ulrico Hoepli Editore. Milano.
- [3] Gabriel A. Khoury (2000). *Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures*. Progress in Structural Engineering Materials, 2.
- [4] Normativa Europea EN 13381-3. *Metodo di valutazione per stabilire il contributo alla resistenza al fuoco degli elementi strutturali: protezione applicata su elementi in calcestruzzo*.
- [5] NTC 2018 (2018). *Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- [6] D.M. 9 marzo 2007 (2007). *Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco*. Gazzetta Ufficiale 29 marzo 2007, n. 74, S.O.
- [7] D.M. 3 agosto 2015 (2015). *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell’articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139*.
- [8] D.M. 9 marzo 2007 (2007). *Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco*.
- [9] D.M. 16 febbraio 2007 (2007). *Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione*.
- [10] UNI EN 1991-1-2: 2004 (2004). *Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco*.
- [11] UNI EN 1992-1-2: 2005 (2005). *Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l’incendio*.
- [12] ETAG 018. *Guideline for European technical approval of fire protective products part 1: general*.

- [13] Normativa Europea EN 13381-1. *Metodo di valutazione per stabilire il contributo alla resistenza al fuoco degli elementi strutturali: membrane protettive orizzontali.*
- [14] D.P.R. n.151 (2011). *Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi, a norma dell'articolo 49 comma 4-quater, decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122.*
- [15] D.M. 12 aprile 2019 (2019). *Modifiche al decreto 3 agosto 2015, recante l'approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.*
- [16] D.M. 10 marzo 1998 (1998). *Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.*
- [17] D.M. 12 aprile 1996 (1996). *Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio degli impianti termici alimentati da combustibili gassosi.*
- [18] Antonio La Malfa, Salvatore La Malfa, Roberto La Malfa (2017). *Ingegneria della Sicurezza Antincendio – Progettazione con il metodo tradizionale e il codice di prevenzione incendi.* Legislazione Tecnica Editore. Roma.
- [19] C/VM2 (2014). *Verification Method: Framework for Fire Safety Design.*
- [20] Morgan J. Hurley (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.* Springer Editore. New York.
- [21] Paper: Alessandro P. Fantilli, Barbara Frigo, Bernardino Chiaia (2015). *Retrofit and conservation of historical concrete buildings in Turin (Italy).* XIII International Forum, Le Vie dei Mercanti. Aversa, Capri.
- [22] Paper: Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia. *Estimation of steel rebar in existing concrete bridges.*

## ALLEGATI

---

A.1. Classificazione di Resistenza al fuoco secondo D.M. 9 marzo 2007

Nel seguito si riporta la classificazione di Resistenza al fuoco eseguita dallo studio tecnico CDP, in conformità al *D.M. 9 marzo 2007* [6]. Nello specifico, il calcolo analitico è stato eseguito con il software ClaRaF, messo a disposizione dell'utenza, sul sito istituzionale dei Vigili del Fuoco.

**Classificazione di resistenza al fuoco delle costruzioni**

*decreto del Ministero dell'Interno 9 marzo 2007*

Progetto: ETAFELT - Edificio B - magazzino 1-2

Valore orientativo del carico d'incendio specifico di progetto per materiali

$$q_{f,d} = q_f \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad [\text{MJ/m}^2]$$

Carico d'incendio specifico

Allegato elenco arredo e/o merci in deposito \*  
aggiunti alla sommatoria  $q_f = 3.000 \quad [\text{MJ/m}^2]$

Area compartimento 750  $[\text{m}^2]$

Fattore di rischio in relazione alla dimensione del compartimento

Superficie da 500 a 1000  $[\text{m}^2]$   $\delta_{q1} = 1,20$

Fattore di rischio in relazione al tipo di attività svolta

Classe di rischio II *Aree che presentano un moderato rischio di incendio come probabilità di innesco, velocità di propagazione di un incendio e possibilità di controllo dell'incendio stesso da parte delle squadre di emergenza*  $\delta_{q2} = 1,00$

Fattore di protezione

Sistemi automatici di estinzione ad acqua  $\delta_{n1} =$   
 Sistemi automatici di estinzione ad altro estinguente  $\delta_{n2} =$   
 Sistemi di evacuazione automatica di fumo e calore  $\delta_{n3} =$   
 Sistemi automatici di rilevazione, segnalazione e allarme di incendio  $\delta_{n4} = 0,85$   
 Squadra aziendale dedicata alla lotta antincendio  $\delta_{n5} = 0,90$   
 Rete idrica antincendio interna  $\delta_{n6} =$   
 Rete idrica antincendio interna e esterna  $\delta_{n7} = 0,80$   
 Percorsi protetti di accesso  $\delta_{n8} = 0,90$   
 Accessibilità ai mezzi di soccorso VV.F.  $\delta_{n9} = 0,90$

Strutture in legno

Area della superficie esposta 0  $[\text{m}^2]$   $q_f = 0 \quad [\text{MJ/m}^2]$

Velocità di carbonizzazione 0.00  $[\text{mm/min}]$

$$q_{f,d} = 3.000 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 0,50 = 1.800,00 \quad [\text{MJ/m}^2]$$

Classe di riferimento per il livello di prestazione III = **120**

Classe minima per il livello di prestazione III = **60**

## Classificazione di resistenza al fuoco delle costruzioni

*decreto del Ministero dell'Interno 9 marzo 2007*

Progetto: ETAFELT - Edificio B - Magazzino 3-4

Valore orientativo del carico d'incendio specifico di progetto per materiali

$$q_{f,d} = q_f \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad [\text{MJ/m}^2]$$

### Carico d'incendio specifico

Allegato elenco arredo e/o merci in deposito aggiunti alla sommatoria *	$q_f = 3.576$	[MJ/m <sup>2</sup> ]
Area compartimento	450	[m <sup>2</sup> ]

### Fattore di rischio in relazione alla dimensione del compartimento

Superficie	da 0 a 500	[m <sup>2</sup> ]	$\delta_{q1} =$
------------	------------	-------------------	-----------------

### Fattore di rischio in relazione al tipo di attività svolta

Classe di rischio	II	$\delta_{q2} = 1,00$	
-------------------	----	----------------------	--

*Aree che presentano un moderato rischio di incendio come probabilità di innesco, velocità di propagazione di un incendio e possibilità di controllo dell'incendio stesso da parte delle squadre di emergenza*

### Fattore di protezione

Sistemi automatici di estinzione ad acqua	$\delta_{n1} =$	
Sistemi automatici di estinzione ad altro estinguento	$\delta_{n2} =$	
Sistemi di evacuazione automatica di fumo e calore	$\delta_{n3} =$	
Sistemi automatici di rilevazione, segnalazione e allarme di incendio	$\delta_{n4} = 0,85$	
Squadra aziendale dedicata alla lotta antincendio	$\delta_{n5} = 0,90$	
Rete idrica antincendio interna	$\delta_{n6} =$	
Rete idrica antincendio interna e esterna	$\delta_{n7} = 0,80$	
Percorsi protetti di accesso	$\delta_{n8} = 0,90$	
Accessibilità ai mezzi di soccorso VV.F.	$\delta_{n9} = 0,90$	

### Strutture in legno

Area della superficie esposta	0	[m <sup>2</sup> ]	$q_f = 0$	[MJ/m <sup>2</sup> ]
Velocità di carbonizzazione	0.00	[mm/min]		

$$q_{f,d} = 3.576 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,50 = 1.788,00 \quad [\text{MJ/m}^2]$$

Classe di riferimento per il livello di prestazione III = **120**

Classe minima per il livello di prestazione III = **60**

Città, 18/10/2018

Il Professionista  
Ing Professionista

## A.2. Computo Metrico Estimativo sistemi di protezione passiva al fuoco

N.o	Descrizione	U.M.	Q.tà	Prezzo unitario	Importo totale
NP.01	<b>Fornitura e posa in opera di vernice intumescente tipo Promapaint W</b>				
	Travi a "T" zona magazzini 1-2-3. Perimetro da verniciare singola trave: 2,245 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	411,4	/	/
	Travi a "H" zona magazzino 4. Perimetro da verniciare singola trave: 3,17 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	79,1	/	/
	Tegolo H=25 cm zona magazzini 1-2-3. Perimetro da verniciare singolo tegolo: 2,91 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	1 365,7	/	/
	Tegolo H=40 cm zona magazzino 4. Perimetro da verniciare singolo tegolo: 3,84 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	200,4	/	/
	<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>2 057</b>	<b>32,00 €</b>	<b>65 814 €</b>
NP.02	<b>Fornitura e posa in opera di intonaco ignifugo Promaspray P300</b>				
	Travi a "T" zona magazzini 1-2-3. Perimetro da verniciare singola trave: 2,245 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	411,4	/	/
	Travi a "H" zona magazzino 4. Perimetro da verniciare singola trave: 3,17 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	79,1	/	/
	Tegolo H=25 cm zona magazzini 1-2-3. Perimetro da verniciare singolo tegolo: 2,91 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	1 365,7	/	/
	Tegolo H=40 cm zona magazzino 4. Perimetro da verniciare singolo tegolo: 3,84 m. Area = P * ml	m <sup>2</sup>	200,4	/	/
	<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>2 057</b>	<b>25,00 €</b>	<b>51 417 €</b>
NP.03	<b>Fornitura e posa in opera controsoffitto indipendente con 2 lastre Promatect 100x sp. 20 mm. Compresi accessori per attraversamenti impiantistici. Possibilità di installare rilevatori di fumo</b>				
	Area totale - zona <i>Magazzino 1+2 e 3+4</i>	m <sup>2</sup>	1 200,0	/	/
	<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>1 200,0</b>	<b>75,00 €</b>	<b>90 000 €</b>
NP.04	<b>Fornitura e posa in opera controsoffitto collaborante sospeso Promatect H sp.12 mm. Compresi accessori per attraversamenti impiantistici. Possibilità di installare rilevatori di fumo</b>				
	Area totale - zona <i>Magazzino 1+2 e 3+4</i>	m <sup>2</sup>	1 200,0	/	/
	<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>1 200,0</b>	<b>55,00 €</b>	<b>66 000 €</b>

## A.3. Estratti tabelle numeriche delle curve naturali di Pyrosim

Si riportano a titolo esemplificativo, alcuni estratti delle tabelle eseguite in Excel, dedicate alla rielaborazione delle curve naturali estratte come output da Pyrosim.

t	<i>scenario A</i>		<i>scenario B</i>	
	<b>T-t UNI 834</b>	<b>T-t naturale Trave CD5</b>	<b>T-t naturale Trave DE5</b>	<b>T-t naturale Trave DE6</b>
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1002	755	631	708	633
1008	755	602	695	675
1014	756	620	740	667
1020	757	647	720	605
1026	758	645	724	648
1032	759	660	724	608
1038	760	676	799	606
1044	761	703	808	597
1050	761	652	827	639
1056	762	672	854	633
1062	763	664	706	698
1068	764	674	722	687
1074	765	660	751	679
1080	766	626	791	668
1086	766	718	810	656
1092	767	749	804	655
1098	768	719	756	679
1104	769	728	774	656
1110	770	718	778	720
1116	771	746	746	725
1122	771	703	815	708
1128	772	692	756	727
1134	773	766	745	703
1140	774	732	817	669
1146	775	767	814	736
1152	775	773	901	746
1158	776	754	943	745
1164	777	820	838	693
1170	778	851	850	799

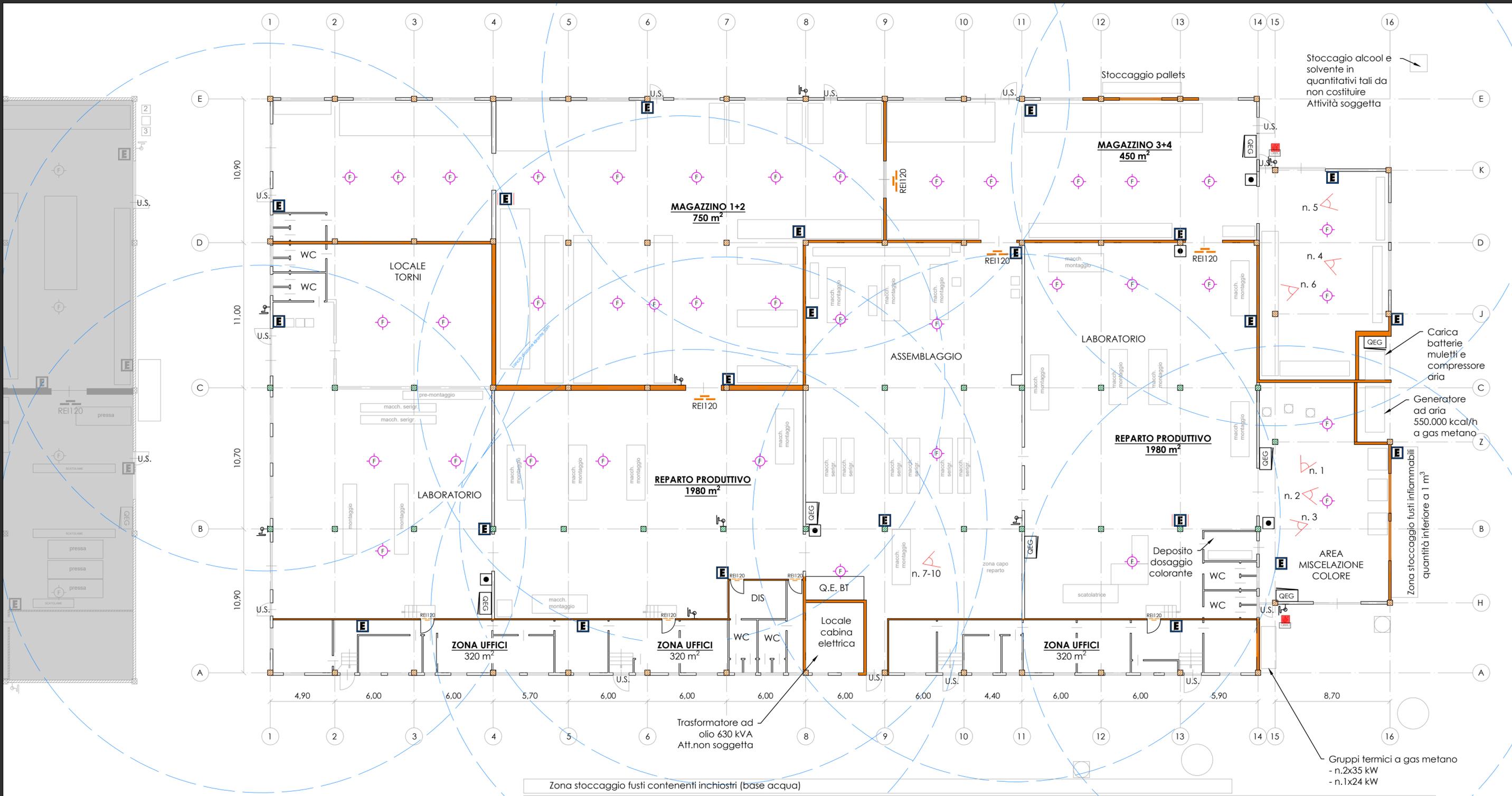
Fig.1 §A.3. – Estratto tabella numerica Excel, curve naturali per TRAVI: intervallo di estrazione 1002 s – 1170 s

t	scenario A		scenario A		scenario B		scenario B	
	T-t UNI 834	T-t naturale Tegolo 45 g	T-t naturale Tegolo 45 h	T-t naturale Tegolo 45 e	T-t naturale Tegolo 45 b	T-t naturale Tegolo 45 c	T-t naturale Tegolo 56 b	T-t naturale Tegolo 56 c
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	20	20	20	20	20	20	20	20
6	109	20	20	20	20	20	20	20
12	163	21	21	20	22	21	23	21
18	204	24	24	21	29	27	30	27
24	235	28	28	22	32	30	33	30
30	261	30	31	23	35	33	34	32
36	284	35	34	25	36	34	33	33
42	303	37	37	26	37	35	33	33
48	320	38	37	27	37	36	35	34
54	336	37	39	28	39	37	37	37
60	349	37	42	30	40	38	39	38
66	362	38	43	32	41	39	38	39
72	374	40	44	33	41	39	39	40
78	385	42	44	35	43	40	40	39
84	395	43	46	36	44	43	41	41
90	404	47	49	38	49	46	41	41

Fig.2 §A.3. – Estratto tabella numerica Excel, curve naturali per TEGOLI: intervallo di estrazione 0 s – 90 s

t	scenario A		scenario A		scenario B		scenario B	
	T-t UNI 834	T-t naturale Pilastro D5	T-t naturale Pilastro C5	T-t naturale Pilastro D4	T-t naturale Pilastro C4	T-t naturale Pilastro E5	T-t naturale Pilastro E6	T-t naturale Pilastro D6
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
744	710	338	421	313	476	57	59	312
750	711	350	436	320	502	57	60	299
756	713	366	431	345	468	58	62	321
762	714	335	453	317	538	60	62	331
768	715	361	439	318	482	60	63	328
774	716	368	443	363	514	61	65	344
780	717	377	461	408	581	62	66	339
786	718	379	443	384	588	63	67	339
792	720	384	453	409	564	63	66	342
798	721	362	466	373	548	64	66	318
804	722	375	471	424	505	64	67	323
810	723	361	451	374	520	64	68	357
816	724	369	459	408	536	65	69	368
822	725	341	464	363	644	66	68	356
828	726	374	466	388	645	67	69	330
834	727	378	490	395	600	67	73	358
840	728	389	472	408	622	68	75	394
846	729	373	485	395	615	70	75	397

Fig.3 §A.3. – Estratto tabella numerica Excel, curve naturali per PILASTRI: intervallo di estrazione 744 s – 846 s



SIMBOLO	DESCRIZIONE	SIMBOLO	DESCRIZIONE
	Idrante UNI 45 (Raggio d'azione 20 m)		Pulsante allarme antincendio
	Estintore polivalente di classe 34A - 233B		Cassoni plastici con materie prime e semilavorati
	Estintore polivalente carrellato di classe 34A - 233B		Macchinari
	Elemento separante EI 120		Coni ottici del rilievo fotografico §5.3.
	Elemento portante R 120		Quadro elettrico generale
	Elemento portante R 30		Zona non di pertinenza
	Porte e portoni EI 120		Fusti con coloranti a base acquosa
	Rivelatore di fumo		Uscita di sicurezza



**POLITECNICO DI TORINO**  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile  
Tesi di Laurea Magistrale

**SCALA GRAFICA**  
1:200

**UNITA' DI MISURA**  
metri m

**TAVOLA GRAFICA ALLEGATA**  
Strategia S.2 Resistenza al fuoco post interventi §5.9.  
Strategia S.3 Compartimentazione (4 comp. totali)  
Strategia S.6 Controllo dell'incendio  
Strategia S.7 Rivelazione ed allarme  
Indicazione coni ottici del rilievo fotografico §5.3.



**TITOLO DELLA TESI**  
Resistenza strutturale al fuoco dei capannoni industriali in c.a. -  
Approccio prescrittivo e prestazionale secondo D.M. 3 agosto 2015

**RELATORI**  
Alessandro P. Fantilli    Roberto Vancetti

**COLLABORAZIONI**  
 

**CANDIDATO**  
Simone Mineo