

ALLEGATO 1

ANALISI DELLE STRUTTURE PORTANTI DI UN MAGAZZINO ADIBITO ALLO STOCCAGGIO DI MATERIALE PLASTICO SOTTO L'AZIONE DELLA CURVA D'INCENDIO NATURALE

Centro Plastica
Via Galileo Galilei 10
30035 Mirano (VE)

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE	3
2 NORME DI RIFERIMENTO	6
3 SCELTA DEL SOFTWARE DI CALCOLO – SAFIR 2014	7
3.1 ANALISI TERMICA	8
3.1.1 METODO DI RISOLUZIONE	9
3.1.2 PROPRIETA' TERMICHE DELL'ACCIAIO DA ARMATURA E DA CARPENTERIA	10
3.1.3 PROPRIETA' TERMICHE DEL CALCESTRUZZO	12
3.2. ANALISI MECCANICA	13
3.2.1 METODO DI RISOLUZIONE	14
3.2.2 RELAZIONI TENSIONI-DEFORMAZIONI DEL CALCESTRUZZO E DELL'ACCIAIO DA ARMATURA	14
3.2.3 RELAZIONI TENSIONI-DEFORMAZIONI DELL'ACCIAIO DA CARPENTERIA	15
3.3. DISCRETIZZAZIONE DELLA STRUTTURA	16
4 ANALISI DELLE STRUTTURE	21
4.1 MODELLO DI CALCOLO	22
4.2 AZIONI SULLA STRUTTURA IN CONDIZIONE INCENDIO	24
4.2.1 AZIONI MECCANICHE	24
4.2.2 AZIONI TERMICHE	26
4.3 VERIFICHE STRUTTURALI	39
4.3.1 RISULTATI	39
4.4 CONSIDERAZIONI FINALI	45

1 INTRODUZIONE

Scopo del presente documento è l'analisi del comportamento meccanico, sotto l'azione di una curva di incendio naturale, delle strutture portanti realizzanti un magazzino, costituente apposito compartimento, adibito allo stoccaggio di materiali plastici in forma granulare, di proprietà della ditta Serioplast S.p.A. sito in Via Galileo Galilei n.10 Mirano – Venezia.

In figura 1 si riporta l'individuazione in azzurro del fabbricato sopra citato; in figura 2 si riporta la pianta del capannone industriale sito in Via Galileo Galilei, 10 a Mirano (VE), con l'individuazione in rosso del magazzino oggetto di studio.

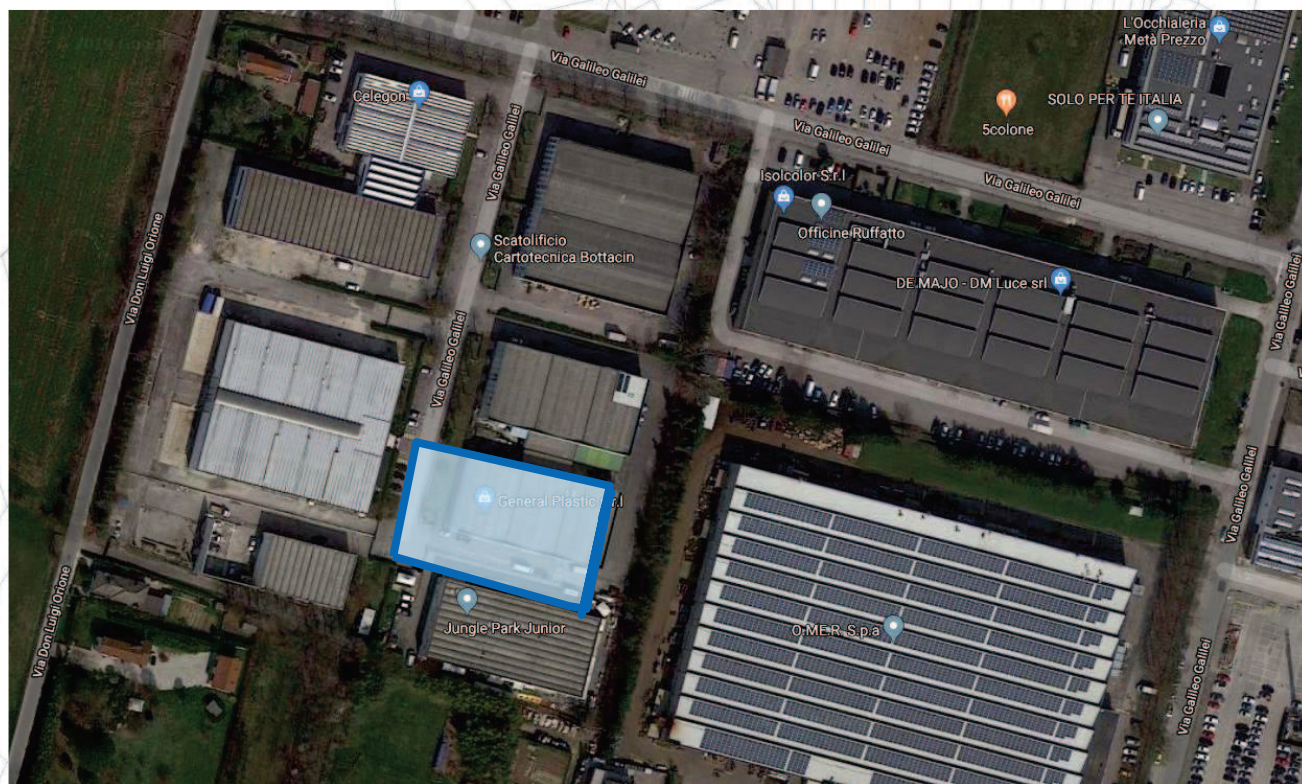


Figura 1 – Inquadramento generale – Centro Plastica, Mirano (VE).

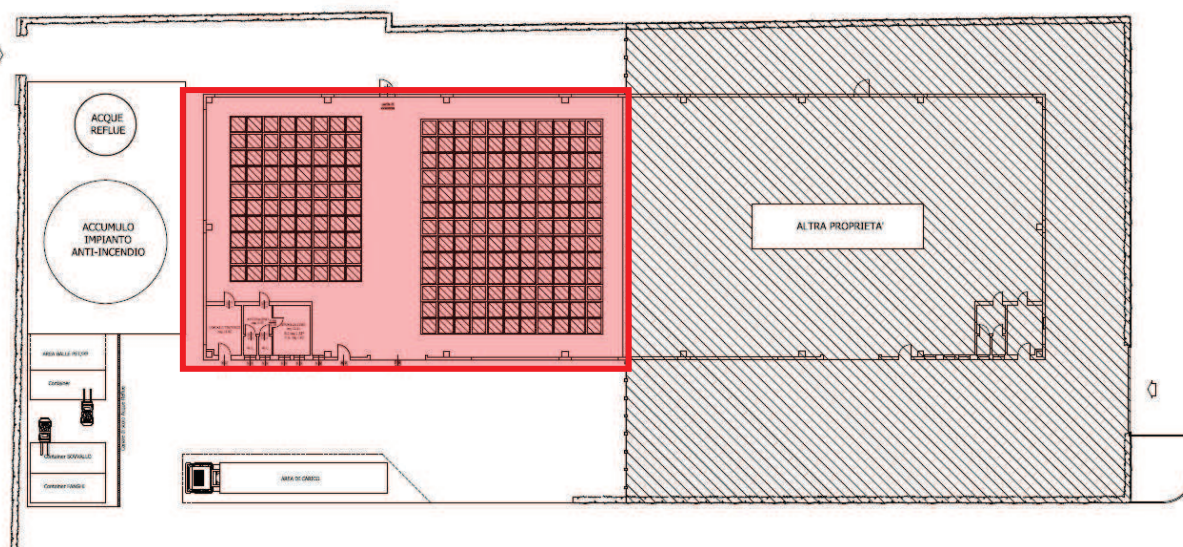


Figura 2 – Pianta Capannone industriale – Individuazione in rosso del magazzino oggetto di studio.

SCOPO DELL'ANALISI:

Come già illustrato al punto 2.1 del documento *“Soluzione alternativa per la strategia antincendio S2 – Resistenza al Fuoco del DM 03.08.2015”*, al magazzino in oggetto, in relazione alla **misura S2 della Resistenza al Fuoco** di cui al Codice di Prevenzione Incendi – D.M. 3 Agosto 2015, viene attribuito un **Livello di prestazione III**:

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.

In conformità al punto S.2.4.8. del suddetto Codice, il raggiungimento del pertinente Livello di Prestazione della Misura S2 – Resistenza al Fuoco, viene garantito con il ricorso ad una soluzione progettuale alternativa, sviluppata attraverso i metodi M1 *“Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio”* ed M2 *“Scenari di incendio per la progettazione prestazionale”*. Il conseguimento della soluzione alternativa prevista per il Livello III di Prestazione risulta rappresentato dal mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo alla durata dell'incendio.

L'analisi prevederà la verifica che le strutture portanti del magazzino in questione, sito in Via Galileo Galilei, n.10 nel Comune di Mirano (VE), soggette alla curva naturale di incendio, mantengano, per effetto dell'azione esercitata dall'impianto di spegnimento automatico sprinkler, le proprie

caratteristiche meccaniche di stabilità all'azione del fuoco per un periodo congruo alla durata dell'incendio.

In altre parole occorre verificare che la struttura non raggiunga il collasso per effetto delle azioni termiche e meccaniche generate dai carichi statici e dal carico termico, per tutta la durata dell'incendio.

Le curve naturali d'incendio sono state ricavate mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico, in conformità al D.M 3 Agosto 2015, illustrato all'interno del documento *"Soluzione alternativa per la strategia antincendio S2 – Resistenza al Fuoco del DM 03.08.2015"*. Con riferimento a tale relazione, sono state prese in considerazione le curve di incendio naturale relative allo scenario d'incendio S2 indagato secondo 3 posizioni dell'innesco termico, ovvero:

- **Scenario di incendio S2 – Innesco A** rappresentativo di un incendio che ha origine alla base del materiale stoccato all'interno dell'Area A;
- **Scenario di incendio S2 – Innesco B** rappresentativo di un incendio che ha origine alla base del materiale stoccato all'interno dell'Area B;
- **Scenario di incendio S2 – Innesco C** rappresentativo di un incendio che ha origine in corrispondenza di un carrello elevatore.

Di seguito si riportano le posizioni in pianta dei differenti inneschi per lo scenario d'incendio S2.

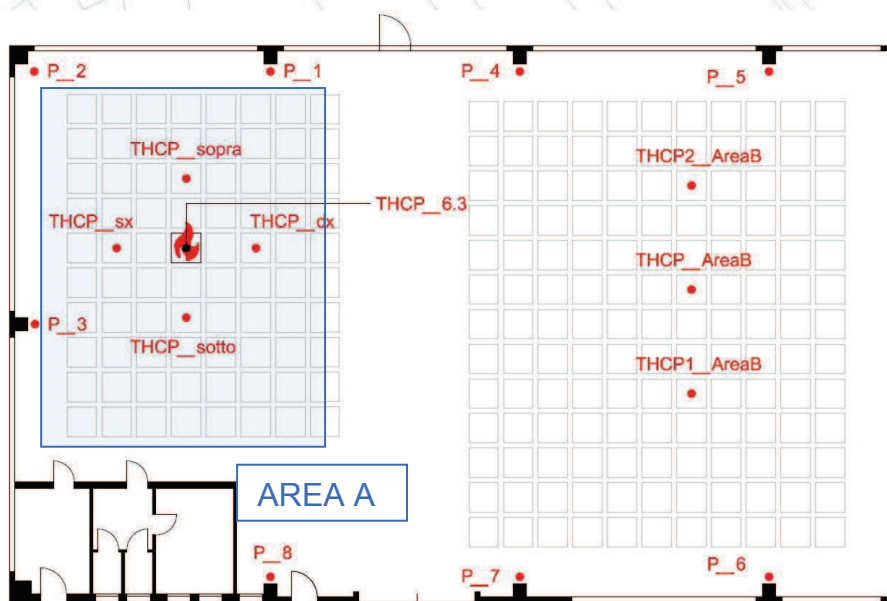


Figura 3 – Scenario d'incendio S2 – Innesco A.

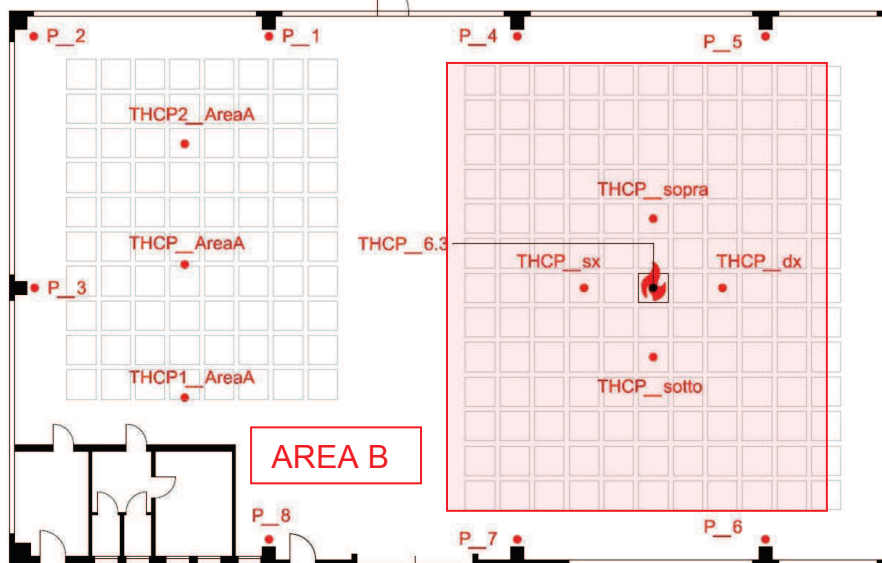


Figura 4 – Scenario d’incendio S2 – Innesco B.

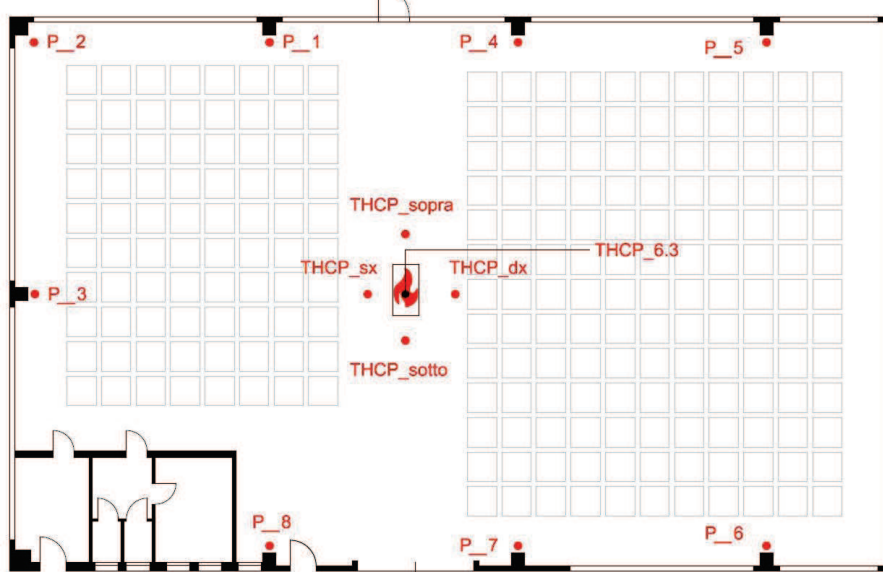


Figura 5 – Scenario d’incendio S2 – Innesco c.

2 NORME DI RIFERIMENTO

Nell’effettuare l’analisi si è preso quale riferimento principale il **Codice di Prevenzione Incendi - D.M. 03.08.2015**.

All’interno del DM 03.08.2015, riportante nel dettaglio nella “Sezione M – Metodi” la descrizione della metodologia di progettazione dell’Ingegneria della sicurezza antincendio (o *progettazione antincendio prestazionale*), al paragrafo S.2.8 del “Capitolo S.2 – Resistenza al fuoco” si individuano i criteri generali di progettazione strutturale in caso di incendio:

1. La capacità del sistema strutturale in caso di incendio si determina sulla base della capacità portante propria degli elementi strutturali singoli, di porzioni di struttura o dell'intero sistema costruttivo, comprese le condizioni di carico e di vincolo, tenendo conto della eventuale presenza di materiali protettivi.
2. Le deformazioni ed espansioni imposte o impedita dovute ai cambiamenti di temperatura per effetto dell'esposizione al fuoco producono sollecitazioni indirette, forze e momenti nei singoli elementi strutturali, che devono essere tenuti in considerazione, ad eccezione dei seguenti casi:
 - a. È riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli;
 - b. I requisiti di sicurezza all'incendio sono valutati in riferimento ad una curva nominale d'incendio.
3. Nel progetto e nelle verifiche di sicurezza all'incendio si deve tener conto della combinazione dei carichi per azioni eccezionali prevista nelle vigenti NTC.

Ne deriva che l'analisi strutturale di uno scenario di incendio schematizzato con un incendio naturale deve necessariamente essere condotta mediante un modello di calcolo che tenga conto, in presenza di elevate temperature:

- delle variazioni delle proprietà meccaniche dei materiali;
- degli effetti delle non linearità geometriche;
- degli effetti delle non linearità del materiale.

Per quanto riguarda l'analisi strutturale e le proprietà termiche/meccaniche dell'acciaio al variare delle temperature si è fatto riferimento alle seguenti normative:

- **UNI EN 1990 “Eurocodice – Criteri generali di progettazione strutturale”;**
- **UNI EN 1991-1-2 EUROCODICE 1” Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco”;**
- **UNI EN 1992-1-2 EUROCODICE 2 “Progettazione delle strutture in calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione della resistenza all'incendio”;**
- **D.M. 17/01/2018 – “Norme tecniche per le costruzioni”.**

3 SCELTA DEL SOFTWARE DI CALCOLO – SAFIR 2014

Sulla base delle considerazioni esposte al capitolo 2, l'analisi delle strutture in esame verrà condotta mediante l'utilizzo del codice di calcolo SAFIR2014.

SAFIR2014 è un software per l'analisi strutturale ad elevate temperature, basato sul metodo degli elementi finiti e sviluppato presso l'Università di Liegi in Belgio.

SAFIR2014 è in grado di modellare le temperature ed il comportamento strutturale di strutture mono-, bi- e tri-dimensionali, sottoposte ad incendi definiti dall'utente attraverso la discretizzazione della struttura, della sezione e del tempo.

Il programma prevede due step fondamentali nell'analisi di strutture soggette ad elevate temperature: l'analisi termica e l'analisi meccanica.

3.1 ANALISI TERMICA

Per quanto concerne l'analisi termica il software permette di determinare l'andamento nel tempo delle temperature nella sezione sottoposta ad una determinata curva incendio (ISO 834 o una curva incendio definita dall'utente), tenendo in considerazione la variazione delle proprietà termofisiche dei materiali con la temperatura. Il campo termico all'interno dei componenti della struttura viene valutato risolvendo il corrispondente problema di propagazione del calore, tenendo conto del trasferimento di calore per irraggiamento e convezione dei gas di combustione alla superficie esterna degli elementi e considerando l'eventuale presenza di materiali protettivi.

La distribuzione delle temperature all'interno della struttura viene calcolata risolvendo analiticamente l'equazione di FOURIER della trasmissione del calore, sotto le seguenti ipotesi:

- i materiali sono considerati isotropici, non soggetti a movimenti, incompressibili e non presentano dissipazioni meccaniche;
- assenza di dissipazione termica per contatto all'interfaccia di materiali adiacenti.

L'equazione di FOURIER, sviluppata in un sistema cartesiano di riferimento, presenta la seguente forma:

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

dove:

k = conduttività termica [W/mK] ;

T = temperatura [K] ;

x, y, z = coordinate [m] ;

Q = flusso di calore generato internamente [W/m³] ;

C = calore specifico [J/kgK] ;

ρ = massa volumica [kg/m³] ;

t = tempo [s]

Lo scambio termico tra la superficie dell'elemento e l'ambiente è per ipotesi di tipo convettivo e radiante. Il flusso di calore netto trasmesso per convezione e irraggiamento su una superficie viene modellato in accordo alle raccomandazioni della norma UNI EN 1991-1-2: 2002 – Sezione 3, tenendo quindi in considerazione sia il contributo convettivo che quello radiante, in accordo alla seguente equazione:

$$q_n = h \cdot (T_g - T_s) + \sigma \cdot \epsilon^* \cdot (T_g^4 - T_s^4)$$

dove:

h = coefficiente di convezione [W/m² K];

OSS.NE. In accordo alla norma UNI EN 1991-1-2:2002 – Sezione 3, se si usa una delle curve nominali tempo-temperatura, sulla superficie esposta direttamente al fuoco:

$$h = 25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Mentre, sul lato non esposto direttamente al fuoco di elementi di separazione, $h = 4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ oppure $h = 9 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ quando si assume contenga gli effetti del trasferimento di calore per irraggiamento.

T_g = temperatura dei gas, fornita negli input iniziali come funzione del tempo [K];

OSS.NE. La curva di variazione della temperatura dei gas è quella riportata in precedenza

T_s = temperatura sulla superficie dell'elemento [K];

σ = costante di Stefan – Boltzman, pari a $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$;
= emissività relativa del materiale [K];

OSS.NE. Se non figura il materiale relativo si può assumere $\varepsilon_m = 0,8$. Nel caso del calcestruzzo, in aggiunta alla EN 1991-1-2, l'emissività relativa alla superficie di calcestruzzo, secondo l'EC2, può essere assunta pari a $\varepsilon_m = 0,7$.

3.1.1 METODO DI RISOLUZIONE

Il calcolo delle temperature all'interno dell'elemento viene condotto trasformando l'equazione di FOURIER in una forma idonea per il metodo agli elementi finiti, come di seguito riportato:

$$[K]\{T\} + [C]\{T^*\} = \{g\}$$

dove:

$[K]$ è la matrice di conduttività

$[C]$ è la matrice di capacità

$\{T^*\}$ è il vettore della temperatura ai nodi

$\{g\}$ è il vettore che tiene in considerazione lo scambio di calore sulla superficie dell'elemento

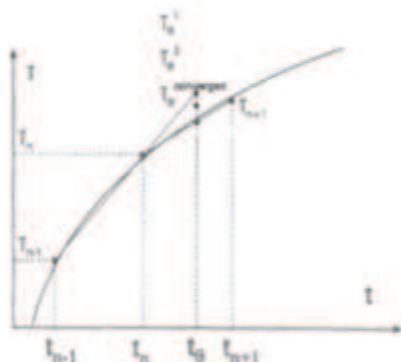
Al fine di determinare l'evoluzione delle temperature all'interno dell'elemento, l'equazione di cui sopra viene integrata da SAFIR mediante la formulazione implicita, in cui la temperatura dell'elemento i -esimo al tempo t è funzione della temperatura dello stesso all'istante precedente t ed altresì dipendente dalle temperature dei nodi vicini all'istante t .

Viene assunto che la temperatura dei nodi vari linearmente col tempo da uno step a quello successivo, perciò, detta T_n la soluzione nota all'istante t_n e T_{n+1} è la soluzione ricercata all'istante successivo t_{n+1} , questa ipotesi si esprime tramite:

$$T_\theta = T_n + \theta \cdot (T_{n+1} - T_n)$$

dove θ , variabile tra 0 e 1, è scelto a piacere.

Una prima approssimazione della soluzione all'istante $t_\theta = t_n + \theta \Delta T$ può essere facilmente ottenuta mediante estrapolazione lineare dei risultati ottenuti ai due istanti precedenti, come illustrato nell'immagine seguente:



Se la prima soluzione, identificata con il termine T_θ^1 fosse la soluzione esatta, soddisferebbe l'equazione di Fourier precedentemente riportata. Poiché tale soluzione non è quella esatta, viene introdotto un residuo tramite la seguente equazione:

$$r(T_\theta^1) = KT_\theta^1 + C \frac{T_\theta^1 - T_n}{\theta \Delta t} - g \neq 0$$

La correzione che deve essere applicata per migliorare la prima approssimazione della soluzione si ottiene esprimendo il nuovo residuo mediante uno sviluppo lineare di Newton ed imponendo che tale sviluppo sia uguale a zero:

$$r(T_\theta^2) = r(T_\theta^1 + \Delta T_\theta^1) = r(T_\theta^1) + \frac{\partial r}{\partial T} \Delta T_\theta^1 = 0$$

da cui:

La convergenza verso la soluzione può richiedere alcune iterazioni. Il processo iterativo è ripetuto fino a che i valori del residuo e delle correzioni fatte alle temperature raggiungono un valore ragionevolmente trascurabile.

3.1.2 PROPRIETA' TERMICHE DELL'ACCIAIO DA ARMATURA E DA CARPENTERIA

All'interno del codice di calcolo sono implementate le proprietà termofisiche dell'acciaio da armatura e da carpenteria variabili con la temperatura, in conformità con quanto indicato nelle norme UNI EN 1992-1-2 e UNI EN 1993-1-2.

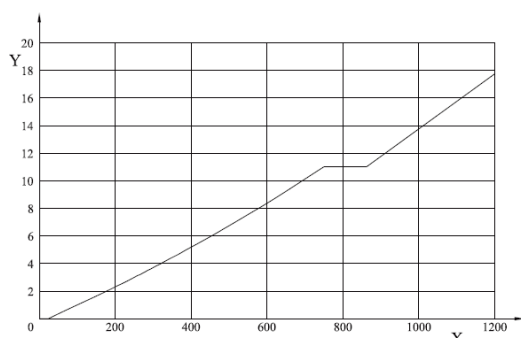
Nello specifico:

Dilatazione termica

La deformazione termica dell'acciaio $\varepsilon_s(\theta)$ si può determinare con riferimento alla lunghezza a 20°C come segue:

Dilatazione termica relativa di un acciaio al carbonio in funzione della temperatura

Legenda
X Temperatura [°C]
Y Dilatazione relativa $\Delta l/l$ [$\times 10^{-3}$]



Dilatazione termica totale dell'acciaio da armatura

Dilatazione termica

(1) Si raccomanda che la dilatazione termica relativa dell'acciaio $\Delta l/l$ sia determinata da quanto segue:

- per $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (3.1a)$$

- per $750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (3.1b)$$

- per $860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (3.1c)$$

dove:

l è la lunghezza a 20 °C;

Δl è la dilatazione termica;

θ_a è la temperatura dell'acciaio [°C].

Calore specifico

(1) Si raccomanda che il calore specifico dell'acciaio c_a sia determinato da quanto segue:

- per $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (3.2a)$$

- per $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13\,002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \quad (3.2b)$$

- per $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17\,820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \quad (3.2c)$$

- per $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \quad (3.2d)$$

dove:

θ_a è la temperatura dell'acciaio [°C]

Il limite superiore della conduttività termica λ_c del calcestruzzo ordinario può essere ricavato dalla:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100)^2 \text{ watt per metro kelvin} \quad \text{per } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

dove:

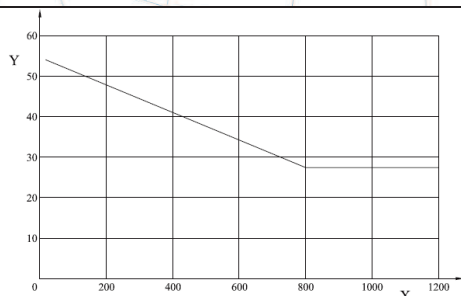
θ è la temperatura del calcestruzzo.

Il limite inferiore della conduttività termica λ_c del calcestruzzo ordinario può essere ricavato dalla:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100)^2 \text{ watt per metro kelvin} \quad \text{per } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

dove:

θ è la temperatura del calcestruzzo.

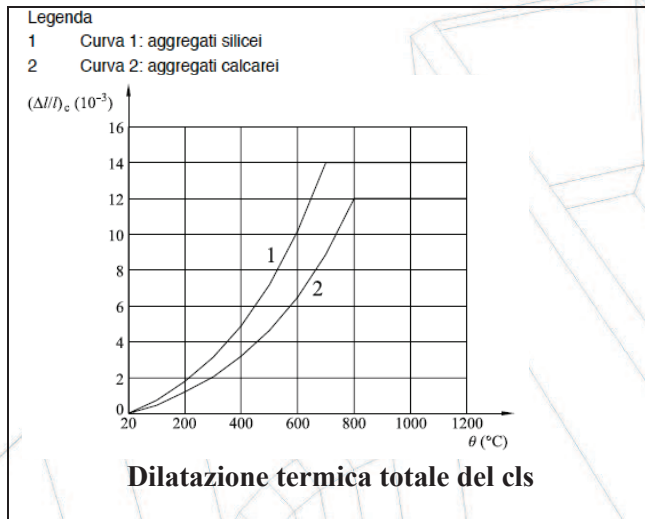


Conduttività termica dell'acciaio

3.1.3 PROPRIETÀ TERMICHE DEL CALCESTRUZZO

➤ Dilatazione termica

La deformazione termica del calcestruzzo $\varepsilon_c(\theta)$ si può determinare con riferimento alla lunghezza a 20°C come segue:



Aggregati silicei:

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

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

Aggregati calcarei:

$$\varepsilon_c(\theta) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{per } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 805^{\circ}\text{C}$$

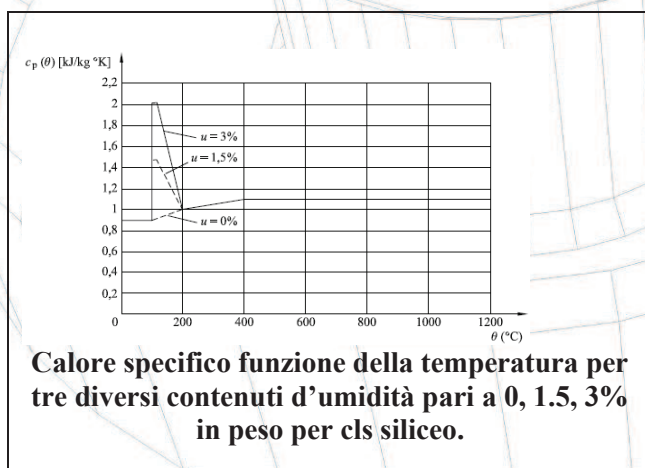
$$\varepsilon_c(\theta) = 12 \times 10^{-3} \quad \text{per } 805^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

dove:

θ è la temperatura del calcestruzzo in gradi centigradi.

➤ Calore specifico

Il calore specifico $c_p(\theta)$ del calcestruzzo secco ($u=0\%$) si può determinare come segue:



Aggregati silicei e calcarei:

$$c_p(\theta) = 900 \text{ (joule per kilogrammo kelvin)} \quad \text{per } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$$

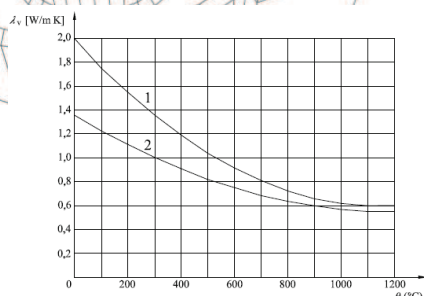
$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (joule per kilogrammo kelvin)} \quad \text{per } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (joule per kilogrammo kelvin)} \quad \text{per } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$c_p(\theta) = 1100 \text{ (joule per kilogrammo kelvin)} \quad \text{per } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

➤ Conduttività termica

La conduttività termica λ_c del calcestruzzo può essere determinata tra un valore limite inferiore ed un valore limite superiore.



Conducibilità termica del cls

Il limite superiore della conducibilità termica λ_c del calcestruzzo ordinario può essere ricavato dalla:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100)^2 \text{ watt per metro kelvin per } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

dove:

θ è la temperatura del calcestruzzo.

Il limite inferiore della conducibilità termica λ_c del calcestruzzo ordinario può essere ricavato dalla:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100)^2 \text{ watt per metro kelvin per } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

dove:

θ è la temperatura del calcestruzzo.

3.2. ANALISI MECCANICA

Nell'analisi strutturale sono tenuti in conto sia gli effetti delle deformazioni termiche e dei vincoli termici sia le proprietà meccaniche dei materiali, variabili con la temperatura. Nel software sono infatti implementati i legami costitutivi tensione-deformazione dei materiali, variabili non linearmente in funzione della temperatura.

Il codice di calcolo esegue l'analisi in condizioni di grandi spostamenti della struttura sottoposta all'azione dell'incendio.

La base di tale analisi è costituita dalla formulazione incrementale del Principio dei Lavori Virtuali:

$$\int_V (D_{ijkl} dE_{kl} \delta E_{ij} + S_{ij} \delta dE_{ij}) dV = \int_V (df_i \delta u_i + f_i \delta u_i) dV$$

dove:

V è volume indeformato dell'elemento;

S_{ij} è il tensore delle tensioni secondo Piola - Kirchhoff

D_{ijkl} è il tensore che definisce il legame costitutivo del materiale

δE_{ij} è il tensore di Green del campo virtuale di spostamento, pari a:

$$\delta E_{ij} = \frac{1}{2} (\delta u_{i,j} + \delta u_{j,i} + u_{k,i} \delta u_{k,j} + \delta u_{k,i} u_{k,j})$$

f_i sono le forze di volume;

δu_i è il campo virtuale degli spostamenti dalla posizione deformata dell'elemento.

In un materiale la cui temperatura varia con il trascorrere del tempo, il legame costitutivo è dato da:

$$dS_{ij} = D_{ijkl} (dE_{kl} - dE_{kl}^{\text{th}}) = D_{ijkl} dE_{kl}^{\text{m}}$$

dove:

dE_{ϵ}^{th} è il tensore della deformazione termica

dE_{ϵ}^m è il tensore della deformazione meccanica

3.2.1 METODO DI RISOLUZIONE

Al fine di risolvere l'analisi del principio dei lavori virtuali in una forma idonea per il metodo agli elementi finiti, il campo di spostamenti è rappresentato in maniera approssimata con il campo discretizzato u , a sua volta dipendente dal campo di spostamenti dei nodi p mediante appropriate funzioni di forma N .

$$u = Np$$

Questo permette di ricavare il tensore delle deformazioni incrementali in funzione degli spostamenti nodali, tramite la seguente relazione:

$$de = Bd p$$

dove la matrice B contiene non solo le derivate spaziali delle funzioni di forma nell'ipotesi di piccoli spostamenti, ma anche gli spostamenti nodali diversi da 0 nella configurazione ruotata.

L'equazione matriciale che governa l'iterazione da una posizione di equilibrio alla successiva è la seguente:

$$\int_V B^T DB dV dp + \int_V S^T \delta de dV dp = (K_u + K_s) dp = f^{ext} - f^{int}$$

dove:

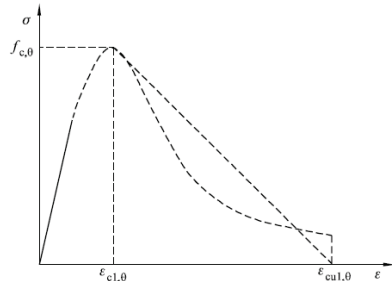
K_u comprende le matrici di rigidezza lineare elastica e geometrica;

K_s è la matrice di rigidezza delle tensioni

3.2.2 RELAZIONI TENSIONI-DEFORMAZIONI DEL CALCESTRUZZO E DELL'ACCIAIO DA ARMATURA

All'interno del codice di calcolo è implementato il modello matematico dei legami costitutivi per il calcestruzzo compresso e per l'acciaio da armatura ad elevate temperature, in conformità con quanto indicato nella norma UNI EN 1992-1-2.

Nello specifico:

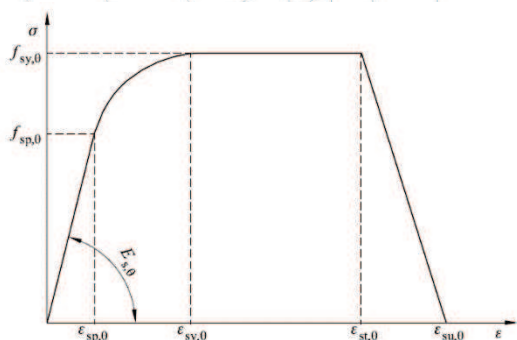


Intervallo	Sforzi $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,0}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1(\theta)} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	Si raccomanda di adottare un ramo discendente a fini numerici. Sono consentiti modelli lineari o non lineari.

Acciaio da armatura

All'interno del codice di calcolo è implementato il modello matematico dei legami costitutivi per l'acciaio da carpenteria ad elevate temperature, in conformità con quanto indicato nella norma UNI EN 1992-1-2.

Nello specifico:



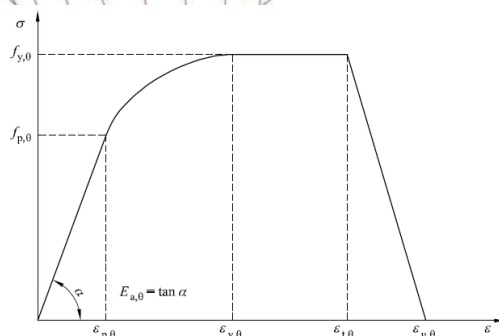
Intervallo	Sforzi $\sigma(\theta)$	Modulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} + c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0.5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	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	-
Parametro ¹⁾	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Acciaio da pretensione di Classe A: $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Funzioni	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

¹⁾ I valori per i parametri $\varepsilon_{pt,\theta}$ e $\varepsilon_{cu,\theta}$ per l'acciaio da pretensione si possono prendere dal prospetto 3.3. L'acciaio da pretensione di Classe A è definito nell'appendice C della EN 1992-1-1.

Modello matematico dei legami costitutivi per l'acciaio di armatura e da pretensione - UNI EN 1992-1-2

3.2.3 RELAZIONI TENSIONI-DEFORMAZIONI DELL'ACCIAIO DA CARPENTERIA

All'interno del codice di calcolo è implementato il modello matematico dei legami costitutivi per l'acciaio da carpenteria ad elevate temperature, in conformità con quanto indicato nella norma UNI EN 1993-1-2. Nello specifico:



Intervallo di tensioni	Tensione σ	Modulo tangente
$\sigma \leq \sigma_{y,0}$	$\sigma E_{s,0}$	$E_{s,0}$
$\sigma_{y,0} < \sigma < \sigma_{u,0}$	$f_{y,0} - c + (b/a)[a^2 - (\sigma_{y,0} - \sigma)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\sigma_{y,0} - \sigma)}{a[a^2 - (\sigma_{y,0} - \sigma)^2]^{0.5}}$
$\sigma_{y,0} \leq \sigma \leq \sigma_{u,0}$	$f_{y,0}$	0
$\sigma_{u,0} < \sigma < \sigma_{u,0}$	$f_{y,0}[1 - (\sigma - \sigma_{u,0})/(\sigma_{u,0} - \sigma_{y,0})]$	-
$\sigma = \sigma_{u,0}$	0,00	-
Parametri	$\sigma_{y,0} = f_{y,0}/E_{s,0}$ $\sigma_{y,0} = 0,02$ $\sigma_{u,0} = 0,15$ $\sigma_{u,0} = 0,20$	
Funzioni	$a^2 = (\sigma_{y,0} - \sigma_{u,0})(\sigma_{y,0} - \sigma_{u,0} + c/E_{s,0})$ $b^2 = c(\sigma_{y,0} - \sigma_{u,0})E_{s,0} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,0} - f_{u,0})^2}{(\sigma_{y,0} - \sigma_{u,0})E_{s,0} - 2(f_{y,0} - f_{u,0})}$	

prospetto 3.1 Fattori di riduzione per la relazione tensione-deformazione di un acciaio al carbonio a temperature elevate

Temperatura dell'acciaio θ_s	Fattori di riduzione alla temperatura θ_s relativi ai valori di f_y o E_s a 20 °C		
	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per la resistenza di snervamento effettiva $k_{y,s} = f_{y,s}/f_y$	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per il limite di proporzionalità $k_{p,s} = f_{p,s}/f_y$	Fattore di riduzione (relativo a E_s) per la pendenza del ramo lineare elastico $k_{E,s} = E_{s,s}/E_s$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

Nota: Per valori intermedi della temperatura dell'acciaio è consentita l'interpolazione lineare.

3.3. DISCRETIZZAZIONE DELLA STRUTTURA

Il codice di calcolo SAFIR 2014 permette di discretizzare la struttura mediante elementi tipo beam (trave) a 3 nodi, truss (bielle) a 2 nodi e shell.

Elemento Truss

Un elemento *Truss* è un elemento monodimensionale avente sezione trasversale di area costante A. Lo spostamento assiale dell'elemento è lineare e la deformazione risulta costante e pari a:

$$E_{xx} = \frac{L^2 - L_0^2}{L_0^2}$$

Dove:

L = lunghezza dell'elemento deformato

L_0 = lunghezza iniziale

La forza interna f_x prodotta dalla tensione assiale S_{xx} è data dalla seguente equazione:

$$f_x^{int} = -AS_{xx} \frac{L}{L_0}$$

Le due matrici di rigidezza sono date dalle seguenti equazioni:

$$K_u = E_t A \frac{L^2}{L_0^3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_S = S_{xx} \frac{A}{L_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Elemento Beam

Un elemento *Beam* è un elemento monodimensionale, avente sezione trasversale costante, compreso tra un nodo iniziale e uno finale. Ognuno di questi nodi finali è dotato di 7 gradi di libertà: 3 traslazioni, 3 rotazioni e 1 deformazione.

Si considerano le seguenti ipotesi:

- Ipotesi di Bernoulli: durante l'inflessione della trave le sezioni trasversali piane rimangono piane e normali alle fibre longitudinali deformate; tale ipotesi è valida se la flessione non è accompagnata da taglio.
- Ipotesi di Von Karman: le deformazioni sono trascurabili $\frac{\partial u}{\partial x} \ll 1$
- Le rotazioni sono piccole
 $\sin \alpha \cong \alpha \quad \cos \alpha \cong 1$
- Ipotesi di Vlassov: una trave sottoposta a torsione pura subisce una deformazione di ingobbamento, la cui ampiezza è proporzionale all'incremento dell'angolo di torsione.

Le deformazioni sono date dalle equazioni seguenti:

$$E_{xx} = u' - y(v'' - z_c \psi'') - z(w'' + y_c \psi'') - yw'' \psi + zv'' \psi - \omega \psi'' + \frac{1}{2}(v'^2 + w'^2 + [y^2 + z^2]\psi'^2)$$

$$E_{xy} = -\frac{1}{2} \psi' \left(z - z_c + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

$$E_{xz} = \frac{1}{2} \psi' \left(y - y_c + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)$$

Dove:

u, v, w = spostamenti della linea nodale, espressi mediante funzioni polinomiali del terzo ordine per v e w e del secondo ordine per u;

ψ = rotazione lungo l'asse longitudinale;

ω = funzione di ingobbamento;

y, z = coordinate della sezione;

y_c, z_c = coordinate del centro di torsione introdotte dall'utente.

Le tensioni e le rigidezze della sezione vengono valutate mediante il modello a fibre, secondo il quale la sezione è composta da un certo numero di fibre parallele, e sono date, per elementi 2D, dalle seguenti equazioni:

$$N = \sum_i \sigma_i A_i$$

$$M_y = \sum_i \sigma_i y_i A_i$$

$$EA = \sum_i E_i A_i$$

$$ES_y = \sum_i E_i y_i A_i$$

$$EI_y = \sum_i E_i y_i^2 A_i$$

L'integrazione lungo l'asse longitudinale delle equazioni precedenti viene eseguita mediante l'integrazione numerica di Gauss, per la quale l'utente sceglie il numero di punti di integrazione da utilizzare; è prassi comune usare 2 punti di integrazione.

Nell'integrazione si tiene conto inoltre della rigidezza torsionale, data dalla seguente equazione:

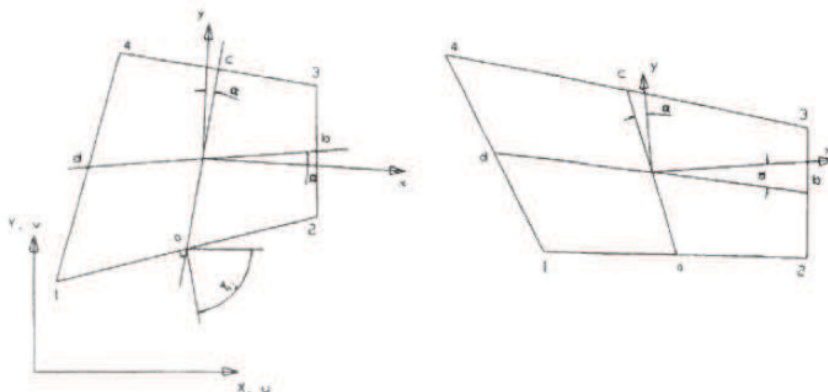
$$GC_t = \int_{\Omega} G \left[\left(y - y_c + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 + \left(z - z_c + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega$$

La rigidezza torsionale viene calcolata dal software Safir durante l'analisi termica e si suppone che non cambi durante l'analisi meccanica.

Elemento shell

Un elemento *shell* è un quadrilatero avente 4 nodi, ognuno dei quali ha 3 traslazioni e 3 rotazioni.

Nella figura sono mostrati gli assi x e y; mentre l'asse z è perpendicolare alle mediane ac e bd:



Gli spostamenti u e v sono dati dalle relazioni di Allman per un elemento triangolare:

$$u = \frac{1}{4} \left[\sum_{k=1}^4 (1 + \xi \xi_k) (1 + \eta \eta_k) u_k + \sum_{sides} \phi_{ij} l_{ij} \cos \gamma_{ij} (\omega_j - \omega_i) + \sum_{sides} \psi_{ij} l_{ij} \cos \gamma_{ij} A_{ij} \right]$$

$$v = \frac{1}{4} \left[\sum_{k=1}^4 (1 + \xi \xi_k) (1 + \eta \eta_k) v_k + \sum_{sides} \phi_{ij} l_{ij} \sin \gamma_{ij} (\omega_j - \omega_i) + \sum_{sides} \psi_{ij} l_{ij} \sin \gamma_{ij} A_{ij} \right]$$

Con:

$$\phi_{12} = \frac{1}{16} (1 - \xi^2) (1 - \eta)$$

$$\phi_{23} = \frac{1}{16} (1 + \xi) (1 - \eta^2)$$

$$\phi_{34} = \frac{1}{16} (1 - \xi^2) (1 + \eta)$$

$$\phi_{41} = \frac{1}{16} (1 - \xi) (1 - \eta^2)$$

$$\psi_{12} = \frac{1}{8} (1 - \xi^2) (1 - \eta) \xi \eta^2$$

$$\psi_{23} = \frac{1}{8} (1 + \xi) (1 - \eta^2) \xi^2 \eta$$

$$\psi_{34} = -\frac{1}{8} (1 - \xi^2) (1 + \eta) \xi \eta^2$$

$$\psi_{41} = -\frac{1}{8} (1 - \xi) (1 - \eta^2) \xi^2 \eta$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

$$A_{ij} = \frac{\omega_i + \omega_j}{2} + \frac{B_{ij} + B_{ji}}{2}$$

ω_i è la rotazione nel nodo i e Y_{ij} è la normale uscente dal bordo ij . B_{ij} sono i coefficienti definiti da Jaamei e le funzioni Ψ_{ij} sono scelte in modo tale da risultare ortogonali alle funzioni ϕ_{ij} ; infine le deformazioni taglianti sono assunte costanti sull'elemento per migliorare la convergenza.

L'integrazione delle equazioni sulla sezione viene eseguita mediante l'integrazione numerica di Gauss, per la quale l'utente può scegliere il numero di punti di integrazione sullo spessore, da 2 punti se il comportamento dominante è membranale a 10 se invece è dominante la flessione.

4 ANALISI DELLE STRUTTURE

Il magazzino oggetto di studio, adibito allo stoccaggio di materiali plastici in forma granulare, occupa una porzione del capannone industriale sito in Via Galileo Galilei, n.10 nel Comune di Mirano (VE). Il deposito in esame, di proprietà della ditta Serioplast Spa, risulta diviso dall'attività adiacente mediante un'apposita parete di compartimentazione.

L'edificio si sviluppa su un unico piano fuori terra, avente superficie complessiva pari a circa 815 m² ed altezza massima, all'intradosso dei pannelli di copertura, di 6,45 m.

L'edificio ha struttura portante in cemento armato e cemento armato precompresso. Esso risulta costituito da pilastri a sezione quadrata di dimensione 50x50 cm ed altezza di 6,3 m e travi perimetrali a "T" in c.a.p., aventi luce pari a 9,65 m, poste in semplice appoggio sui pilastri. Le travi fungono a loro volta da appoggio per le travi a "Y" in c.a.p. di copertura, aventi luce pari a circa 21 m, sulle quali risultano poggiati i pannelli sandwich di copertura.

Nella figura seguente si riporta la pianta del magazzino oggetto di studio.

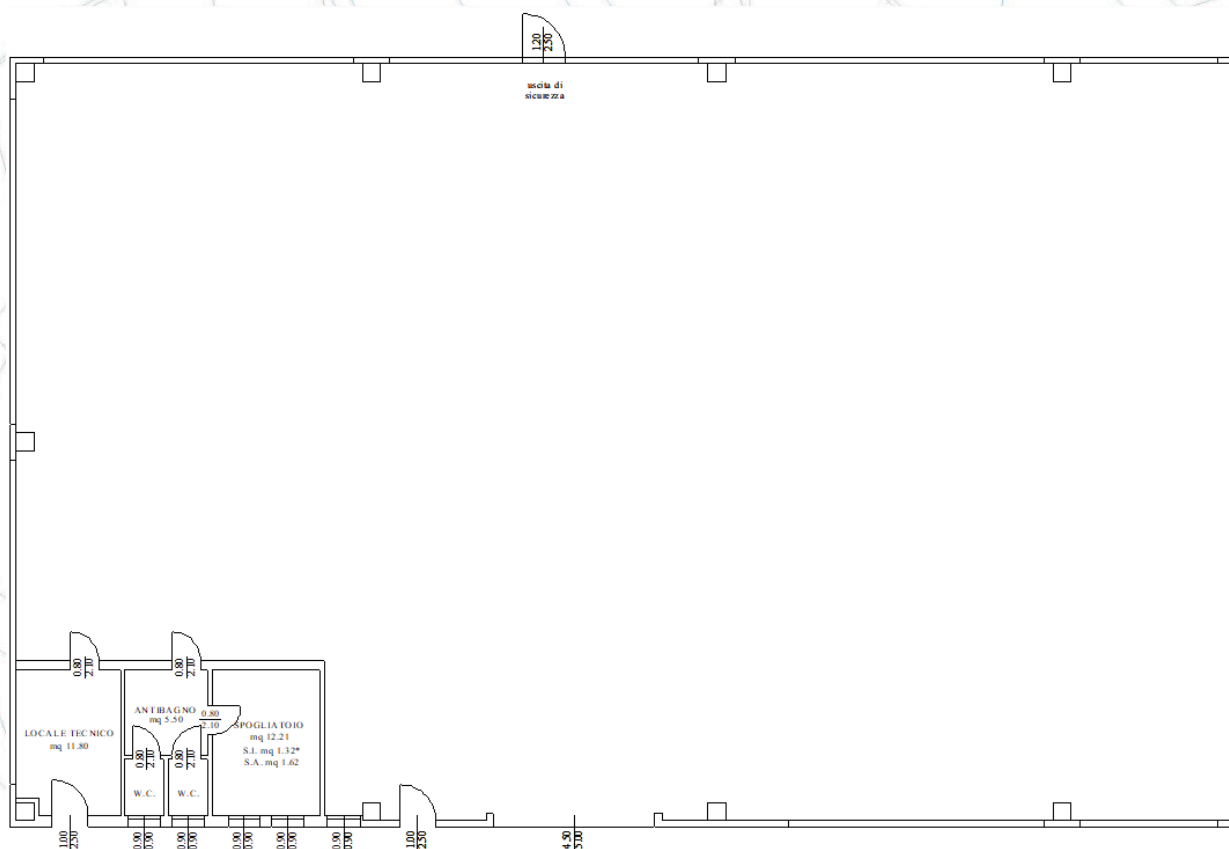


Figura 6 – Planimetria Magazzino.

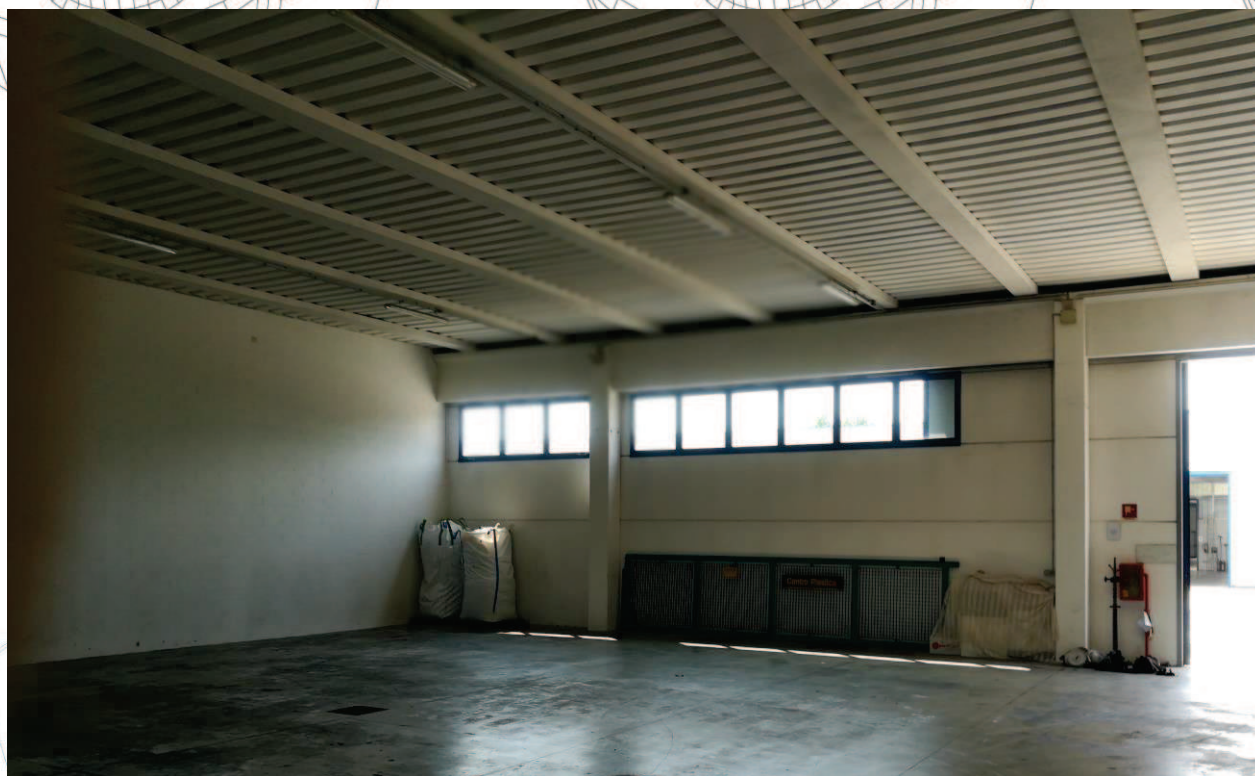


Figura 7 – Vista interna Magazzino.

4.1 MODELLO DI CALCOLO

Per analizzare il comportamento meccanico della struttura sotto l'azione della curva d'incendio naturale si è proceduto alla modellazione dell'intero magazzino oggetto di studio, opportunamente vincolato e caricato in modo da ricreare le condizioni di vincolo e di carico realmente presenti in opera.

Nell'immagine seguente si riporta lo schema del modello tridimensionale implementato nel software di calcolo, con la relativa legenda per l'individuazione delle varie tipologie strutturali presenti: