



NextFEM Designer
Modulo FireSafe

Versione 2.4

© NextFEM 2015-2024

Indice

Capitolo 1 Introduzione	3
Normativa di riferimento	3
Capitolo 2 Descrizione dell'analisi termica non lineare e validazione	4
Analisi termica	4
Origine e caratteristiche dei codici di calcolo	4
Validazione	4
Calcolo termico automatico delle sezioni	5
Verifiche dell'elemento	7
Ricoprimento sezioni – progettazione antincendio	7
Capitolo 3 Analisi a collasso	9
Validazione dell'analisi	10
Strutture in acciaio	12
Strutture in c.a.	19
Capitolo 4 Elenco delle verifiche	22
Elementi in acciaio	22
Valutazione della classe della sezione	23
Trazione/compressione (Assiale)	23
Taglio semplice (Taglio)	24
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	24
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	24
Elementi in alluminio	25
Valutazione della classe della sezione	26
Trazione/compressione (Assiale)	27
Taglio semplice (Taglio)	27
Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)	27
Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)	27
Elementi in calcestruzzo armato	28
Stabilità in compressione	29
Taglio per elementi non armati	29
Taglio per elementi armati	29
Tenso/presso/flessione	29

Capitolo 1

Introduzione

In questo manuale vengono mostrate e validate le analisi termiche e le verifiche antincendio condotte con *NextFEM Designer*.

Normativa di riferimento

Il programma implementa le seguenti norme di riferimento:

1. EN 1993-1-1: Eurocodice 3 - Progettazione di strutture in acciaio - Parte 1-1: Norme generali e regole per gli edifici
2. EN 1993-1-2: Eurocodice 3 - Progettazione di strutture in acciaio - Parte 1-2: Norme generali - Progettazione strutturale antincendio
3. EN 1992-1-1: Eurocodice 2 - Progettazione di strutture in calcestruzzo - Parte 1-1: Norme generali e norme per gli edifici
4. EN 1992-1-2: Eurocodice 2 - Progettazione di strutture in calcestruzzo - Parte 1-2: Norme generali - Progettazione strutturale degli incendi
5. Ministero delle Infrastrutture, D.M. 17-01-2018 (di seguito, NTC2018) e Allegato n. 617 del 02/02/2009
6. EN 1999-1-1: Eurocodice 9 - Progettazione di strutture in alluminio - Parte 1-1: Norme strutturali generali
7. EN 1999-1-2: Eurocodice 9 - Progettazione di strutture in alluminio - Parte 1-2: Norme generali - Progettazione strutturale antincendio

Capitolo 2

Descrizione dell'analisi termica non lineare e validazione

Nel paragrafo seguente verrà presentata una validazione per l'analisi termica condotta con *NextFEM Designer*.

Analisi termica

L'analisi viene effettuata utilizzando una metodologia di calcolo non lineare, cioè permettendo al solutore di iterare all'aumentare della temperatura applicata al lato esposto (**lato destro dell'equazione**) come condizione di Dirichlet dell'equazione di trasmissione del calore, espressa in forma matriciale di seguito:

$$\underline{C}\dot{\underline{T}} + \underline{K}\underline{T} = \underline{Q}$$

con:

\underline{T} vettore delle temperature nodali, $\dot{\underline{T}}$ la sua derivata rispetto al tempo, \underline{Q} vettore del carico termico;

C matrice di capacità, che raccoglie i valori di calore specifico di ogni elemento della mesh;

K matrice di conducibilità termica, che raccoglie i valori di conducibilità di ogni elemento della mesh.

In accordo con la norma europea EN 1992-1-2 "Progettazione di strutture in calcestruzzo - Part 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale antincendio" - Aprile 2005 (di seguito Eurocodice 2, EC2), il solutore fa variare le caratteristiche del materiale analizzato in funzione del tempo, secondo le leggi dettate dalla norma stessa. Le leggi di variazione nel tempo sono riportate normalizzate al valore unitario per la temperatura iniziale di 20°C.

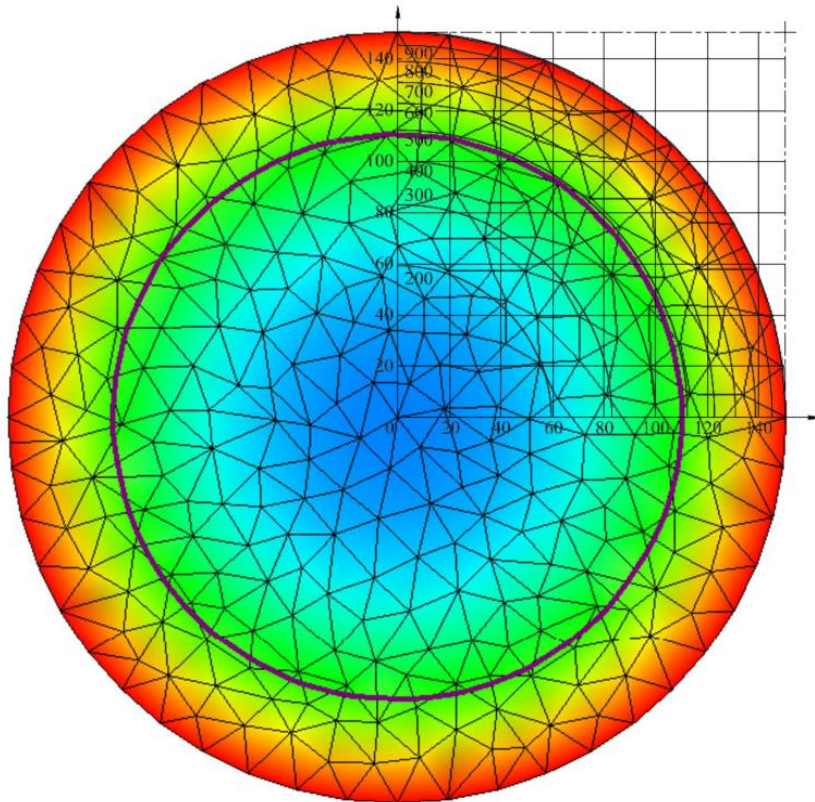
Origine e caratteristiche dei codici di calcolo

Il solutore, *OOFEM*, viene utilizzato di default per eseguire il calcolo. Altri tipi di solutori, sebbene impostabili dalle opzioni del programma, non sono supportati ai fini della validazione presentata. *OOFEM* viene concesso con licenza LGPL, riportata in [?/Informazioni su...](#) e allegata al pacchetto software. Il solutore è sviluppato dal prof. Borek Patzak, Università di Praga, e dalla comunità di oofem.org.

Validazione

Viene riportata una convalida dell'analisi termica condotta con *NextFEM Designer*. Il confronto è fatto con la figura A.18 di EC2-1-2 su una colonna circolare di calcestruzzo a $t=90$ minuti.

La linea viola rappresenta la curva isoterma per $T=500^\circ\text{C}$.



Calcolo termico automatico delle sezioni

L'analisi può essere condotta attraverso questi semplici passi:

1. ottenere le mappe termiche delle sezioni, compresa una rapida stima della forza della sezione analizzata con il comando *Risultati / Verifica al fuoco...*

The screenshot displays the NextFEM Designer v1.90 interface. The main window shows a 3D model of a steel truss structure with a color-coded stress distribution. A 'Diagrammi travi' window is open, showing a detailed view of a beam component. A 'Imposta analisi termica' dialog box is also open, showing settings for the thermal analysis.

Diagrammi travi Componente: Mzz

Color scale: 1.732 (blue), 1.250 (green), 0.767 (yellow), 0.285 (orange), -0.197 (red)

Imposta analisi termica

Impostazioni per gli elementi selezionati:

- Curve di analisi e verifica: Eurocodice 3
- Combinazione di carico: envSER QP
- Criterio di selezione della sezione: Max Myz
- Lati esposti per travi: 3 - laterali e inferiore
- Lati esposti per pilastri: 4 - tutti
- Tempo finale di analisi in minuti: 90
- Solo analisi Mostra risultati

Buttons: **Genera i modelli per la verifica**, Pulisci modelli per verifica al fuoco

Footer: Risultati: Diagrammi travi | Caso: sw | Set dati: 1 | Componente: Mzz | Fattore scala: 0.61245

Nella finestra che appare è possibile selezionare:

- *Curva incendio*: la curva di incendio per l'analisi, di default è la ISO 834 adottata da NTC e Eurocodici;
- *Combinazione di carico*: [opzionale] selezionare la combinazione di carico eccezionale utilizzata per una prima verifica speditiva, eseguita subito a valle delle analisi termiche. L'opzione è disponibile solo se il check "Solo analisi" è disattivato;
- *Criterio di selezione della sezione*: [opzionale] la sezione all'interno dell'elemento utilizzata per la verifica deve soddisfare il criterio selezionato (momento massimo M_y , momento massimo M_z , momento massimo in entrambe le direzioni M_{yz});
- *Lati esposti per travi*: specifica i lati considerati esposti all'incendio durante l'analisi per le travi;
- *Lati esposti per pilastri*: specifica i lati considerati esposti all'incendio durante l'analisi per gli elementi verticali;
- *Tempo finale di analisi in minuti*: specifica il tempo finale delle analisi termiche, che coincide con l'istante di verifica. L'opzione *Mostra risultati* visualizza l'isoterma a 500°C per ogni sezione analizzata, in una finestra separata.

Imposta analisi termica

Impostazioni per gli elementi selezionati

Curva incendio: Curva incendio NTC

Combinazione di carico:

Criterio di selezione della: Max M_{yz}

Lati esposti per travi: 3 - laterali e inferiore

Lati esposti per pilastri: 4 - tutti

Tempo finale di analisi in minuti: 90

Solo analisi Mostra risultati

Genera i modelli per la verifica

Pulisci modelli per verifica al fuoco

Se l'opzione "Solo analisi" è disattivata, il comando restituisce una tabella contenente i rapporti domanda/capacità delle sezioni analizzate nelle colonne Check-NMM (pressione e flessione) e Check-V (taglio). Le immagini relative alla verifica resistente vengono salvate nella stessa cartella del modello (rappresentazione della sezione e dell'asse neutro, dominio resistente ridotto per effetto del calore).

Eseguendo il comando "Genera i modello per la verifica", il programma salverà nella cartella del modello corrente un nuovo file NXF per ogni sezione elaborata. Tale file deve contenere i risultati dell'analisi termica per poter essere elaborato dalla successiva verifica strutturale, e deve essere conservato insieme al modello di partenza.

⚠ AVVISO: le verifiche mostra in questa fase sono condotte su un'unica sezione dell'elemento, e pertanto sono solo indicative e non sostituiscono le verifiche estese sugli elementi (vedi paragrafo successivo).

⚠ AVVISO: Le sezioni sono meshate automaticamente sulla base del valore specificato in *Strumenti / Opzioni / Dimensioni mesh*. Il valore è in *mm*.

Opzioni per mesh e output

Tolleranza per merge: 0.000100

Separatore valori: :

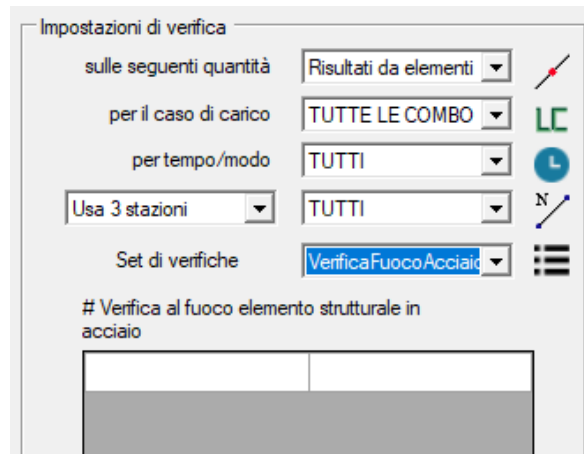
Dimensione mesh: 500 mm

Mantieni colori modello

Verifiche dell'elemento

Per verificare gli elementi, utilizzare uno dei seguenti set di verifica, in funzione del materiale della struttura:

- VerificaFuocoCA per il c.a.
- VerificaFuocoAcciaio per l'acciaio
- VerificaFuocoAlluminio per l'alluminio
- VerificaFuocoPonteggiAcciaio per i ponteggi in acciaio.



In generale, vengono fornite verifiche per la stabilità a taglio, a flessione e assiale. Vedere il capitolo 3 per un elenco completo delle verifiche.

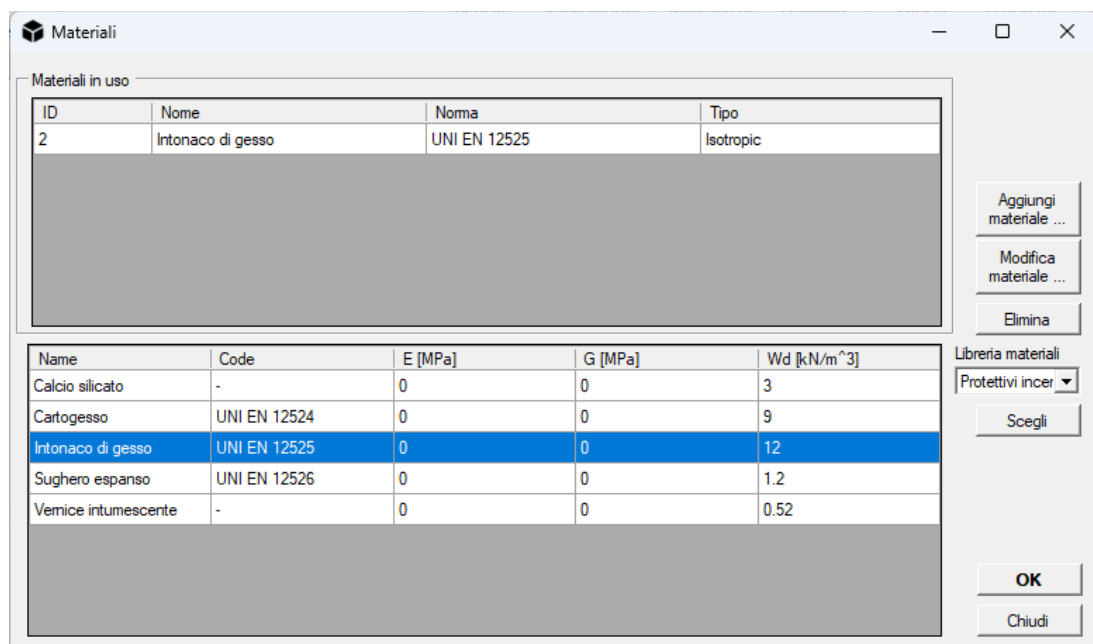
⚠️ AVVISO: L'elemento sarà verificato se il modello .NXF contenente l'analisi termica della sezione corrispondente include anche i risultati. Altrimenti, la verifica verrà interrotta.

Ricoprimento sezioni – progettazione antincendio

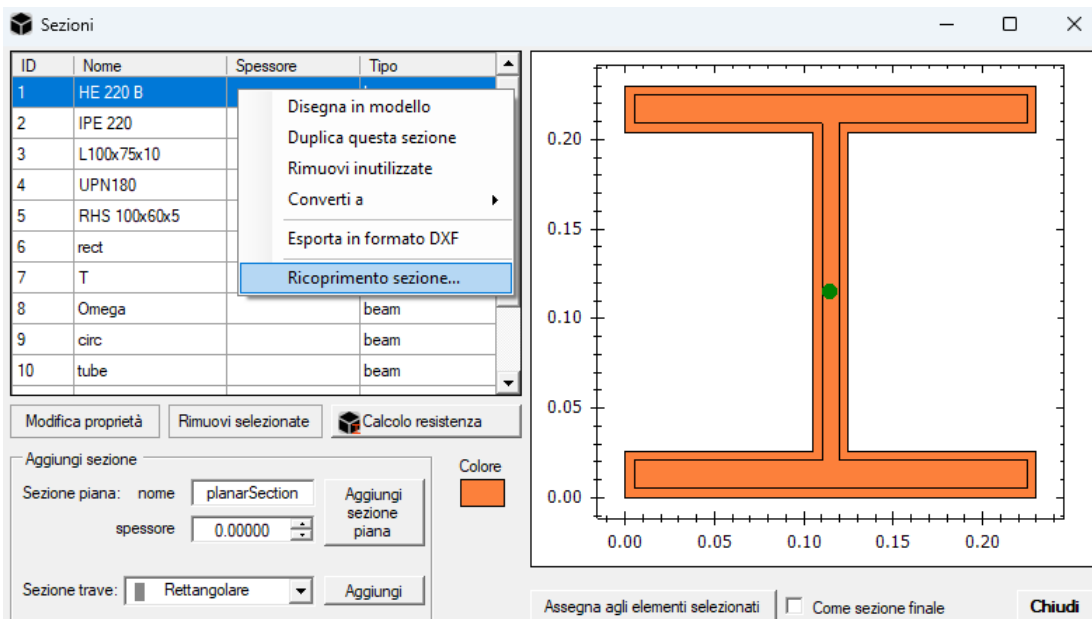
NextFEM Designer permette la verifica delle strutture esistenti mediante il procedimento descritto in precedenza.

Per verificare l'efficacia della protezione al fuoco delle strutture nei confronti del requisito R (Resistenza), è possibile svolgere l'analisi imputando lo strato protettivo (vernice, cartongesso, ecc.) direttamente alla sezione dell'elemento.

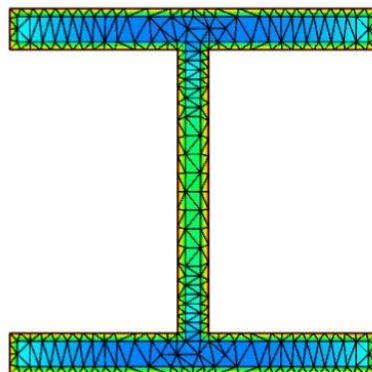
Per selezionare un materiale di ricoprimento non strutturale, selezionare dapprima *Assegna / Materiali di progetto e scegliere la libreria "Protettivi incendio"*.



In seguito, dalla maschera *Modifica / Sezioni*, applicare il rivestimento con il comando *tasto dx / Ricoprimento sezione*, specificando lo spessore quando richiesto.



Le analisi termiche condotte per quella sezione comprenderanno lo strato protettivo aggiunto, come in figura successiva. Al contempo, lo strato di rivestimento non strutturale non ha effetti nelle analisi strutturali svolte nel modello principale.



Capitolo 3

Analisi a collasso

Il Codice di Prevenzione Incendi (*DM 03 agosto 2015 e s.m.i.* – in seguito CPI) obbliga il progettista ad adottare distanze opportune fra edifici in caso di incendio: pensiamo ad esempio agli edifici **industriali in acciaio monopiano (c.d. “capannoni”)** che devono garantire per esigenze di prevenzione incendi una distanza di separazione da altri manufatti per evitare che le membrature, **nel caso di incendio e che la struttura arrivi in condizioni ultime sotto l’azione termica, collassando**, danneggino gli edifici limitrofi.

Il CPI prevede quindi che, per le strutture in Livello di Prestazione I e II, **venga eseguita l’analisi a collasso della struttura** come metodo alternativo, quando cioè la distanza di separazione necessaria non è possibile.

Facendo riferimento alla nota *DCPREV 24/07/2020 – Decreto 3 agosto 2015 e s.m.i. – Capitolo S.2 – Implementazione di soluzioni alternative di resistenza al fuoco. Chiarimenti e indirizzi e applicativi*, questo capitolo illustra le nuove analisi termomeccaniche che sono possibili in NextFEM Designer per le strutture metalliche e in c.a., utilizzando il solutore OpenSees.

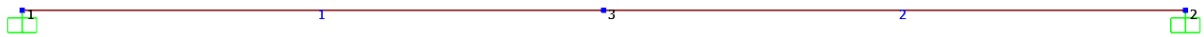
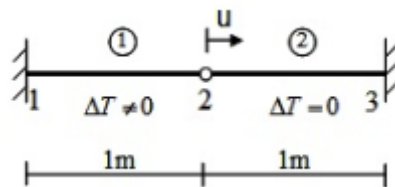
Le dilatazioni termiche sono tensioni auto-indotte **nella struttura (provocate da un “eigen-strain”, ovvero auto-deformazione)**, e l’elemento con formulazione in forza è particolarmente adatto nella gestione della convergenza e dell’affidabilità dei risultati.

A proposito di convergenza, si noti anche come il tempo in minuti della curva d’incendio standard perda di significato durante l’analisi: l’utente è libero di adottare una time-history di temperature che segue l’andamento della curva d’incendio oppure una lineare. Nel primo caso la convergenza potrebbe essere più difficile nelle prime fasi dell’analisi, a causa dell’elevata pendenza della curva ISO. Di converso, utilizzando una rampa lineare per facilitare la convergenza a parità di temperatura target, il tempo in minuti dall’inizio dell’incendio può sempre essere ricostruito dalla temperatura applicata all’istante del collasso, pertanto l’analisi conserva la sua efficacia a parità di risultati finali. Questo via è praticabile poiché l’analisi termica sezionale è disaccoppiata e viene svolta in precedenza.

Validazione dell'analisi

Diventa quindi **fondamentale** eseguire l'analisi termomeccanica sui principi della circolare DCPREV prot. n. 9962 del 24-07-2020, che impone di svolgere l'analisi fino al collasso dell'intera struttura. **A tal proposito**, l'elemento utilizzato, denominato *ForceBeamColumn3DThermal*, ha formulazione in forza, pertanto viene ricavata la matrice di flessibilità integrando le forze agenti sulle singole fibre in sezione. **Il solutore segnala l'incipiente collasso con** "*ForceBeamColumn3dThermal::update() -- could not invert flexibility for element*", che significa che non è più possibile invertire la flessibilità per ricostruire la rigidezza dell'elemento.

L'analisi termomeccanica è stata validata a partire da un esempio numerico semplice, calcolando l'espansione termica di una trave in acciaio portata ad una temperatura di 100°C. Lo schema statico prevede 2 elementi trave in serie, con incastri alle estremità, in modo da avere un nodo centrale.



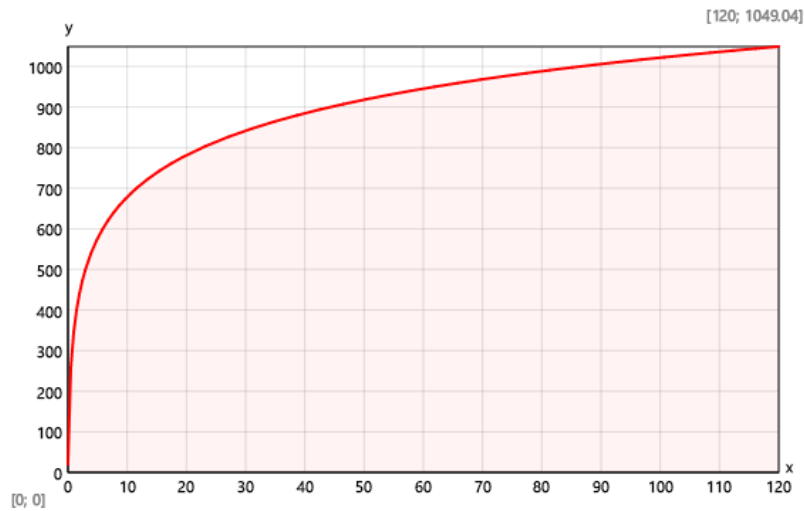
Schema statico con numerazione dei nodi e degli elementi

Solo la trave 1 è caricata con un carico termico pari a 100°C (temperatura ambiente di partenza pari a 20°C), mentre la trave 2 resta a freddo.

La soluzione analitica di questo problema è presentata nel seguito.

Curva incendio standard ISO 834 (utilizzata solo come riferimento)

$$T(x) = 20 \text{ °C} + 345 \text{ °C} \cdot \log(8 \cdot x + 1)$$



$$T(t) = 100.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_0 = 210 \text{ GPa}$$

$$E_T = 1 \cdot E_0 = 210 \text{ GPa}$$

dati trave

$$A = 400 \text{ cm}^2$$

$$\alpha = \frac{1.2 \times 10^{-5}}{^\circ\text{C}}$$

Lunghezza complessiva: $L = 2 \text{ m}$

spostamento nodo libero

$$\varepsilon = \alpha \cdot T(t) = 0.0012$$

$$\frac{\varepsilon \cdot L}{2} = 0.0012 \text{ m}$$

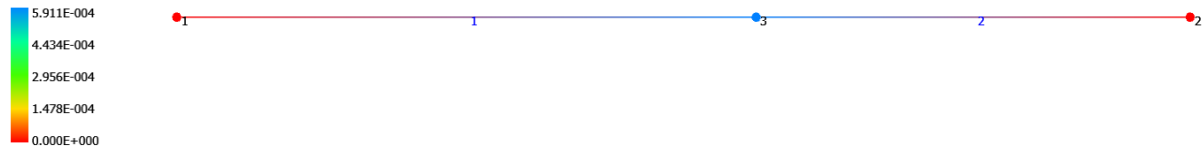
$$u = \frac{E_T \cdot A \cdot \varepsilon}{\frac{E_0 \cdot A \cdot 2}{L} + \frac{E_T \cdot A \cdot 2}{L}} = 0.601 \text{ mm}$$

Si rileva quindi una deformazione pari a 0.6mm. Avendo utilizzato una temperatura per cui è ancora valido il coefficiente di dilatazione termica lineare iniziale, è possibile confrontare la soluzione fra:

- Analisi termo-meccanica con OpenSees v3.7.0, elementi *forceBeamColumn3dThermal*:

Caso di carico: diagl-term - 1

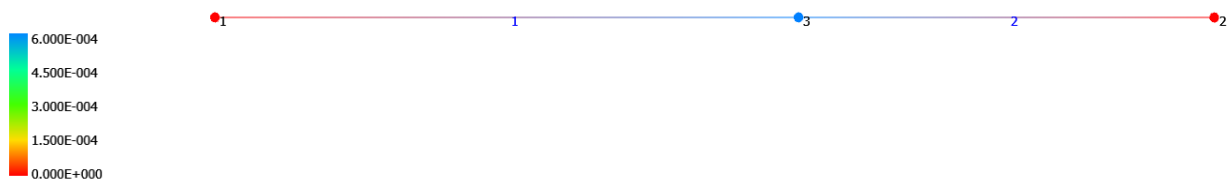
Spostamenti nodi
Componente: XYZ
[m]



- Analisi elastica con OOFEM, elementi *beam3d*:

Caso di carico: term - 1

Spostamenti nodi
Componente: XYZ
[m]



Tutti i solutori tendono al valore già evidenziato nella soluzione in forma chiusa, pertanto la validazione è soddisfatta.

Strutture in acciaio

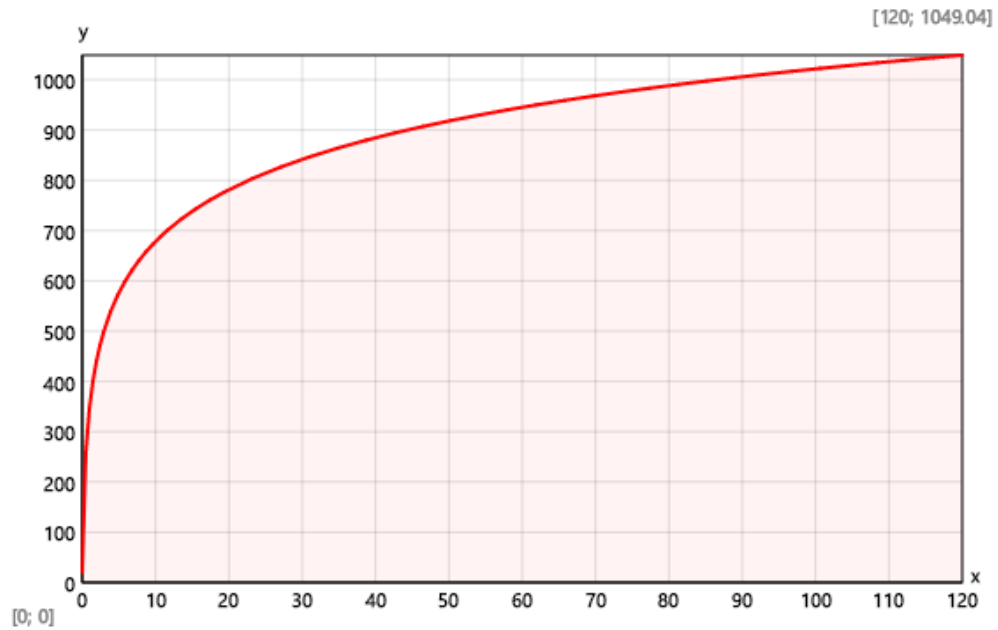
Si consideri un **edificio in acciaio** soggetto ad uno scenario d'incendio regolato dalla curva ISO 834 (curva d'incendio standard, già utilizzata in NextFEM Designer per l'analisi termica non lineare delle sezioni trasversali). È possibile usare anche curve empiriche HRR, ma per semplicità verrà adottata la curva standard, che in genere è più conservativa in assenza di idrocarburi o esplosivi.

Tempo da inizio incendio

$$t = 100 \text{ min}$$

Curva incendio standard ISO 834

$$T(x) = 20^\circ\text{C} + 345^\circ\text{C} \cdot \log(8 \cdot x + 1)$$



$$T(t) = 1021.75^\circ\text{C}$$

L'analisi termomeccanica riduce rigidezza e resistenza in funzione della temperatura dell'elemento asta/trave, concordemente a quanto dettato dall'EC3-1-2 prospetto 3-1, riportato nel seguito.

Temperatura dell'acciaio θ_a	Fattori di riduzione alla temperatura θ_a relativi ai valori di f_y o E_a a 20 °C		
	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per la resistenza di snervamento effettiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fattore di riduzione (relativo a f_y) per il limite di proporzionalità $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fattore di riduzione (relativo a E_a) per la pendenza del ramo lineare elastico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
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.

In aggiunta, viene calcolata la deformabilità di ogni fibra delle sezioni di acciaio secondo le indicazioni del par. 3.4.1.1, di cui si riporta un estratto.

3.4.1.1 Dilatazione termica

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

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

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

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

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

- per $860\text{ °C} < \theta_a \leq 1\ 200\text{ °C}$:

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

dove:

l è la lunghezza a 20 °C;

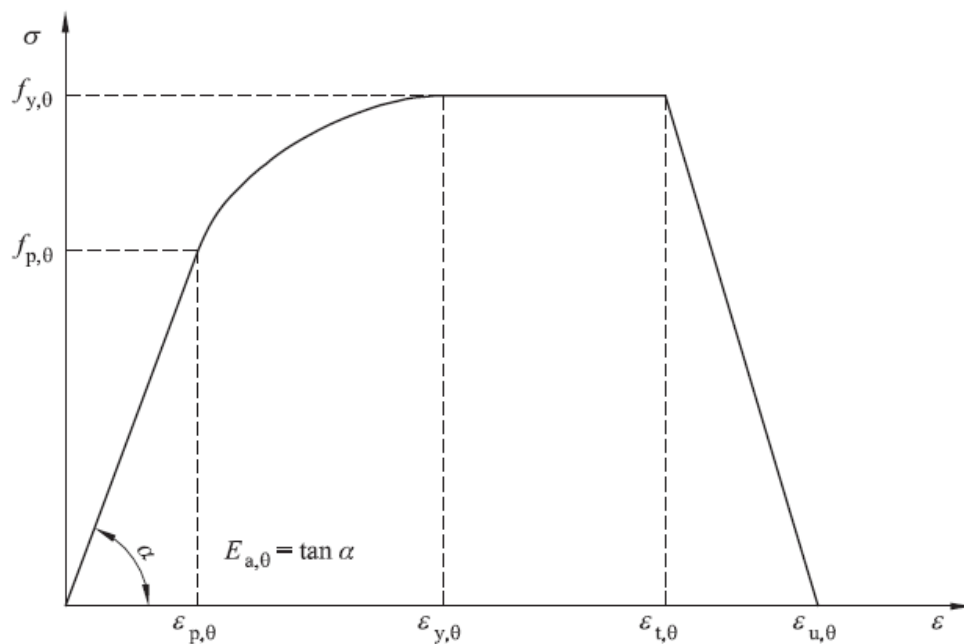
Δ/l è la dilatazione termica;

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

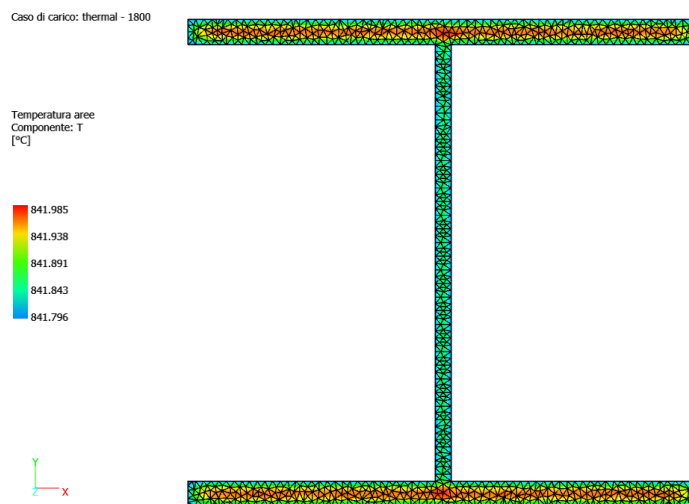
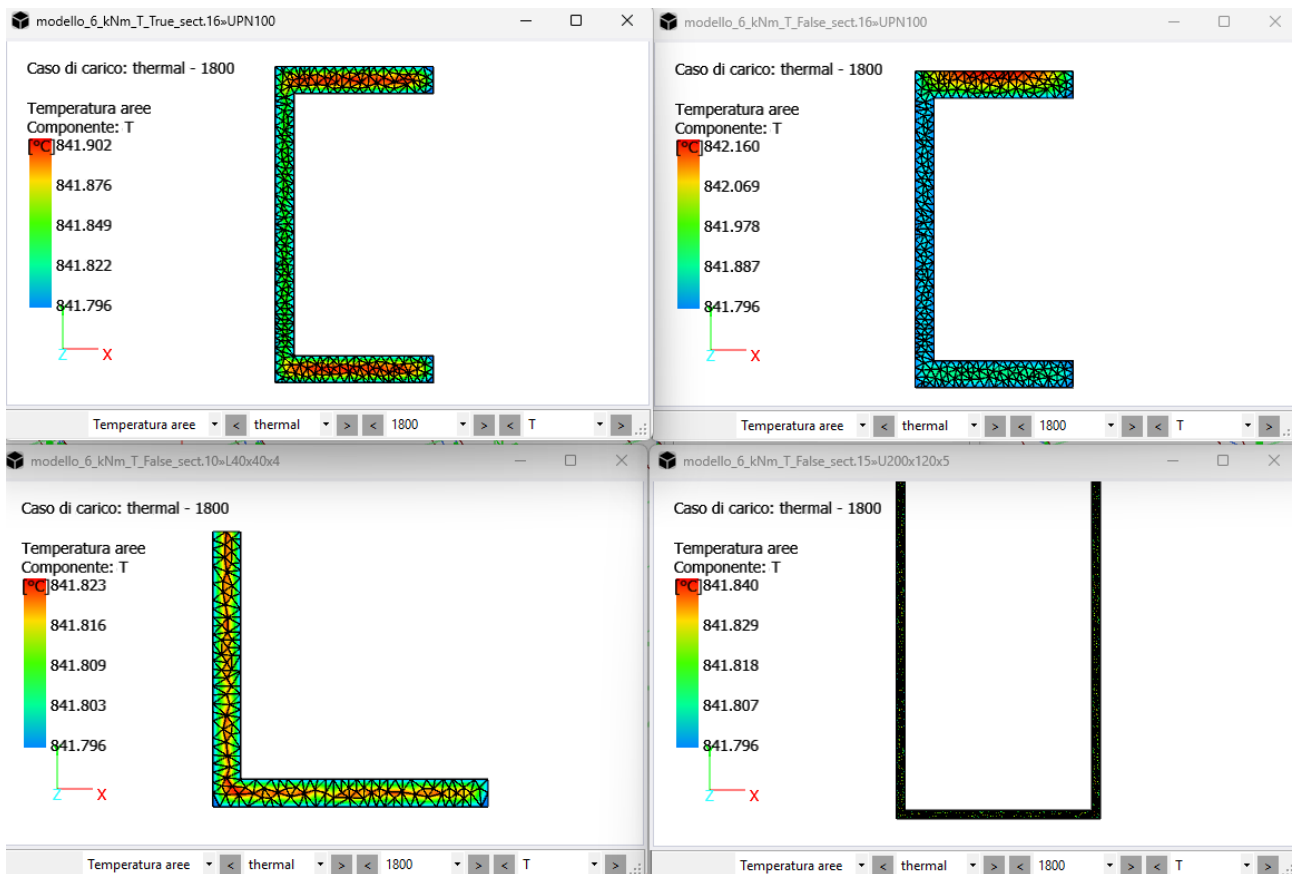
Infine, il legame non lineare utilizzato è il seguente:

Legenda

σ	Tensione
ε	Deformazione
$f_{y,\theta}$	Resistenza di snervamento effettiva
$f_{p,\theta}$	Limite di proporzionalità
$E_{a,\theta}$	Pendenza del ramo elastico lineare
$\varepsilon_{p,\theta}$	Deformazione al limite di proporzionalità
$\varepsilon_{y,\theta}$	Deformazione di snervamento
$\varepsilon_{t,\theta}$	Deformazione limite per la resistenza di snervamento
$\varepsilon_{u,\theta}$	Deformazione ultima



Nel caso dei capannoni industriali in acciaio, abbiamo una semplificazione ulteriore per applicare la temperatura agli elementi. Calcolando infatti le mappe termiche di sezioni non protette, la temperatura della sezione è pressoché uniforme anche se non tutti i lati della sezione sono esposti.



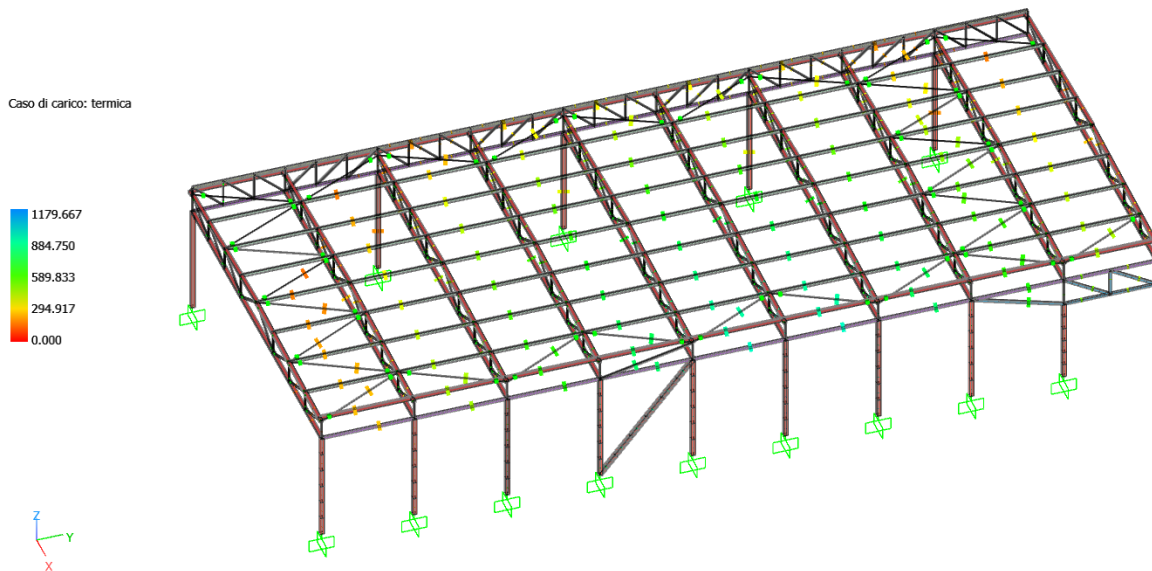
Mappe termiche delle sezioni a 30 minuti con curva ISO

I risultati avvalorano l'ipotesi progettuale di associare la stessa temperatura durante l'incendio a tutta la sezione, poiché il gradiente è quasi inesistente viste le differenze di temperatura limitate a qualche decimale di grado.

Considerando il capannone in figura, in cui ogni elemento è stato caricato con la nuova funzione di carico "Punto d'incendio", si imposta un nodo come innesco dell'incendio, attenuando la

temperatura con la distanza. Un valore opportuno per l'attenuazione, considerando i fenomeni di convezione e irraggiamento ma trascurando la "vista" delle superfici per quest'ultimo, è compreso fra 20 e 50 °C/m.

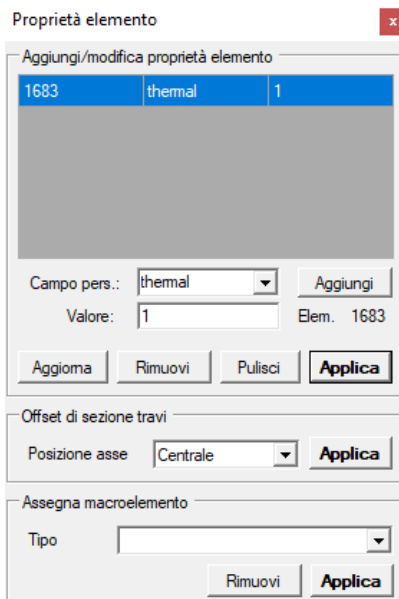
Si sceglie quindi una temperatura target di 1200°C e il modello viene caricato come segue.



L'analisi non lineare richiede quindi che:

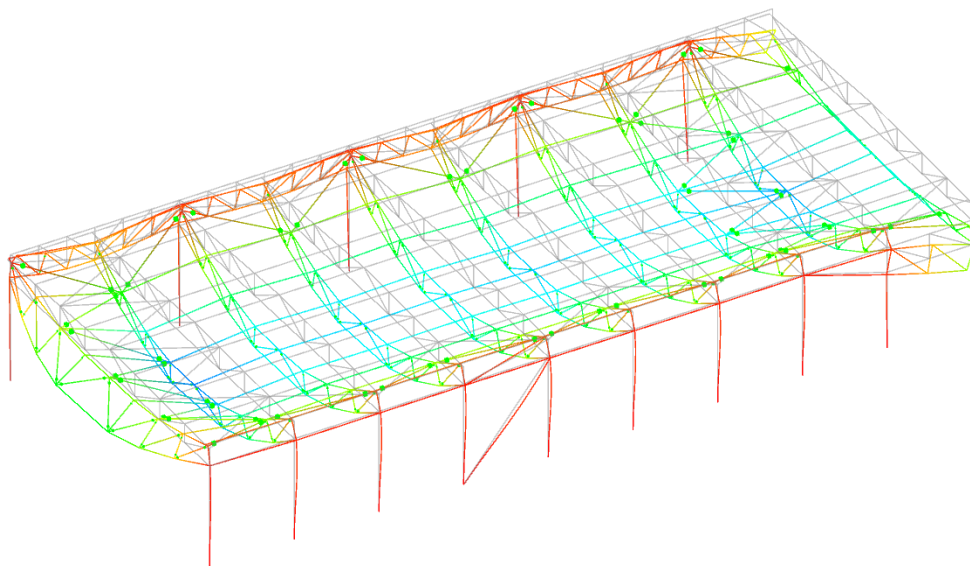
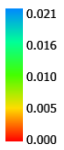
- tutte le sezioni siano a fibre;
- venga eseguita un'analisi preliminare per caricare i carichi verticali in combinazione eccezionale;

- sia presente il flag "thermal" = 1 per almeno un elemento.



Caso di carico: termica : 1

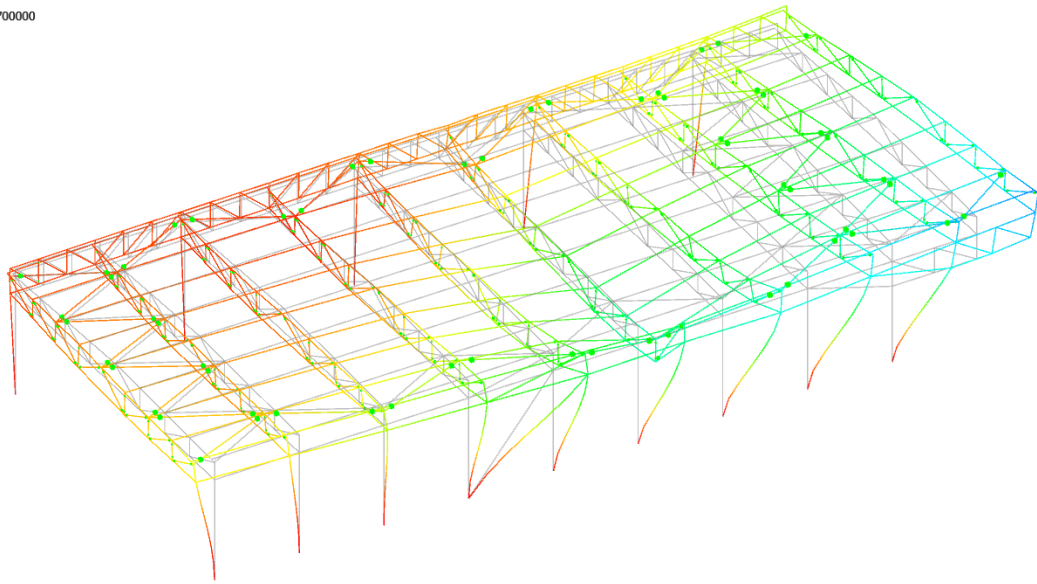
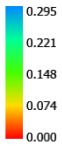
Spostamenti nodi
Componente: XYZ
[m]



Deformata iniziale

Caso di carico: termica : 1.870000

Spostamenti nodi
Componente: XYZ
[m]

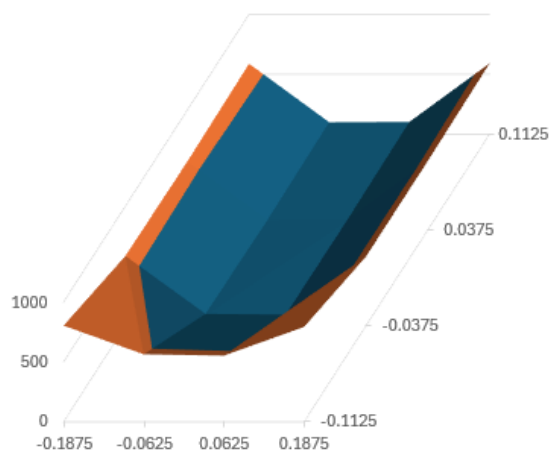
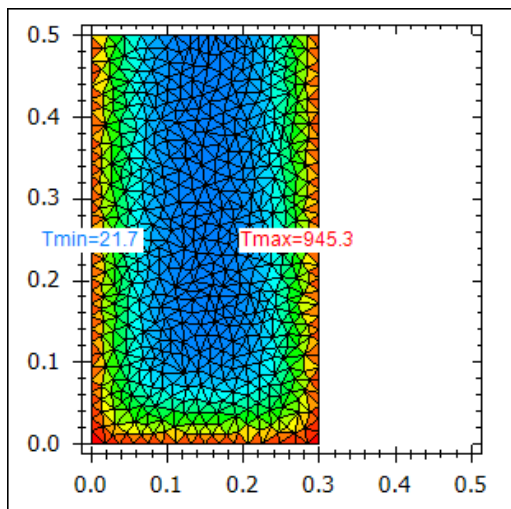


Deformata prima del collasso

Come si nota, l'espansione termica dell'acciaio prevale sulla deformazione dovuta ai carichi verticali, portando la struttura ad "allargarsi" prima di collassare. Nel caso di strutture a contatto, si deve verificare che questa espansione non comprometta la struttura adiacente.

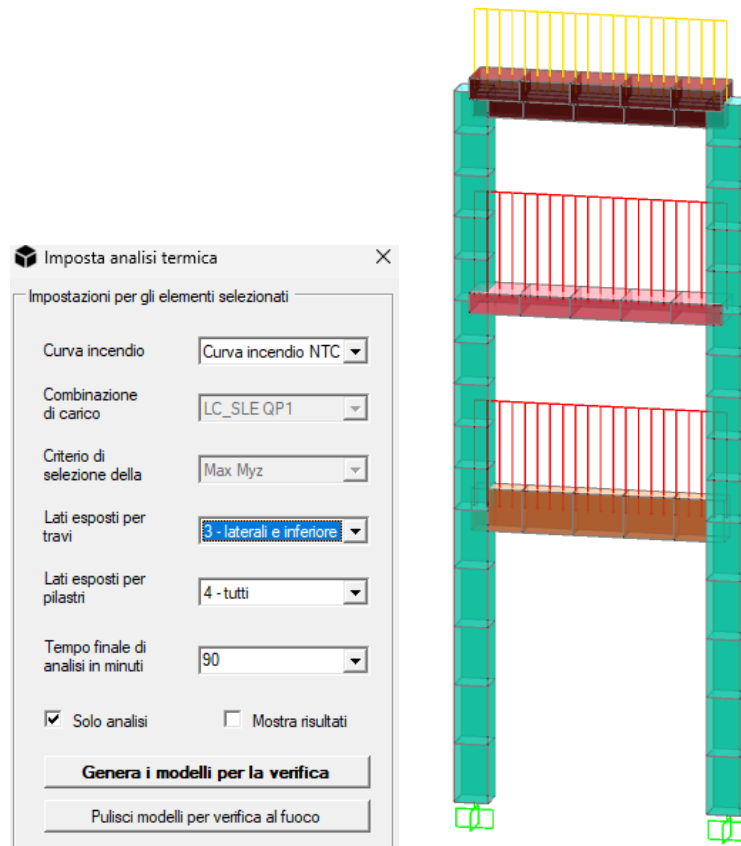
Strutture in c.a.

NextFEM Designer permette la stessa analisi per le strutture in c.a., con la differenza fondamentale che il carico termico in sezione non è più uniforme come per l'acciaio ma viene applicato tramite una griglia di valori per permettere l'interpolazione per ogni fibra. Si pensi ad esempio alla sezione rettangolare in c.a. esposta su 3 lati – a 60 minuti, il nucleo interno della sezione rimane a temperatura ambiente, mentre i lati esposti arrivano a 945°C (temperatura curva ISO).



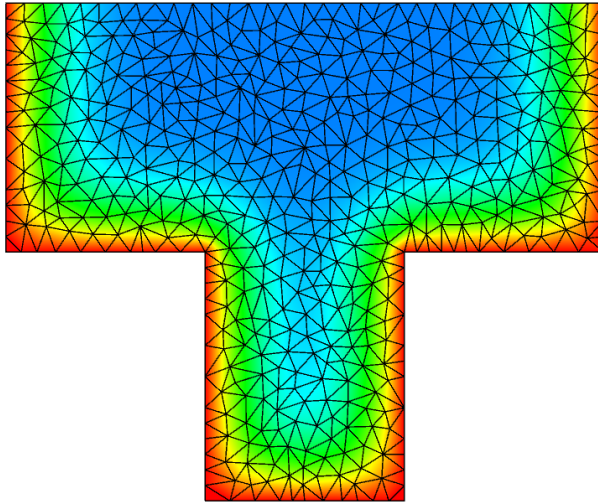
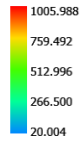
La conducibilità del calcestruzzo è quindi la discriminante per l'applicazione della griglia di temperature, che fornisce la temperatura per ogni fibra comprese le armature. Pertanto l'analisi a collasso rappresenterà anche la resistenza della struttura in ogni istante, fornendo deformate significative.

Le strutture in c.a. richiedono quindi di svolgere l'analisi termica delle sezioni prima di lanciare l'analisi a collasso. Le temperature applicate agli elementi saranno quelle finali rilevate dall'analisi termica, trascurando le piccole variazioni dovute alla non linearità dell'analisi heat-transfer, nella quale conducibilità, densità e calore specifico cambiano nel tempo.



Caso di carico: thermal : 5400

Temperatura aree
Componente: T
[°C]



Per il c.a., quando l'analisi termica della sezione è disponibile per ogni elemento, è sufficiente imputare agli elementi temperature finali unitarie.

Capitolo 4

Elenco delle verifiche

Elementi in acciaio

In questo capitolo sono esplicitate le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le travi/aste di materiale acciaio.

A: Area

Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**

Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nlm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**

iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**

imin: **raggio d'inerzia minimo**

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave in materiale acciaio. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

⚠ ATTENZIONE: le verifiche riportate non supportano sezioni di classe 4.

Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse.

Tipo sezione	Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Rettangolari		/			<i>sempre</i>
Doppio T, T, C	anima	$0.9(h-tf1)/tw$	33ε	38ε	42ε
	ali	$0.9(b/2-tw)/tf1$	9ε	10ε	14ε
Angolari	anima	h_{max}/te			15ε
	ali	$(b+h)/(2te)$			11.5ε
Box	anima	$(h-2te)/te$	9ε	10ε	14ε
	ali	$(b-2te)/te$	9ε	10ε	14ε
Tubi		D/te	$50\varepsilon^2$	$70\varepsilon^2$	$90\varepsilon^2$
Barre		/		<i>sempre</i>	
Generiche		/			<i>sempre</i>

$$\text{con } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Il nome della colonna nel programma viene presentato fra parentesi (es. (StabilitàEuleriana)).

Trazione/compressione (Assiale)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} Af_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2008. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla seguente tabella e sono determinate per sezioni laminare:

Tipo sezione	α_y	α_z	α_{LT}
Rettangolari	0.49	0.49	0.76
Doppio T, I	da 0.21 a 0.76	da 0.21 a 0.76	da 0.34 a 0.49
Angolari, C, T	0.49	0.49	0.76
Box	0.49	0.49	0.76
Tubi	0.49	0.49	0.76
Barre	0.49	0.49	0.76
Generiche	-	-	-

Taglio semplice (Taglio)

$$\rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \quad \text{se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}}, \quad \text{con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min((2\rho_V - 1)^2, 1)\right) \quad \text{se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biass)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2008.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \quad \text{con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M0}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNb} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Elementi in alluminio

In questo capitolo sono esplicitate le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le travi/aste di materiale alluminio (lega di alluminio). Queste tipologie di verifiche fanno riferimento alla norma UNI EN 1999-1-1 (Eurocodice 9).

A: Area

Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**

Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nlm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**

iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**

imin: **raggio d'inerzia minimo**

Sono di seguito elencate le verifiche condotte per ogni asta/trave in materiale alluminio. Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione della verifica, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$


Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

 **ATTENZIONE:** le verifiche riportate non supportano sezioni di classe 4.

 **ATTENZIONE:** nella lista di materiali *Alloy* nel programma sono riportate le leghe di alluminio più utilizzate. Prestare attenzione alle sigle per la scelta del materiale al fine di selezionare la lega più adatta agli elementi utilizzati.

SH - Lamiera (EN 485)

ST - Nastro (EN 485)
 PL - Piastra (EN 485)
 ET - Tubo estruso (EN 755)
 EP - Profilati estrusi (EN 755)
 ER/B - Tondi e barre estrusi (EN 755)
 DT - Tubo trafilato (EN 754)
 FO - Fucinati (EN 586)

Valutazione della classe della sezione

Conservativamente, la classe di ogni sezione è valutata come la massima classe fra tutte le parti della sezione considerate puramente compresse (*te* significa spessore della sezione).

Tipo sezione	Parte	Rapporto	Classe 1	Classe 2	Classe 3
 Rettangolari		/			<i>sempre</i>
 Doppio T, T, C	anima	$0.9(h-tf1)/tw$	$\beta1$	$\beta2$	$\beta3$
	ali	$0.9(b/2-tw)/tf1$	$\beta1$	$\beta2$	$\beta3$
 Angolari	anima	h_{max}/te			$\beta3$
	ali	$(b+h)/(2te)$			$\beta3$
 Box	anima	$(h-2te)/te$	$\beta1$	$\beta2$	$\beta3$
	ali	$(b-2te)/te$	$\beta1$	$\beta2$	$\beta3$
 Tubi*		$3\sqrt{D/te}$	$\beta1$	$\beta2$	$\beta3$
 Barre		/		<i>sempre</i>	
 Generiche		/			<i>sempre</i>

I valori $\beta1$, $\beta2$, $\beta3$ vengono calcolati considerando i rapporti β/ϵ , riportati nella tabella sottostante, moltiplicati per il parametro ϵ definito come segue:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$$

Per le ali delle sezioni si fa riferimento ai coefficienti per le parti esterne, per le anime e pareti delle sezioni si fa invece riferimento ai coefficienti per le parti interne.
 La normativa prevede coefficienti diversi per sezioni saldate e non saldate. La classificazione delle sezioni è stimata assumendo di default le sezioni senza saldature. È possibile forzare la variabile *welded=1* prima di eseguire le verifiche per considerare tutte le sezioni come saldate. Per forzare la verifica per sezioni saldate SOLO alle estremità delle travi, settare la variabile *weldedEnds=1*.

⚠ ATTENZIONE: per la verifica delle sezioni saldate, la procedura utilizza il valore f_0 HAZ dalla libreria *Alloy* del programma. Nel caso venisse utilizzato un materiale non di libreria, aggiungere la riga " f_0 HAZ=xxx" nella casella di testo della maschera *Verifiche*, con f_0 HAZ in MPa.

	Classe di durabilità	Parte interna			Parte esterna		
		$\beta1/\epsilon$	$\beta2/\epsilon$	$\beta3/\epsilon$	$\beta1/\epsilon$	$\beta2/\epsilon$	$\beta3/\epsilon$
senza saldature	A	11	16	22	3	4.5	6
	B	13	16.5	18	3.5	4.5	5
con saldature	A	9	13	18	2.5	4	5
	B	10	13.5	15	3	3.5	4

Il nome della colonna nel programma viene presentato fra parentesi (es. *(StabilitàEuleriana)*). Nelle seguenti formule si fa riferimento a f_0 (o f_0 HAZ) come f_{yk} .

Trazione/compressione (Assiale)

In trazione:

$$\rho_N = \frac{N}{N_{Rd}} = \frac{N}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}}}$$

In compressione (stabilità euleriana):

$$\rho_{Nb} = \frac{N}{N_{b,Rd}} = \frac{N}{\frac{\chi_{\min} Af_{yk}}{\gamma_{M1}}}$$

con χ_{\min} ottenuto da paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC2008. Le curve di instabilità sono scelte concordemente alla lega di alluminio selezionata, concordemente a quanto previsto dal prospetto 6.5 dell'Eurocodice 9. Il parametro k di prospetto 6.5 dell'Eurocodice 9 è sempre assunto pari a 1.

Taglio semplice (Taglio)

$$\rho_V = \frac{V}{V_{Rd}} = \frac{V}{\frac{Af_{yk}}{\gamma_{M0}\sqrt{3}}}$$

Flessione semplice (con interazione taglio/momento) (Flessione)

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{\alpha_{PL} \cdot W \cdot f_{yk} \cdot \cos(\rho_N)} = \frac{M}{M_{Rd} \cdot \cos(\rho_N)} \text{ se il taglio sollecitante non supera il 30\% di quello resistente plastico}$$

$$\rho_{Mrid} = \frac{M}{M_{Rd,red}}, \text{ con } M_{Rd,red} = M_{Rd} \left(1 - \min((2\rho_V - 1)^2, 1)\right) \text{ se il taglio sollecitante supera il 50\% di quello resistente, } M_{Rd,red} = M_{Rd} \text{ altrimenti.}$$

Pressoflessione biassiale (Pressoflessione_inst) e tensoflessione biassiale (Tensoflessione_biax)

Se l'elemento è compresso, le verifiche a instabilità sono eseguite secondo la procedura semplificata A delle NTC2008.

$$\rho_{MNb} = \frac{\rho_N}{\chi_{\min}} + \frac{\rho_{M_y}}{r_{ridN_{cr}}} + \frac{\rho_{M_z}}{r_{ridN_{cr}}} \text{ con } r_{ridN_{cr}} = 1 - \frac{\rho_N \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M0}}$$

Se l'elemento è teso:

$$\rho_{MNb} = \rho_N + \rho_{M_y} + \rho_{M_z}$$

Elementi in calcestruzzo armato

In questo capitolo sono descritte le verifiche svolte da *NextFEM Designer* per le membrature in calcestruzzo armato.

A: Area

Jz: **inerzia rispetto all'asse Z della sezione**

Jy: **inerzia rispetto all'asse Y della sezione**

Jt: inerzia torsionale

D: diametro esterno sezione

b: base della sezione per tutte le sezioni generiche

h: altezza della sezione per tutte le sezioni generiche

tw: **spessore dell'anima**

tf1: spessore della flangia superiore

tf2: spessore della flangia inferiore

t: spessore delle sezioni per elementi piani

N: forza assiale

V: Taglio generico lungo un asse della sezione

Vy: Taglio lungo Y

Vz: Taglio lungo Z

Mt: Momento torcente

M: Momento generico attorno ad un asse della sezione

Myy: **Momento attorno all'asse Y**

Mzz: **Momento attorno all'asse Z**

Em: modulo di Young del materiale

Gm: modulo di taglio del materiale

Nlm: coefficiente di Poisson del materiale

fk: resistenza caratteristica del materiale

WelZ: modulo resistente in direzione Z

WelY: modulo resistente in direzione Y

WplZ: modulo resistente plastico in direzione Z

WplY: modulo resistente plastico in direzione Y

iz: **raggio d'inerzia per l'asse Z**

iy: **raggio d'inerzia per l'asse Y**

imin: **raggio d'inerzia minimo**

bwY: larghezza minima della sezione in direzione locale y

bwZ: larghezza minima della sezione in direzione locale z

ds: altezza utile della sezione

Astot: area totale di armatura in sezione

AsTens: area di armatura tesa

fyks: resistenza caratteristica armatura a taglio (staffe)

fydl: resistenza di progetto delle barre longitudinali

rebCmin: distanza minima fra bordo e centro armatura longitudinale

isWall: pari a 1 se la sezione è di una parete, 0 altrimenti

AmbCondition: condizioni ambientali per verifiche in esercizio (1,2,3)

mNt: duttilità a trazione della sezione per cerniere plastiche

mNc: duttilità a compressione per cerniere plastiche

mVy: duttilità a taglio in direzione locale y per cerniere plastiche

mVz: duttilità a taglio in direzione locale z per cerniere plastiche

mMt: duttilità torsionale per cerniere plastiche

mMy: **duttilità a flessione attorno all'asse locale y per cerniere plastiche**

mMz: **duttilità a flessione attorno all'asse locale z per cerniere plastiche**

NbH: resistenza massima a compressione elemento per cerniere plastiche

MtH: resistenza a torsione al limite elastico per cerniere plastiche.

Tutte le formule riportate sono esplicitate nei confronti del rapporto di utilizzazione, espresso in generale come:

$$\rho = \frac{E_d}{R_d} = \frac{E_d}{\frac{R_k}{\gamma_M}}$$

Con E_d azione sollecitante di progetto

R_d resistenza di progetto, pari a $\frac{R_k}{\gamma_M}$

R_k resistenza caratteristica del materiale

γ_M coefficiente parziale di sicurezza del materiale

Stabilità in compressione

$$\rho_{slend} = \frac{\max\left(\frac{L_{0y}}{i_y}, \frac{L_{0z}}{i_z}\right)}{25} \cdot \sqrt{\frac{|N|}{A \cdot f_{cd}}}$$

Taglio per elementi non armati

Per ogni direzione locale y e z:

$$V_{rd} = \max \left\{ \left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b_w \cdot ds, (\nu_{\min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w \cdot ds \right\}$$

$$\text{con } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{ds}} \leq 2 \quad \nu_{\min} = 0.035 k^{1.5} f_{ck}^{0.5} \quad \rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} \quad \sigma_{cp} = \min \left(\frac{N}{A_{cls}}, 0.2 f_{cd} \right)$$

Taglio per elementi armati

Per ogni direzione locale y e z:

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\cot \alpha + \cot \theta) \sin \alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9 d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot 0.5 f_{cd} \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

α_c	coefficiente maggiorativo pari a	1	per membrature non compresse
		$1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$	per $0 \leq \sigma_{cp} < 0,25 f_{cd}$
		1,25	per $0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$
		$2,5 (1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$	per $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$

Tenso/presso/flessione

La verifica a flessione, sia semplice che deviata, viene condotta sulla scorta della resistenza per ogni direzione, separatamente.