

Nuovo applicativo del Software [Straus7](#) per le verifiche strutturali antincendio

Di Sciascio Giovanni¹

¹ Ingegnere Strutturista, Sviluppatore software, Libero Professionista, cofondatore della Di Sciascio srl

1 INTRODUZIONE

L'evoluzione normativa (Codice di Prevenzione Incendi D.M. 03/08/2015, aggiornato con il D.M. 22/11/2022 ed Eurocodici strutturali) e il progresso degli strumenti hardware e software permettono oggi il calcolo della resistenza al fuoco delle strutture con metodi di calcolo avanzati, che consentono di dimostrare prestazioni di resistenza strutturale al fuoco non ottenibili con l'utilizzo dei metodi semplificati.

I software commerciali dedicati alle verifiche strutturali offrono oggi la possibilità di verifiche strutturali antincendio, ma esistono codici specifici, nati per la valutazione della resistenza al fuoco delle strutture.

Straus7, [6], è un software FEM avanzato, dotato di tutti i solutori lineari e non lineari necessari all'ottemperamento delle verifiche strutturali. È inoltre dotato del modulo API (Application Programming Interface), che permette all'utilizzatore esperto in programmazione lo sviluppo di applicazioni che interagiscono direttamente con Straus7, bypassando l'interfaccia utente. Ciò rende possibile la creazione di programmi che:

1 – generano e modificano i modelli Straus7

2 – eseguono i solutori di Straus7

3 – estraggono risultati e altre informazioni dai modelli Straus7

Il presente articolo intende illustrare un nuovo applicativo di Straus7, [6], sviluppato dallo scrivente con il modulo API, che consente di portare la raffinatezza delle analisi del Software Straus7 al livello dei codici di calcolo dedicati alla valutazione della resistenza al fuoco delle strutture, soddisfacendo i requisiti degli Eurocodici strutturali.

L'applicativo consente l'analisi antincendio di strutture in acciaio, cemento armato e di strutture composte acciaio-calcestruzzo, con o senza protezione. Verrà dapprima eseguito un richiamo sui requisiti normativi, sulle funzionalità e sulle analisi da eseguire in Straus7, nonché sulle principali caratteristiche del nuovo applicativo.

Verrà infine analizzato un caso studio relativo ad un semplice modello in acciaio, nel quale verrà valutata l'influenza di varie ipotesi di calcolo, considerando vari livelli di accuratezza delle analisi.

Il codice di calcolo [Straus7](#), [6], è distribuito in Italia dalla [HSH](#) srl di Padova.

2 RICHIAMI NORMATIVI

Le classi di resistenza al fuoco nei confronti della capacità portante sono espresse dai simboli R15, R20, R30, R45, R60, R90, R120, R180, R240 e R360, dove la lettera R rappresenta il requisito di capacità portante ed il numero esprime il tempo, in minuti primi, per il quale il requisito stesso viene garantito.

Le classi di resistenza al fuoco sono riferite all'incendio convenzionale rappresentato dalle curve di incendio nominali.

Per ogni spazio dell'edificio, è possibile progettare curve di fuoco che indicano la dipendenza dalla temperatura nel tempo. Tali curve sono uno strumento utile per progettare la sicurezza antincendio negli edifici. Durante il test, gli elementi dell'edificio sono esposti a un carico termico, che è determinato dalla curva di fuoco standard.

Nel caso di incendio di materiali combustibili prevalentemente di natura cellulosa, la curva di incendio nominale di riferimento è la *curva nominale standard (ISO 834)* seguente:

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

nella quale θ_g è la temperatura dei gas di combustione al tempo t espresso in minuti primi.

Per profilati in acciaio laminati, saldati o piegati a freddo non protetti, l'Eurocodice 3 Parte 1-2, [4], consente l'ipotesi di considerare il campo di temperatura indipendente dal punto interno dell'elemento, rimanendo solo funzione del tempo. Nell'esempio illustrato nel par. 4 valuteremo entrambe le ipotesi, ovvero di temperatura uniforme e variabile sulla sezione. Nel frattempo illustreremo la trattazione matematica semplificata, valida nel primo caso, nel quale l'equazione differenziale alle derivate parziali di Fourier, che regola la propagazione del calore per conduzione all'interno dell'elemento metallico, degenera in un'equazione differenziale ordinaria del primo ordine con soluzione del problema notevolmente semplificata.

Questa consente di giungere a una espressione che per via incrementale (agli incrementi finiti) lega la variazione di temperatura nell'acciaio al variare del tempo:

$$\rho_a \cdot c_a \cdot V \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial t} \right) = A \cdot q_{netto}$$

in cui

A = superficie laterale dell'elemento strutturale [m^2]

V = volume dell'elemento strutturale [m^3]

θ_a = temperatura dell'elemento strutturale [$^{\circ}C$]

c_a = calore specifico dell'acciaio [$J/kg^{\circ}C$], legato alla temperatura del materiale dalla relazione seguente

$$c_a(\theta_a) = \begin{cases} 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 & 20^{\circ}C \leq \theta_a \leq 600^{\circ}C \\ 666 + 13002/(738 - \theta_a) & 600^{\circ}C \leq \theta_a \leq 735^{\circ}C \\ 545 + 17820/(\theta_a - 731) & 735^{\circ}C \leq \theta_a \leq 900^{\circ}C \\ 650 & 900^{\circ}C \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}C \end{cases}$$

ρ_a = densità dell'acciaio, assunta pari a $7850 \text{ kg}/m^3$

con

$$q_{netto} = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) + \sigma \varepsilon_r \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right]$$

Essendo:

α_c = coefficiente di trasmissione termica per convezione [W/m²°C]

σ = costante di Boltzman = 5,67*10⁻⁸ W/m²K⁴

ε_r = emissività della superficie dell'elemento strutturale in acciaio.

In un generico intervallo di tempo Δt l'incremento di temperatura dell'elemento sarà:

$$\Delta\theta_a = \frac{A}{V} \cdot \frac{q_{netto}}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \Delta t$$

Per la convergenza del metodo di calcolo si deve utilizzare un incremento di tempo

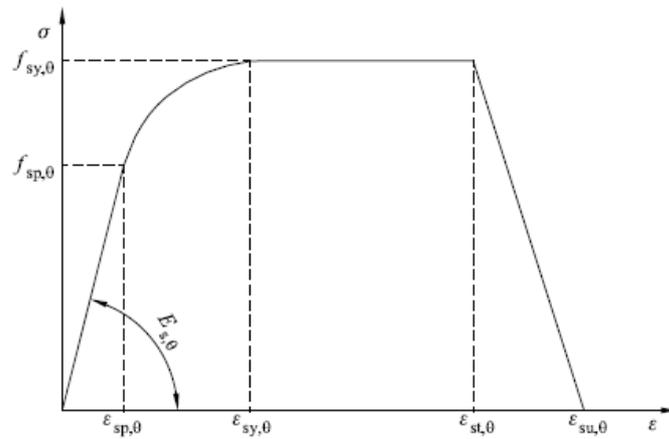
$$\Delta t < \frac{2,5 \cdot 10^4}{A/V} \quad s$$

Il rapporto A/V , detto *fattore di massività* dell'elemento metallico, si calcola tenendo conto dell'effettiva superficie attraverso cui può avvenire lo scambio termico.

Il comportamento meccanico della struttura viene analizzato tenendo conto della riduzione della resistenza meccanica dovuta al danneggiamento dei materiali per effetto dell'aumento di temperatura.

Le proprietà di resistenza e deformazione dell'acciaio di armatura a elevate temperature si ottengono dalle relazioni sforzi-deformazioni presentate nella fig. 1 (tratta dalla UNI EN 1993-1-2):

Modello matematico per le relazioni sforzi-deformazioni di acciaio di armatura e da pretensione a elevate temperature (la notazione per l'acciaio da pretensione è "p" anziché "s")



Intervallo	Sforzi $\sigma(\theta)$	Modulo tangente
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	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	-
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	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	
*) I valori per i parametri $\varepsilon_{pt,0}$ e $\varepsilon_{pu,0}$ 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.		

Fig. 1 – modello matematico della relazione tensione-deformazione di acciaio a elevate temperature

Le relazioni sforzi-deformazioni fornite nella figura di sopra sono definite da tre parametri: l'inclinazione del campo elastico lineare $E_{s,\theta}$, il limite proporzionale $f_{sp,\theta}$ e il massimo livello di sforzo $f_{sy,\theta}$. I valori di ciascuno dei parametri sono forniti nel prospetto seguente (tratto dalla UNI EN 1993-1-2) in funzione delle temperature dell'acciaio:

Temperatura Acciaio θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	laminato a caldo	trafilato a freddo	laminato a caldo	trafilato a freddo	laminato a caldo	trafilato a freddo
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 1 – parametri della relazione tensione-deformazione di acciaio a elevate temperature

Per la verifica di resistenza strutturale al fuoco si deve tener conto della presenza delle azioni permanenti e di quelle azioni variabili che agiscono contemporaneamente all'incendio secondo la combinazione eccezionale (senza prendere in considerazione la possibilità di concomitanza dell'incendio con altre azioni eccezionali e con le azioni sismiche):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

3 FUNZIONALITÀ DISPONIBILI IN STRAUS7 E NEL NUOVO APPLICATIVO PER LE VERIFICHE STRUTTURALI ANTINCENDIO

Prima di descrivere le funzionalità del nuovo applicativo, che permettono di ottemperare agli standard degli Eurocodici strutturali, faremo una breve descrizione delle funzionalità presenti nella versione base del software Straus7. Come visto nel par. precedente, l'Eurocodice EC3 Parte 1-2, [4], affronta la relazione sforzo-deformazione dell'acciaio dovuta all'aumento della temperatura mediante tre fattori di riduzione: modulo elastico, limite di snervamento effettivo e limite proporzionale. Sebbene in Straus7 sia possibile variare il modulo elastico e il limite di snervamento del materiale con la temperatura, al momento non è disponibile la possibilità di variare il limite proporzionale con la temperatura. Pertanto, nella versione base del software Straus7 il limite proporzionale della curva sforzo-deformazione viene ignorato e viene utilizzata una curva sforzo-deformazione bilineare elastica-perfettamente plastica.

La figura seguente illustra il confronto tra le curve tensione-deformazione dell'EC3 Parte 1.2 e quelle elaborate dalla versione di base di Straus7.

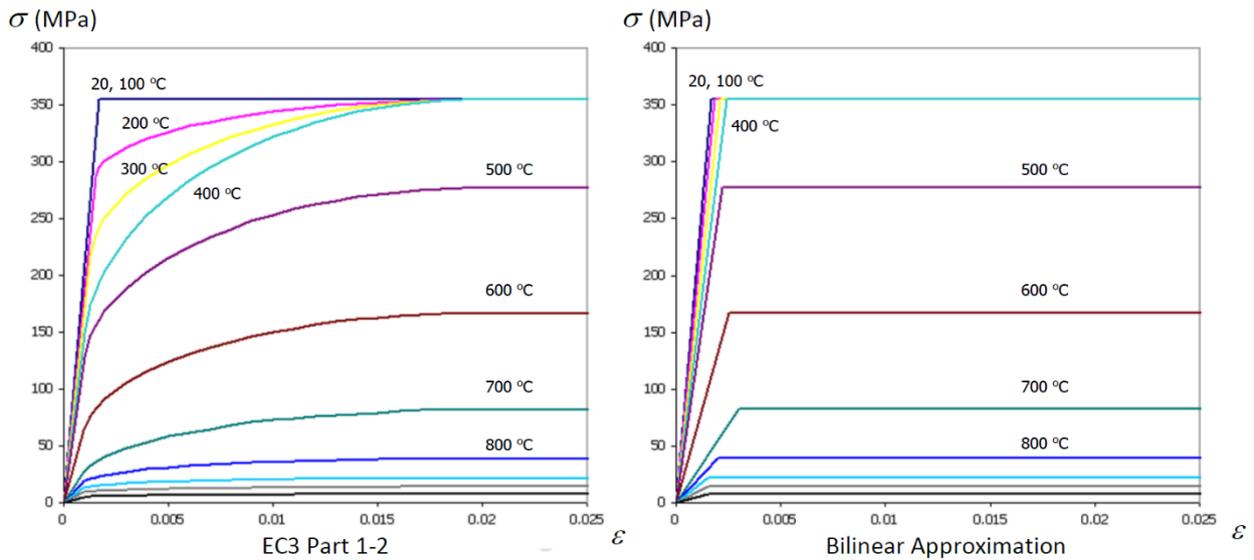


Fig. 2 – confronto tra le curve tensione-deformazione dell'EC3 Parte 1.2 e della versione base di Straus7

Sovrapponendo le curve tensione-deformazione è possibile evidenziarne le differenze. La curva bilineare assorbe evidentemente più energia prima di cedere e introduce la plasticità prima della curva dell'EC3. Nella figura seguente si confrontano le curve relative ad una temperatura di 500 °C.

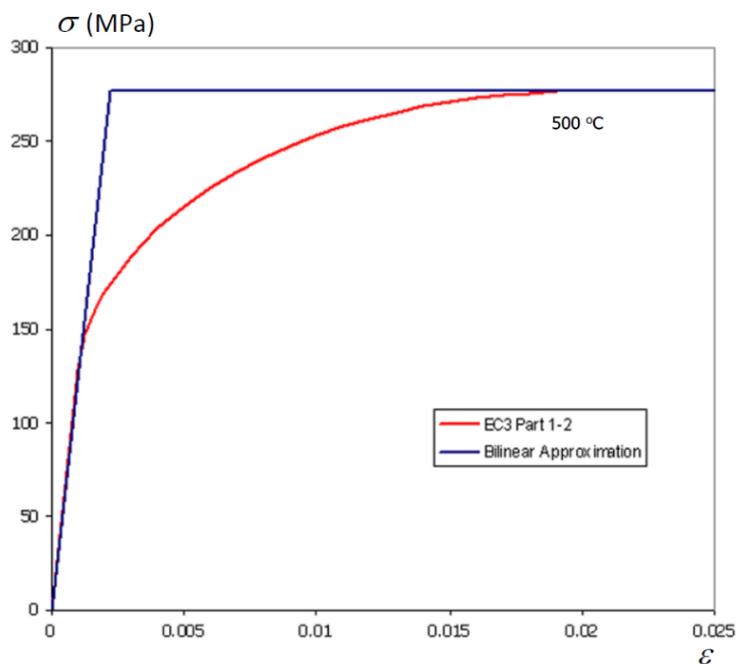


Fig. 3 – confronto tra le curve tensione-deformazione dell'EC3 Parte 1.2 e della versione base di Straus7 a $T = 500^{\circ}\text{C}$

Per quanto concerne il nuovo applicativo sviluppato dallo scrivente, esso consente di collegare i vari elementi Beam del modello strutturale (rappresentativi di travi/pilastri in acciaio, cemento armato o travi/colonne composte in acciaio/calcestruzzo) ai modelli delle relative sezioni, realizzati tramite elementi Plate (vedi un esempio illustrato in fig. 4).

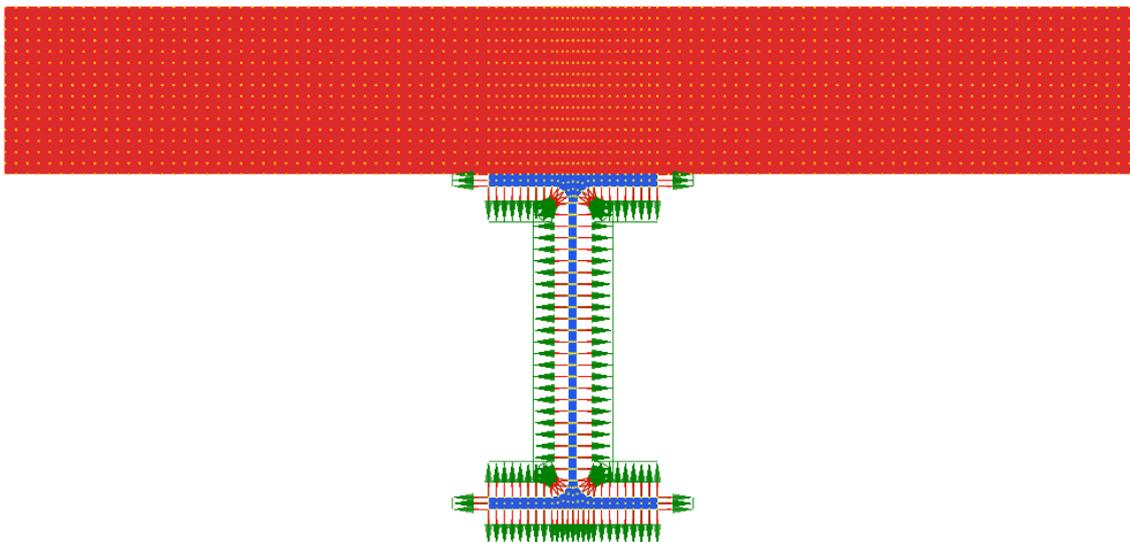


Fig. 4 – esempio di modello di una sezione associato a elementi Beam nel modello globale

Nei modelli delle sezioni coinvolte è possibile modellare elementi Plate rappresentativi di acciaio, calcestruzzo e barre di armatura: questi elementi Plate saranno quelli effettivamente collegati alle proprietà strutturali delle sezioni degli elementi Beam nel modello principale. È chiaramente possibile modellare anche elementi Plate rappresentativi di materiali di protezione antincendio. Lo scopo è quello di eseguire le analisi termiche in transitorio, in maniera da conoscere l'andamento della temperatura in funzione del tempo in ogni punto della sezione strutturale.

L'applicativo è in grado di eseguire in maniera automatica delle analisi non lineari per stage (tenendo conto della non linearità di materiale e geometrica) durante le quali le proprietà delle sezioni degli elementi Beam vengono gradualmente modificate in funzione delle temperature nei punti della sezione nello step corrente: ciò viene eseguito in maniera iterativa, in maniera da raggiungere la convergenza dei parametri inerziali delle sezioni stesse. La fig. 5 sottostante illustra un esempio di modifica di una sezione in acciaio, nella quale i vari elementi della mesh, inizialmente collegati tra loro, vengono ridotti in funzione del rapporto tra la tensione stabilita dai legami dell'EC3 Parte 1-2, [4], per la deformazione e la temperatura in un dato punto e la tensione elastica nello stesso punto dell'elemento Beam originale.

Il software gestisce anche eventuali fasi di scarico dei vari elementi, seguendo un modello costitutivo elasto-plastico.

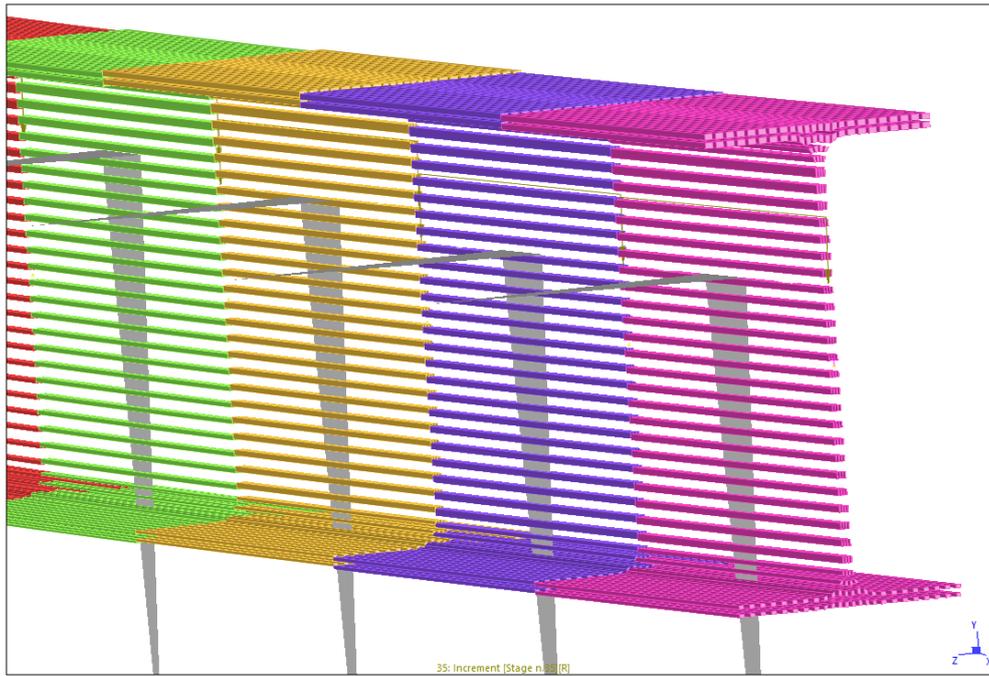


Fig. 5 – modifica della sezione di un elemento in acciaio ad elevate temperature

Inoltre, l'applicativo è in grado di calcolare e riportare nel modello principale gli effetti di dilatazione termica indotti sull'elemento Beam dal campo di temperature agenti nella sezione, il quale, nel caso più generale, presenta un andamento non lineare lungo gli assi locali della sezione stessa (vedi fig. 6).

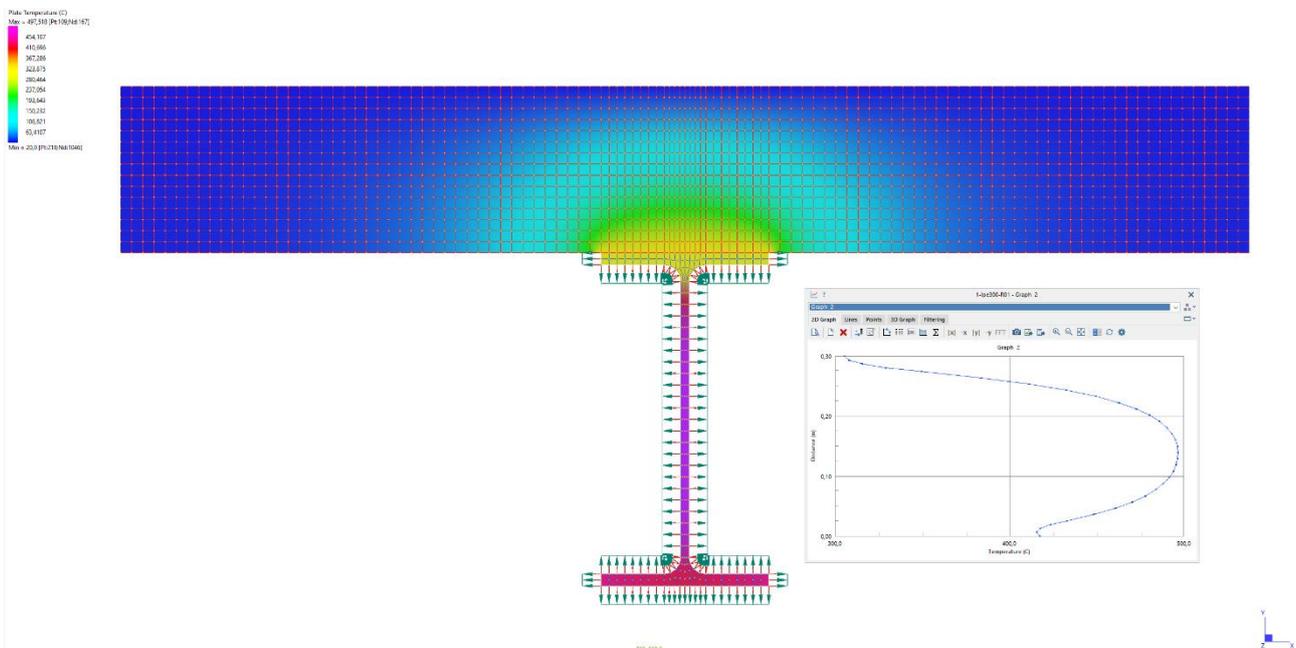


Fig. 6 – contour delle temperature in un dato istante e andamento delle temperature lungo l'asse locale y

Si vuole già da subito evidenziare come le fibre della sezione, per effetto di questa distribuzione di temperatura, siano assoggettate ad una deformazione libera pari a $\epsilon_t = \alpha T$, ma per il ripristino della deformazione piana delle sezioni dovrà nascere, per effetto del vettore $f_t = [N_t, M_{tx}, M_{ty}]$, uno stato tensionale auto equilibrato il quale è funzione della deformazione ϵ_o e della curvatura χ_o che si instaurano nella sezione. La figura 7 riporta nella parte sinistra la variazione di temperatura, la deformazione rigida in accordo alla conservazione delle sezioni piane e le tensioni residue per effetto di una variazione non lineare, e nella parte destra una variazione lineare di temperatura, a causa della quale la sezione subisce solo una deformazione rigida e non insorge in essa nessuno stato di tensione.

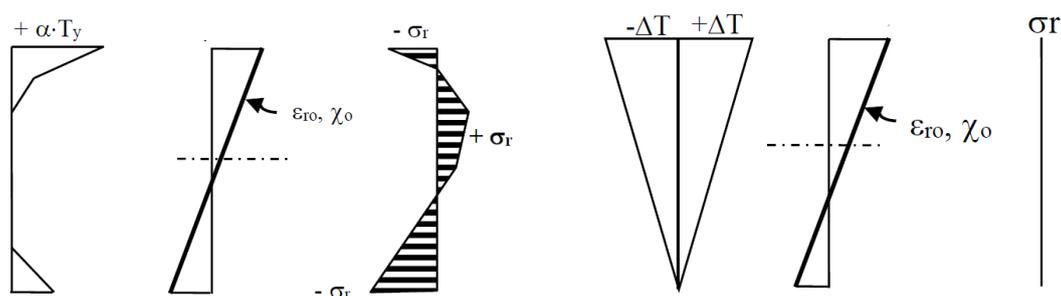


Fig. 7 – confronto tra variazione di temperatura non lineare e lineare

L'applicativo in questione consente l'ottenimento dei seguenti punti:

- 1) modellazione dello stato tensionale di acciaio e calcestruzzo conforme agli Eurocodici EC2 ed EC3 Parte 1-2;
- 2) modellazione del campo delle temperature variabile nella sezione.

Nell'esempio illustrato nel par. seguente descriveremo nelle varie analisi l'influenza di varie ipotesi di calcolo, considerando vari livelli di accuratezza delle analisi stesse.

4 ESEMPIO APPLICATIVO

Si prende in considerazione una trave IPE 300 in acciaio S355, riportata nel libro [11]. La trave è sottoposta ad un carico uniforme pari a 18,1 kN/m e presenta i vincoli cerniera (a sinistra) e carrello (a destra). Con queste condizioni di vincolo, a tale valore del carico distribuito corrisponde un momento in mezzzeria pari al 50% del momento al limite elastico. La sezione è riscaldata da un incendio rappresentato dalla curva nominale ISO 834 su tutto il perimetro, ad eccezione dell'ala superiore, che è a contatto con una soletta in calcestruzzo non collaborante a temperatura di 20 °C, che scongiura in questo caso problematiche di svergolamento flesso-torsionale.

Di seguito verranno illustrati i risultati di tre analisi eseguite:

- a) Analisi rigorosa: legame proposto dall'EC3 parte 1-2, con temperatura variabile sulla sezione
- b) Analisi con legame elastico perfettamente plastico, con temperatura variabile sulla sezione

c) Analisi con legame elastico perfettamente plastico, con temperatura uniforme sulla sezione

In tutte le analisi si assumono i seguenti valori dei parametri termici:

α_c = coefficiente di trasmissione termica per convezione = 25 W/m²°C

σ = costante di Boltzman = 5,67*10⁻⁸ W/m²K⁴

ϵ_r = emissività della superficie dell'elemento strutturale in acciaio = 0,5.

Per quanto concerne l'analisi a), la temperatura variabile sulla sezione produce una dilatazione termica ed una curvatura termica. Nel caso specifico, come illustrato anche in fig. 6, la temperatura all'intradosso della sezione IPE 300 è maggiore di quella all'estradosso, a contatto con la soletta in cemento, per cui si viene a generare una curvatura termica che contribuisce ad aumentare la freccia in mezzera della trave stessa.

L'unica differenza dell'analisi b) rispetto all'analisi a) risiede nell'adozione di un legame elastico perfettamente plastico in luogo del legame proposto dall'EC3- parte 1-2. Infine l'analisi c) assume un legame elastico perfettamente plastico con una distribuzione di temperatura uniforme sulla sezione.

In quest'ultimo caso l'andamento nel tempo della temperatura uniforme nella sezione è calcolabile tramite le relazioni esposte nel par. 2 ed è illustrato nella seguente fig. 8 per il caso in esame.

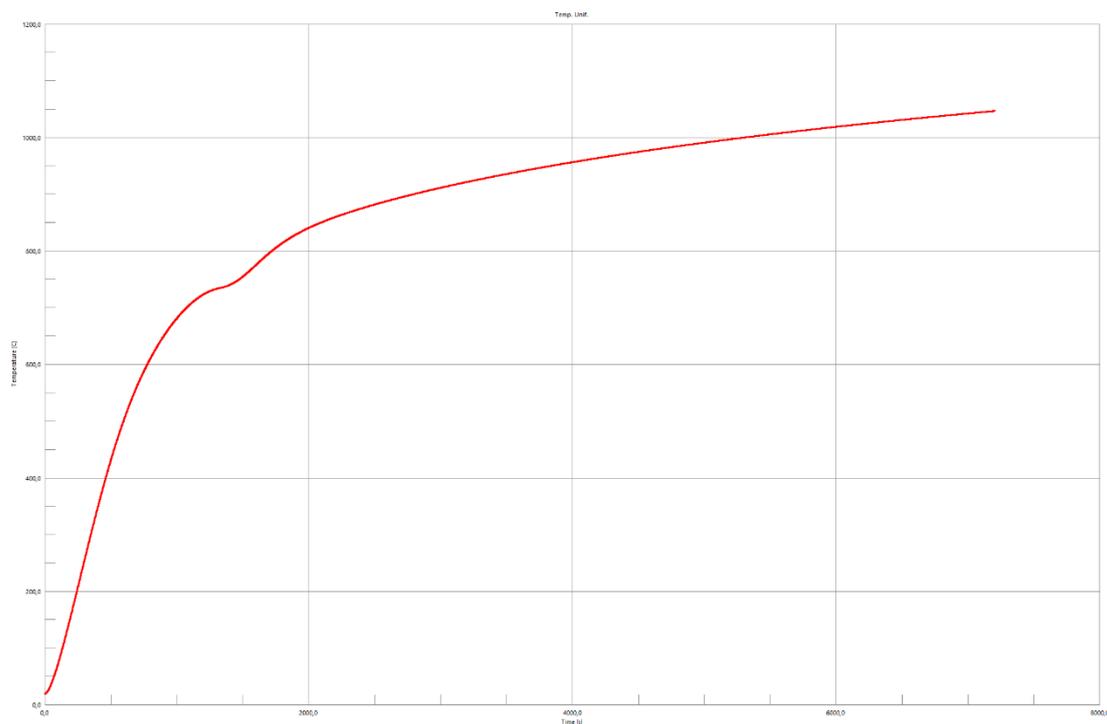


Fig. 8 – andamento della temperatura nel tempo per il caso studio, considerando la temperatura uniforme nella sezione

La fig. 9 illustra il modello FEM gestito dal nuovo applicativo di Straus7, utilizzato per l'esecuzione delle analisi non lineari a) e b), mentre la fig. 10 illustra il modello FEM utilizzato per l'analisi c), eseguita con il solo software Straus7.



Fig. 9 – modello gestito dal nuovo applicativo di Straus7

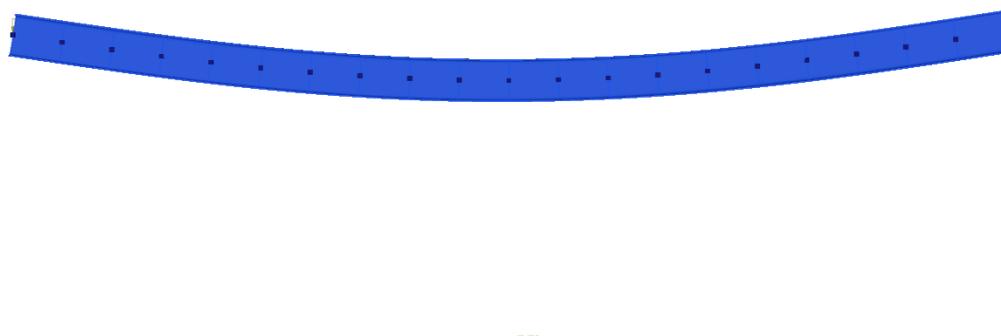


Fig. 10 – modello gestito dalla versione di base di Straus7

Le figg. 11 e 12 illustrano rispettivamente gli andamenti nel tempo della freccia in mezzeria e dello spostamento orizzontale dell'estremo libero calcolati nelle tre analisi sopra descritte.

Dal confronto con l'analisi a) e l'analisi b) emerge quanto anticipato nel par. 3 in riferimento alla fig. 3, ovvero che il legame elastico perfettamente plastico porta ad un maggiore assorbimento di energia rispetto al legame tensione-deformazione proposto dall'EC3 1-2. In virtù di ciò, l'inizio del collasso repentino (evidenziato dal brusco aumento della freccia) avviene a circa 850 s (14 minuti circa) nell'analisi b), mentre nell'analisi a) si inizia ad avere un sensibile aumento di freccia già a partire dai 600 s.

Dal confronto con l'analisi a) e l'analisi c) emerge che il collasso della trave nel caso c) avviene prima di quello della stessa trave nell'analisi a), perché nell'analisi c) il raggiungimento della tensione di snervamento avviene contemporaneamente nella flangia superiore e in quella inferiore (intorno ai 750 s, pari a 12 minuti circa), essendo la temperatura uniforme nella sezione. Nell'analisi accurata a), invece, si raggiungono i 14 minuti, in quanto a 750 s nell'analisi c) l'intera sezione raggiunge i 588 °C, mentre

nell'analisi termica in transitorio della sezione, utilizzata per il calcolo delle proprietà degli elementi Beam nell'analisi a), le flange inferiore e superiore si trovano rispettivamente a temperature pari a 576 °C e 454 °C (fig. 13). Pertanto, l'abbattimento di tensione delle due flange è differente e la flangia superiore non ha ancora raggiunto il suo limite plastico, che comporterebbe la formazione del cinematismo labile di collasso. In termini di tempi di resistenza al fuoco, il modello approssimato dell'analisi c) restituisce valori a favore di sicurezza, quindi più bassi rispetto a quelli calcolati con il modello accurato nell'analisi a). Al contrario, in termini di spostamenti, l'analisi c) sottostima gli spostamenti verticali rispetto a quelli ottenuti nell'analisi a), sia a causa della mancata presenza della curvatura termica dovuta alla temperatura uniforme, che della maggiore rigidità del materiale con legame elastico perfettamente plastico. L'assenza della curvatura termica dovuta alla temperatura uniforme produce inoltre una leggera sovrastima degli spostamenti orizzontali nell'analisi c) rispetto all'analisi a).

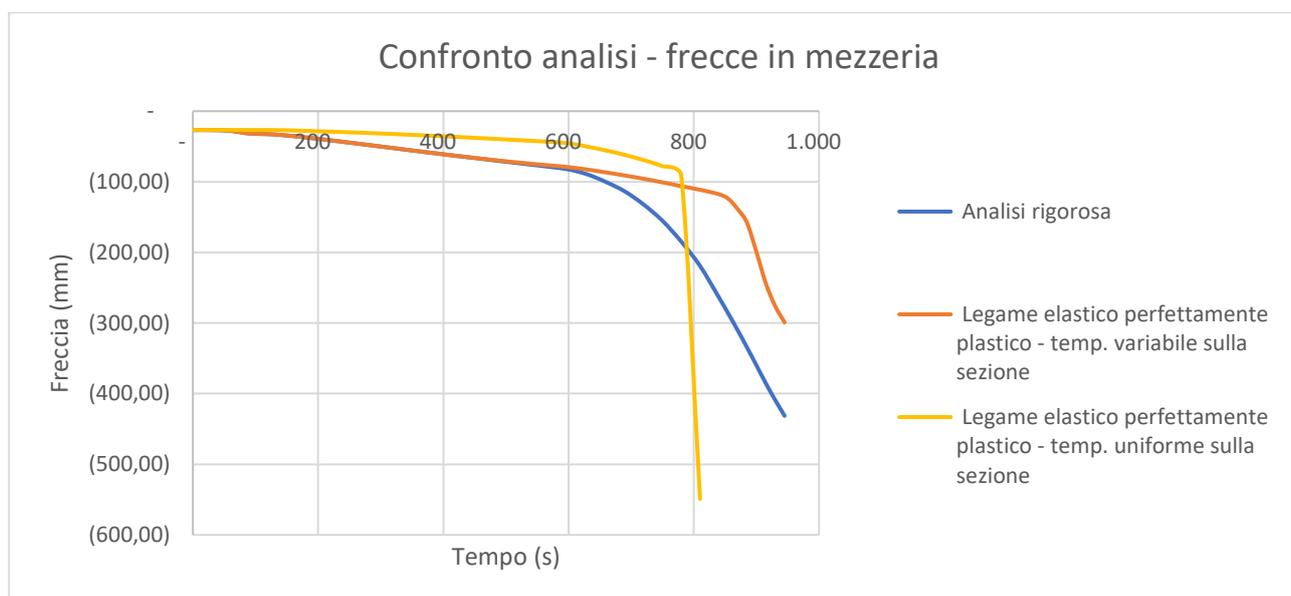


Fig. 11 – confronto tra le analisi – frecce in mezzeria

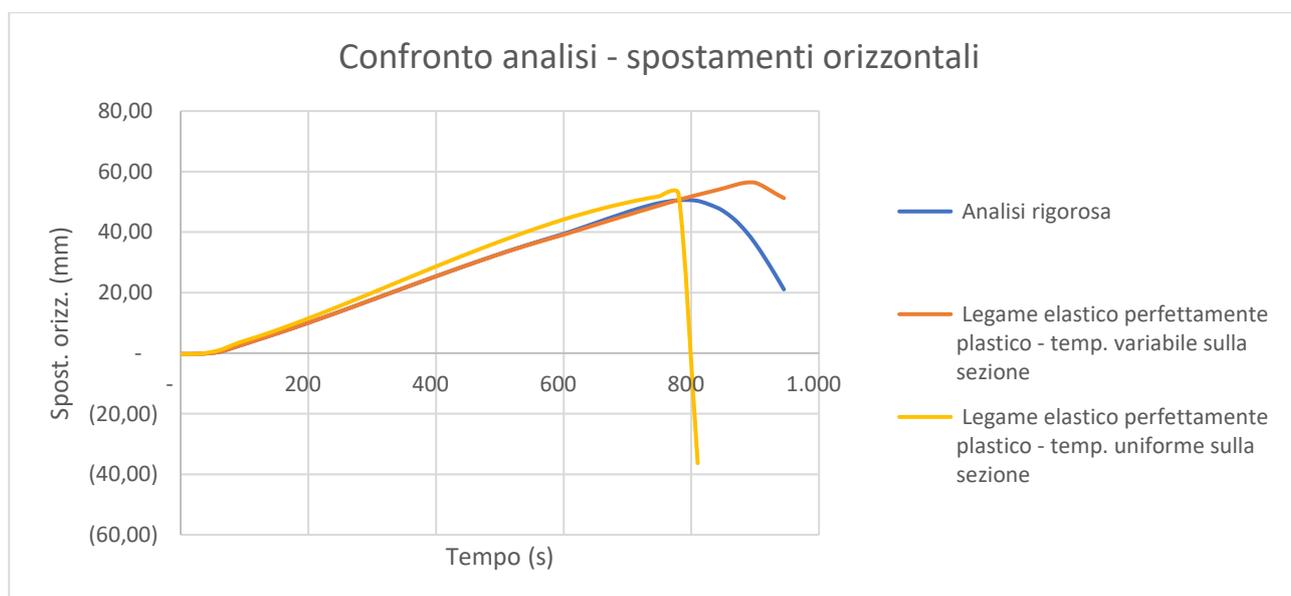


Fig. 12 – confronto tra le analisi – spostamento orizzontale dell'estremo libero

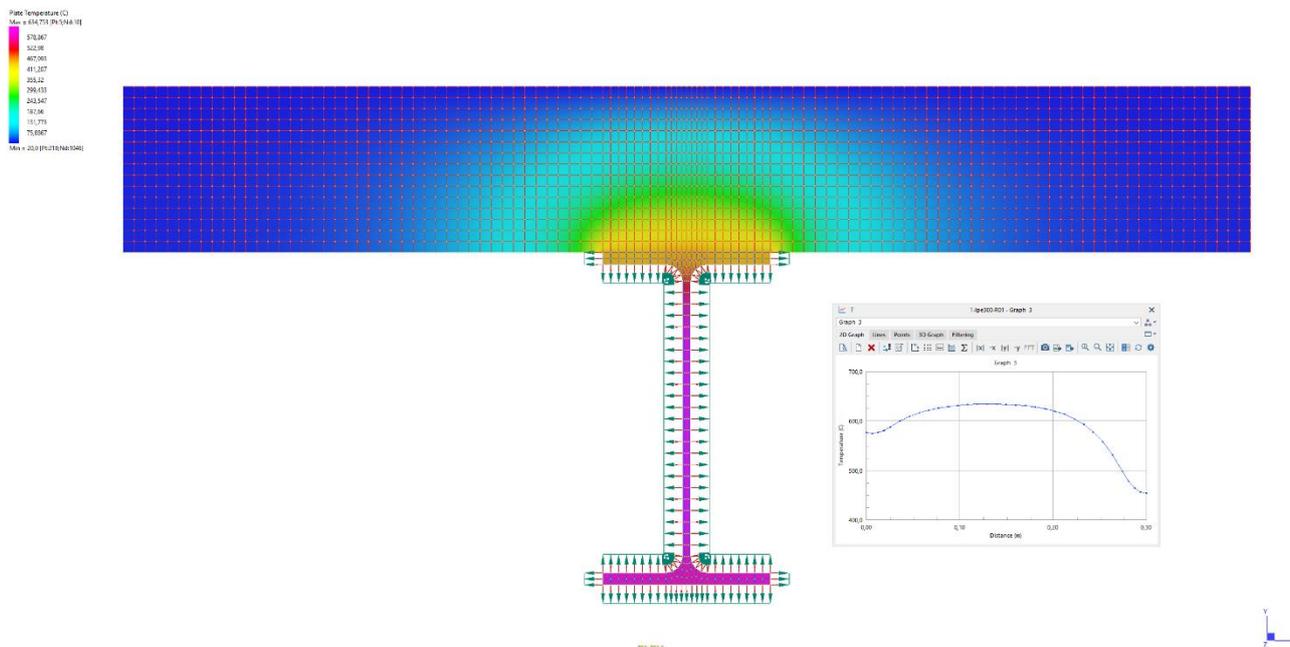


Fig. 13 – contour delle temperature all’istante $t = 750$ s e andamento delle temperature lungo l’asse locale y per il caso studio

5 CONCLUSIONI

Nel presente articolo si sono confrontati i risultati delle analisi di resistenza al fuoco di una semplice struttura, costituita da una trave IPE 300 in semplice appoggio. L’analisi semplificata è stata eseguita con il software [Straus7](#), [6], mentre le analisi più accurate sono state eseguite utilizzando un nuovo applicativo di Straus7, sviluppato dallo scrivente. Il confronto tra le analisi ha permesso la valutazione di fattori importanti nelle analisi strutturali antincendio, ovvero l’abbattimento del limite di proporzionalità con la temperatura e la variazione della temperatura nella sezione.

Entrambi i fattori portano ad una stima diversa dei tempi di collasso e degli spostamenti della struttura. Nello specifico, è emerso che con l’analisi meno accurata si ottengono tempi di collasso minori, quindi a favore di sicurezza, spostamenti verticali sottostimati e spostamenti orizzontali leggermente sovrastimati rispetto all’analisi rigorosa.

Il nuovo applicativo di Straus7, [6], per le verifiche strutturali antincendio consente quindi l’ottenimento di risultati più accurati e spinti, e porta il software Straus7 allo stesso livello dei codici dedicati alla valutazione della resistenza al fuoco delle strutture, soddisfacendo i requisiti degli Eurocodici strutturali.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 17/01/2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” – 2018
- [2] Circ. esplicativa NTC 2018 n. 7 del 21/01/2019
- [3] UNI EN 1992-1-2 EC2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l’incendio
- [4] UNI EN 1993-1-2 EC3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l’incendio
- [5] D.M. 03/08/2015 – Codice di prevenzione incendi, aggiornato con il D.M. 22/11/2022
- [6] Straus7, codice di calcolo agli elementi finiti, distribuito in Italia dalla HSH srl di Padova, www.hsh.info
- [7] Straus7 Theoretical Manual. Theoretical background to the Straus7 finite element analysis system - 2004 G+D Computing
- [8] Straus7 API Manual. Documentation for the Straus7 Application Programming Interface - Strand7 Pty Ltd
- [9] ST7-1.55.30.5 – Evolution of Beam Temperature using ISO834 Fire Curve – Strand7 Webnotes – Theory/Results – Strand7 Pty Ltd
- [10] ST7-1.55.30.6 – Frame Collapse Due to Fire DRAFT 23 – Strand7 Webnotes – Theory/Results – Strand7 Pty Ltd
- [11] Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio – E. Nigro, S. Pustorino, G. Cefarelli, P. Princi – Ed. Hoepli, 2009
- [12] Revisione critica di calcoli avanzati di resistenza al fuoco – C. Crosti, A. Marino – Rivista antincendio n. 12/2019