

Analisi termo-meccanica al fuoco

Capacità portante residua della sezione riscaldata

Tutorial SectionPro · Resistenza residua di una sezione in condizioni di incendio, mediante il metodo dell'isoterma 500 °C della EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introduzione

Il calcolo al fuoco si svolge in due fasi successive. La prima fase è termica, come descritto nell'articolo precedente: SectionPro risolve il problema di trasferimento del calore sulla sezione reale e restituisce il campo di temperatura nel calcestruzzo, nelle armature e in ogni profilo in acciaio annegato ad ogni istante richiesto.

La seconda fase è meccanica. Per ciascuna durata di incendio selezionata, i moduli meccanici partono dal corrispondente campo di temperatura e ne deducono la sezione resistente utilizzata per la verifica. Il contributo del calcestruzzo è ridotto in funzione della regione riscaldata della sezione, mentre le barre d'armatura e il profilo in acciaio annegato ricevono proprietà meccaniche dipendenti dalla temperatura. La sezione riscaldata così ottenuta viene poi analizzata nello stesso spirito di una sezione a temperatura ambiente: verifica di un caso di carico, curve e superficie di interazione, distanze, curve di rigidezza e tempo a rottura.

Il metodo dell'isoterma 500 °C

Per il calcestruzzo, SectionPro segue il metodo dell'isoterma 500 °C della EN 1992-1-2. Il calcestruzzo riscaldato oltre i 500 °C viene scartato; il calcestruzzo rimasto al di sotto dei 500 °C è conservato con la sua piena resistenza a temperatura ambiente e la sua consueta legge parabola-rettangolo ($\varepsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). La geometria resistente si riduce quindi alla regione racchiusa dall'isoterma 500 °C, che si contrae al crescere dell'esposizione.

Ogni barra d'armatura è ridotta alla propria temperatura: il suo limite di snervamento e il suo modulo diventano $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ e $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, con i fattori di riduzione della EN 1992-1-2 (Tabelle 3.2a e 3.2b). Una barra situata al di fuori dell'isoterma 500 °C non viene rimossa; essa contribuisce comunque con la sua resistenza ridotta.

Lo stesso trattamento si applica a un profilo strutturale annegato quando è discretizzato nella fase termica: ogni elemento in acciaio è letto alla sua temperatura, ridotto da $k_y(\theta)$ e $k_E(\theta)$, e il calcestruzzo che esso occupa viene rimosso affinché non sia conteggiato due volte. Una volta costruita la sezione riscaldata, la verifica meccanica procede come un'analisi di sezione standard, con il fuoco che influisce

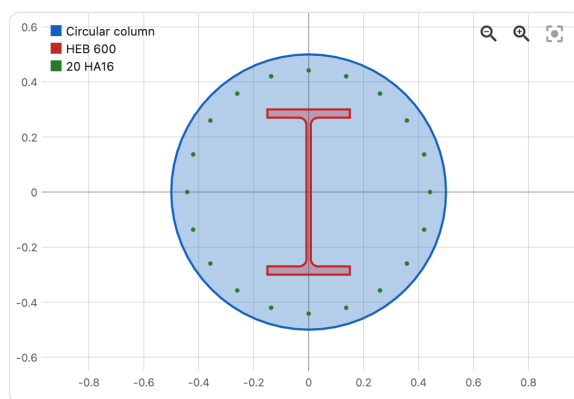
sulla geometria resistente e sulle leggi dei materiali utilizzate all'istante selezionato. Su questa sezione ridotta, SectionPro esegue:

- Verifica di sezione: l'equilibrio di un caso di carico, con il campo completo di tensioni e deformazioni a un dato istante.
- Curva di interazione: la frontiera di resistenza in un piano di sollecitazioni scelto, con una componente fissata.
- Superficie di interazione: il dominio di resistenza 3D completo in (N, M_z, M_y) .
- Distanze: il grado di utilizzazione di ciascun carico mediante proiezione su tale superficie.
- Rigidezza: la risposta momento-curvatura e la rigidezza flessionale secante e tangente.
- Tempo a rottura: il tempo di esposizione al quale il carico esce dal dominio di resistenza.

La sezione di esempio

I calcoli sono illustrati sul pilastro composto fornito con gli esempi di SectionPro:

- Sezione circolare, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Profilo HEB 600 annegato in acciaio S235.
- 20 barre $\varnothing 16$ B500B sul perimetro.
- Esposizione all'incendio standard ISO 834.



Verifica di sezione

Per un carico (N, M_z, M_y) specificato per la verifica, SectionPro determina lo stato di deformazione $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, una deformazione assiale e due curvature, che soddisfa l'equilibrio interno con le sollecitazioni imposte. Lo risolve in modo iterativo, integrando le tensioni sulla sezione riscaldata ad ogni passo: il calcestruzzo conservato sui suoi contorni, le barre e il profilo discretizzato come fibre, ciascuno governato dalla propria legge ridotta.

Dallo stato di deformazione convergente, SectionPro estrae le tensioni e le deformazioni in ogni fibra, la posizione dell'asse neutro e un grado di utilizzazione definito come il rapporto tra la deformazione della fibra determinante e la deformazione ultima di quel materiale. Un grado di utilizzazione inferiore a 1 significa che il carico è sopportato; un valore pari o superiore a 1 significa che la sezione ridotta non è più in grado di equilibrarlo.

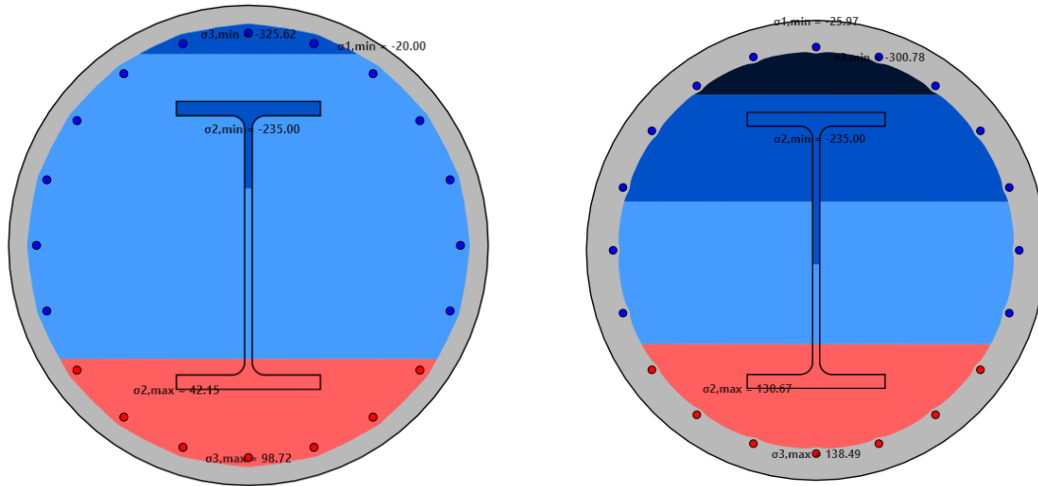


Figura 1: Stato di tensione e deformazione convergente a R120 e R240 sotto il carico $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN e kN · m.

Nell'esempio il carico è $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN e kN · m. Le viste a R120 e R240 applicano lo stesso carico su una sezione la cui area resistente si riduce con l'esposizione: il calcestruzzo all'interno dell'isoterma 500 °C sopporta la compressione, mentre le barre e il profilo annegato, ancora freddi, equilibrano la flessione. A R240, la sezione raggiunge la rottura per schiacciamento del calcestruzzo conservato.

Curva di interazione N–Mz

La curva di interazione $N-M_z$ è la frontiera di resistenza della sezione in flessione retta: l'insieme delle coppie forza assiale–momento flettente che essa può sopportare attorno all'asse in esame. Ricalcolate per ciascuna durata di incendio sulla sezione ridotta, le curve sovrapposte offrono una visione diretta della capacità persa a causa del riscaldamento.

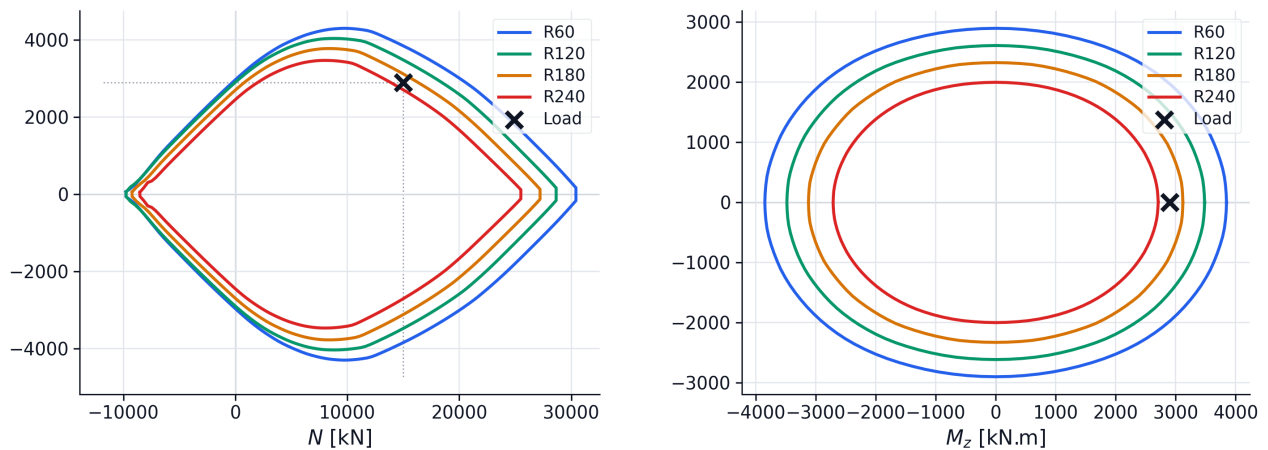


Figura 2: Curve di interazione al fuoco $N-M_z$ e M_y-M_z sotto ISO 834.

Le figure mostrano la perdita di capacità all'aumentare della temperatura: i domini di resistenza si contraggono progressivamente con la durata di incendio. Per il carico selezionato, la rottura si verifica tra R180 e R240.

Superficie di interazione 3D

In flessione deviata la resistenza non può più essere rappresentata da una singola curva piana: diventa una superficie chiusa nello spazio (N, M_z, M_y) , il dominio di resistenza della sezione. SectionPro calcola questa superficie direttamente dagli stati di deformazione ultima della sezione, presi in ogni direzione di flessione. Costruita sulla sezione riscaldata, essa consente di verificare direttamente qualsiasi carico deviato, senza ridurlo a un asse preferenziale: un carico interno alla superficie è sopportato, un carico esterno supera la capacità.

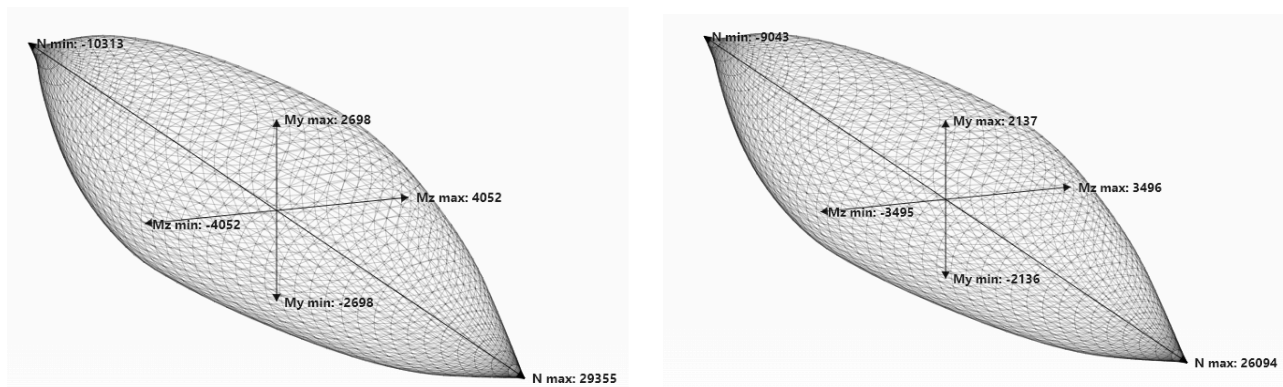


Figura 3: Superficie di interazione di resistenza al fuoco $(N-M_z-M_y)$ a R120 e R240.

Distanze

Il modulo delle distanze verifica graficamente più casi di carico in flessione deviata rispetto alla stessa superficie di interazione. Ogni carico (N, M_z, M_y) è proiettato sulla superficie e restituito con un grado di utilizzazione η , cosicché l'ingegnere può leggere immediatamente quali carichi restano all'interno del dominio di resistenza e quali lo superano.

- $\eta < 1$: il carico resta **interno** e la sezione dispone di riserva di capacità.
- $\eta = 1$: il carico si trova sulla frontiera, esattamente al limite.
- $\eta > 1$: il carico diventa **esterno** e la capacità è superata.

In condizioni di incendio il dominio si contrae con l'esposizione, quindi lo stato di uno stesso carico può passare da interno a esterno all'aumentare della durata.

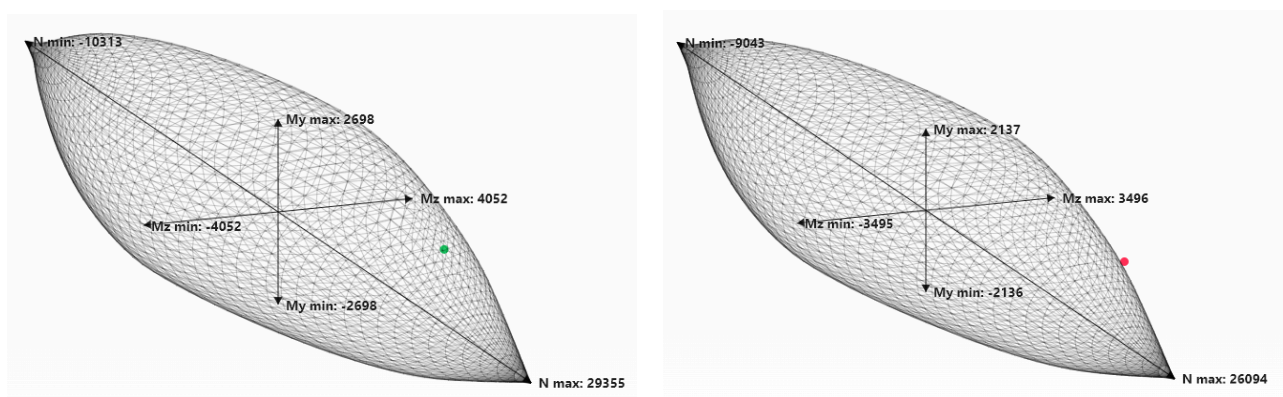


Figura 4: Verifica basata sulle distanze di un carico al fuoco sul dominio di resistenza 3D, a R120 (sinistra) e R240 (destra). Il dominio si contrae con l'esposizione; la distanza normalizzata η indica se il carico resta **interno** ($\eta \leq 1$) o diventa **esterno** ($\eta > 1$).

Il punto di carico passa da **interno** a R120 a **esterno** a R240, il che è coerente con i risultati della verifica di sezione e della curva di interazione.

Rigidezza al fuoco

Il riscaldamento riduce anche la rigidezza flessionale dei pilastri. All'aumentare della curvatura, questa perdita di rigidezza può amplificare gli effetti del secondo ordine ancor prima che sia raggiunta la resistenza ultima.

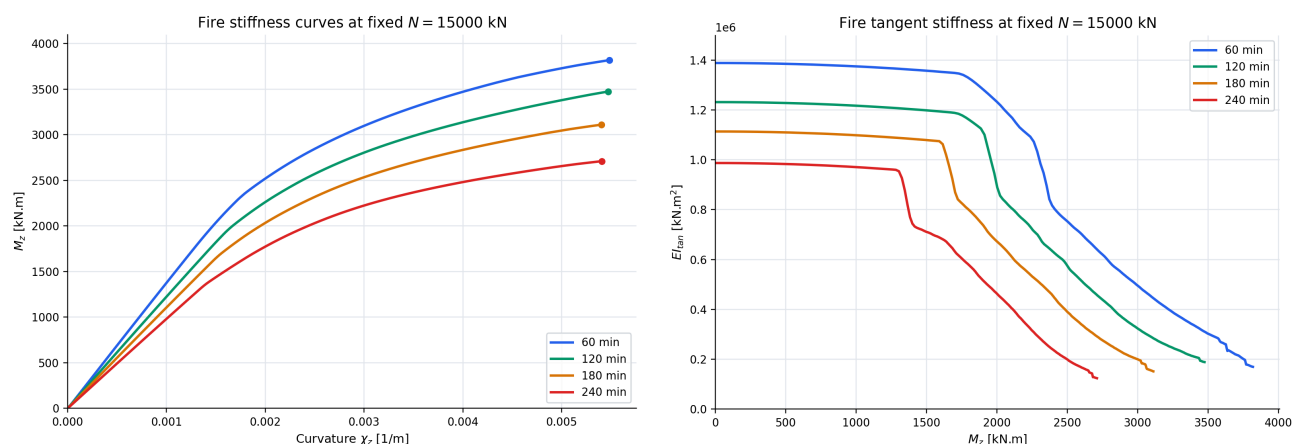


Figura 5: Rigidezza al fuoco a $N = 15000$ kN e $M_y = 0$. A sinistra, la risposta momento-curvatura $M_z-\chi$. A destra, la rigidezza tangente EI_{tan} in funzione di M_z .

Le curve mostrano una netta degradazione della rigidezza con la durata di incendio: la risposta momento-curvatura si appiattisce e la rigidezza tangente crolla bruscamente man mano che la sezione riscaldata si avvicina alla rottura.

Tempo a rottura

Il tempo a rottura è il calcolo più specifico dell'analisi al fuoco. Per un carico di esercizio fissato, SectionPro ricostruisce la sezione ridotta a ogni istante di uscita termica e ne risolve l'equilibrio. La capacità diminuisce man mano che l'isoterma 500 °C si contrae e le temperature degli acciai aumentano; il tempo a rottura è l'istante in cui il carico esce dal dominio di resistenza, quando la sezione ridotta non è più in grado di equilibrarlo entro i limiti di deformazione dei materiali.

Viene quindi eseguita una prova di isolamento sulla stessa sezione per verificare se una protezione passiva risolve questo specifico problema di resistenza al fuoco. Lo stesso carico è valutato dapprima sulla sezione nuda, poi con uno strato isolante continuo sul perimetro del calcestruzzo.

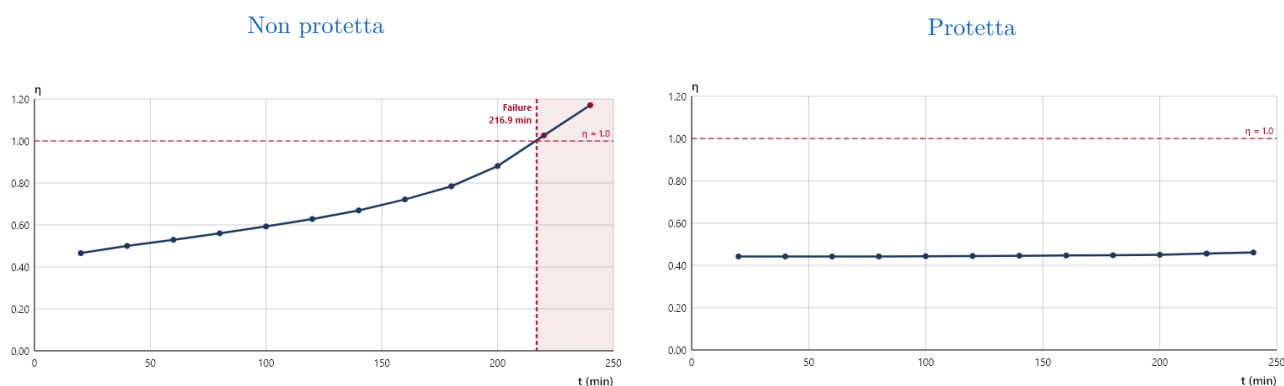


Figura 6: Tempo a rottura sotto il carico $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN e kN · m. In questo caso la protezione passiva sposta l'uscita dal dominio di resistenza oltre R240.

La protezione è modellata come uno strato passivo continuo descritto da quattro parametri termici. Per questa prova di isolamento sono stati utilizzati i seguenti valori:

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)

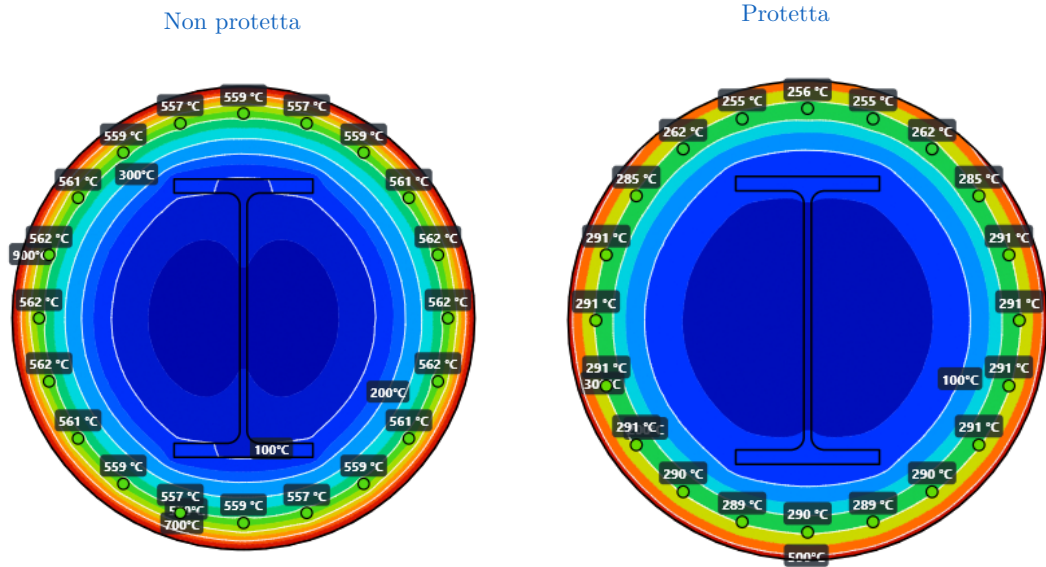


Figura 7: Campo di temperatura a R240, sezione nuda e protetta.

La protezione è molto efficace in questo caso: le barre, con la protezione passiva, scendono da circa 560 °C a circa 300 °C e il calcestruzzo resta al di sotto dei 500 °C anche dopo 240 min, cosicché l'intera sezione di calcestruzzo è conservata meccanicamente.

Prestazioni del software

Il compito principale è il calcolo del campo termico alle durate di incendio richieste. Una volta disponibili questi campi di temperatura, le verifiche meccaniche sono rapide e l'intero flusso di lavoro resta al di sotto di un secondo per questo esempio.

Calcolo	Tempo
Campo termico (2 istanti, R120/R240)	0,20 s
Verifica di sezione (tensioni-deformazioni)	+ 4 ms
Curva di interazione N-Mz (160 punti)	+ 31 ms
Dominio My-Mz a N fissato	+ 35 ms
Superficie di interazione 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Curva di rigidezza (momento-curvatura)	+ 11 ms
Tempo a rottura (scansione completa)	+ 52 ms

Pilastro composto dell'articolo, misurato su una macchina desktop. I tempi meccanici sono forniti dopo la risoluzione del campo termico.

Conclusione

Il metodo dell'isoterma 500 °C trasforma il campo termico in una sezione resistente ridotta: il calcestruzzo mantenuto alla sua resistenza all'interno dell'isoterma, le barre e l'acciaio annegato indeboliti

dalla loro temperatura locale. A partire da questo stato riscaldato, l'analisi fornisce la resistenza del carico imposto, i domini di interazione, le distanze dei carichi, la perdita di rigidezza e il tempo in cui il carico esce dal dominio di resistenza.

Sul pilastro composto studiato, il profilo annegato resta protetto dal calcestruzzo circostante e conserva una quota significativa della capacità alle durate intermedie. La protezione passiva continua abbassa nettamente le temperature a R240 e posticipa il tempo a rottura del carico in esame.

I diversi calcoli sono coerenti tra loro: puntano tutti alla stessa perdita di capacità e allo stesso intervallo di rottura. La verifica di sezione fornisce lo stato dettagliato di tensione e deformazione per un carico. La curva di interazione è la vista ingegneristica preferita quando serve un dominio di resistenza in un piano. La superficie di interazione fornisce il dominio deviato globale. La verifica delle distanze fornisce uno stato OK/KO rapido per più carichi. Le curve di rigidezza mostrano se la sezione è entrata in un regime di forte degradazione della rigidezza. L'analisi del tempo a rottura fornisce infine un tempo di esposizione approssimativo prima che il carico non possa più essere sopportato. Ogni vista ha il proprio punto di forza e, insieme, offrono una lettura coerente del comportamento al fuoco.