

Analisi termica al fuoco

Campo di temperatura

Tutorial SectionPro · Profili di temperatura transitori
in una sezione soggetta al fuoco, mediante elementi finiti

BridgeKernel · 2026

I Introduzione

La verifica al fuoco di una sezione in calcestruzzo armato si basa innanzitutto sulla conoscenza della temperatura in ogni punto della sezione dopo una data durata di esposizione, ad esempio 30, 60, 90 o 120 minuti. Questa distribuzione spaziale, il campo termico, governa il seguito del calcolo: la caduta di resistenza del calcestruzzo e degli acciai, poi la capacità portante residua, ne derivano direttamente. Essa costituisce tuttavia una fase termica autonoma, che SectionPro risolve e restituisce indipendentemente dalla verifica meccanica.

Il presente articolo si limita a questa fase termica. Ne richiama i fondamenti, descrive il modello adottato in SectionPro, poi confronta i risultati con i profili di riferimento dell'Allegato A della EN 1992-1-2.

Il problema termico

Il trasferimento di calore transitorio nella sezione obbedisce all'equazione del calore non lineare:

$$\rho(\theta) \cdot c_p(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\theta) \nabla \theta)$$

Le proprietà termiche del calcestruzzo variano con la temperatura. La conduttività $\lambda(\theta)$ decresce in modo monotono, mentre il calore specifico $c_p(\theta)$ presenta un picco marcato intorno ai 115 °C, associato alla vaporizzazione dell'acqua libera e di ampiezza tanto maggiore quanto più elevato è il contenuto di umidità. Questo picco assorbe una parte importante del flusso e ritarda nettamente la progressione del fronte di calore verso il nucleo della sezione.

Sulle facce esposte, il flusso netto combina convezione e irraggiamento:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \underbrace{\alpha_c (\theta_g - \theta_m)}_{\text{convezione}} + \underbrace{\Phi \varepsilon_m \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]}_{\text{irraggiamento}}$$

dove θ_g è la temperatura dei gas (curva di incendio), θ_m la temperatura di superficie, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $\varepsilon_m = 0.7$ (valori predefiniti, regolabili). Le facce non esposte si suppongono adiabatiche ($\partial\theta/\partial n = 0$).

La curva di incendio standard ISO 834 fornisce la temperatura dei gas:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad [t \text{ in min}]$$

Queste equazioni coinvolgono diversi parametri: la curva di incendio, le leggi $\lambda(\theta)$ e $c_p(\theta)$ del materiale, i coefficienti di scambio in superficie. Essi assumono per impostazione predefinita i valori della EN 1992-1-2 e restano modificabili in ingresso.

Il campo termico in SectionPro

SectionPro risolve il campo termico su una sezione di forma arbitraria, che sia piena, cava o composta da più materiali, senza limitarsi alle geometrie tabellate della norma. Le sue principali funzionalità:

- **Curve di incendio.** ISO 834 (incendio standard), idrocarburi, curva esterna, o curva definita dall'utente sotto forma di punti tempo-temperatura.
- **Esposizione per faccia.** Ogni faccia è esposta o meno in modo indipendente. Una trave gettata in una soletta presenta tre facce al fuoco, restando adiabatica la faccia superiore; un pilastro ne presenta quattro.
- **Protezioni.** Uno strato di protezione può essere definito faccia per faccia (spessore d_p , conduttività λ_p , massa volumica ρ_p , calore specifico $c_{p,p}$): lastre di gesso, intonaci proiettati o isolanti. La sua resistenza termica entra nella condizione al contorno.
- **Materiali e geometria.** Calcestruzzo siliceo o calcareo, contenuto di umidità, massa volumica e limite di conduttività sono regolabili. La sezione può presentare fori e cavità, zone multi-materiale e acciai annegati.

Si ottiene, ad ogni istante richiesto, il campo di temperatura completo: mappa di isoterme, temperature alle armature e grandezze sintetiche (temperatura massima in superficie, temperatura media, temperatura al nucleo). Questi dati fungono poi da ingresso al calcolo della capacità residua, che sarà oggetto dell'articolo successivo.

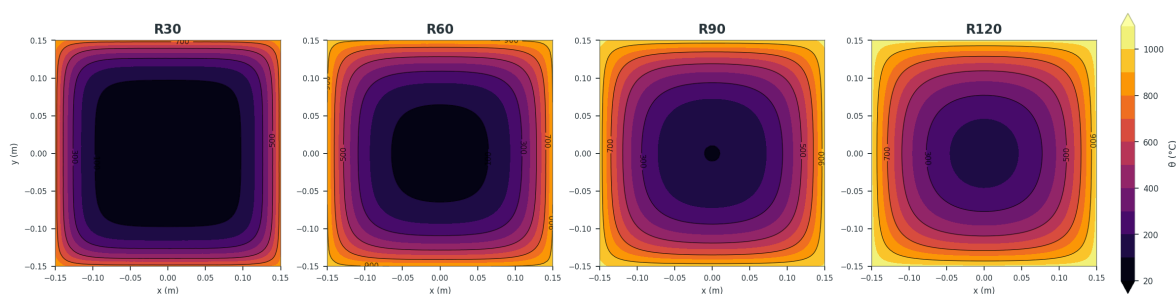


Figura 1: Esempio di campo calcolato da SectionPro: pilastro 300×300 esposto sulle sue quattro facce, isoterme alle durate R30 / R60 / R90 / R120.

Validazione secondo l'Allegato A della EN 1992-1-2

L'Allegato A della EN 1992-1-2 fornisce profili di temperatura di riferimento per sezioni correnti esposte all'incendio standard ISO 834: una soletta (Fig A.2), travi (Fig A.3 a A.10) e pilastri (Fig A.11 a A.20). Questi profili sono stati stabiliti per un contenuto di umidità dell'1,5 % e il limite inferiore di conduttività. Sono queste le ipotesi che adottiamo come riferimento di validazione.

Due geometrie rappresentative della norma sono riprodotte con queste stesse ipotesi: la soletta, caso unidimensionale esposto su una faccia, e il pilastro esposto sulle sue quattro facce, per il quale la norma fornisce direttamente la posizione dell'isoterma 500 °C che delimita il calcestruzzo considerato resistente. Su ciascun diagramma, le isoterme calcolate da SectionPro, in rosso, sono sovrapposte ai profili pubblicati nell'Allegato A, in nero, tracciati nello stesso riferimento. Il confronto verte così direttamente sulle stesse curve.

— EN 1992-1-2, Allegato A — SectionPro

Il trasferimento nella soletta resta quasi unidimensionale a partire dalla faccia esposta, mentre il pilastro sviluppa un campo doppiamente simmetrico il cui nucleo freddo si restringe man mano che l'esposizione si prolunga.

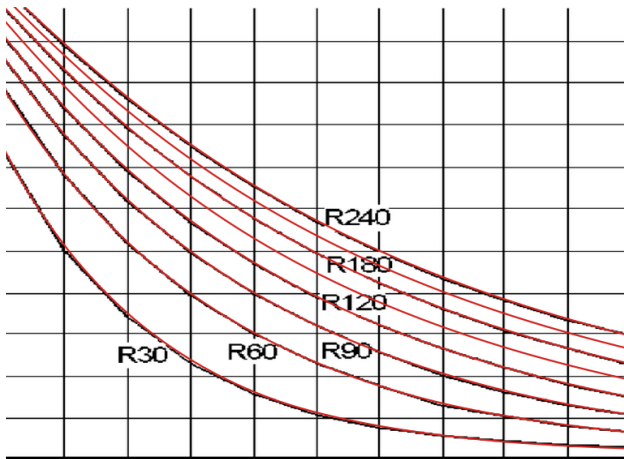


Figura 2: Soletta $h = 200$ mm esposta all'intradosso, da R30 a R240 (profondità da 0 a 100 mm in ascissa, temperatura in ordinata).

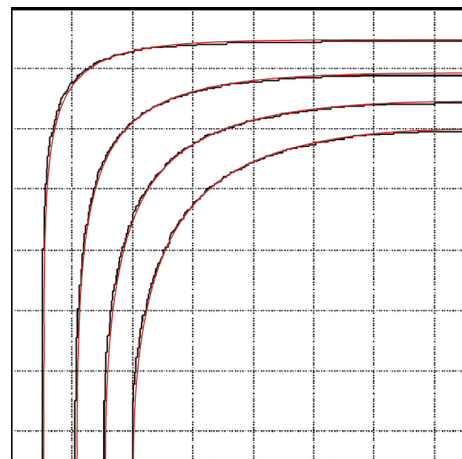


Figura 3: Pilastro 300×300 , isoterma 500 °C a R30, R60, R90 e R120 (quarto di sezione, da 0 a 150 mm di lato).

Bilancio di validazione. Sulla soletta, caso unidimensionale di riferimento, il profilo calcolato si sovrappone a quello della Fig A.2 su tutto l'intervallo di copriferri utili così come fino al nucleo. Sul pilastro esposto sulle sue quattro facce, la posizione dell'isoterma 500 °C segue la norma ad ogni durata. Il solutore termico è così validato su queste due configurazioni di esposizione.

| Esempio applicativo

Oltre alle forme tabellate dalla norma, SectionPro tratta una geometria qualsiasi. I due esempi seguenti, una sezione esagonale e una sezione circolare, sono esposti su tutto il loro perimetro.

esposto sulle sue quattro facce segue la norma ad ogni durata. Il campo così ottenuto fornisce una base affidabile per il calcolo della capacità portante residua in situazione di incendio.