

Análisis térmico frente al fuego

Campo de temperatura

Tutorial de SectionPro · Perfiles de temperatura transitorios
en una sección sometida al fuego, mediante elementos finitos

BridgeKernel · 2026

Introducción

La verificación al fuego de una sección de hormigón armado se basa ante todo en el conocimiento de la temperatura en cada punto de la sección tras una duración de exposición dada, por ejemplo 30, 60, 90 o 120 minutos. Esta distribución espacial, el campo térmico, gobierna el resto del cálculo: la caída de resistencia del hormigón y de los aceros, y después la capacidad portante residual, se derivan directamente de ella. Constituye no obstante una etapa térmica autónoma, que SectionPro resuelve y presenta de forma independiente de la verificación mecánica.

El presente artículo se limita a esta etapa térmica. Recuerda sus fundamentos, describe el modelo adoptado en SectionPro y después confronta los resultados con los perfiles de referencia del Anexo A de la EN 1992-1-2.

El problema térmico

La transferencia de calor transitoria en la sección obedece a la ecuación del calor no lineal:

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

Las propiedades térmicas del hormigón varían con la temperatura. La conductividad $\lambda(\theta)$ decrece de forma monótona, mientras que el calor específico $c_p(\theta)$ presenta un pico marcado en torno a 115 °C, asociado a la vaporización del agua libre y de amplitud tanto mayor cuanto más elevado es el contenido de humedad. Este pico absorbe una parte importante del flujo y retrasa notablemente la progresión del frente de calor hacia el núcleo de la sección.

En las caras expuestas, el flujo neto combina convección y radiación:

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

donde θ_g es la temperatura de los gases (curva de fuego), θ_m la temperatura de superficie, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $\varepsilon_m = 0.7$ (valores por defecto, ajustables). Las caras no expuestas se suponen adiabáticas ($\partial\theta/\partial n = 0$).

La curva de fuego normalizada ISO 834 da la temperatura de los gases:

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

Estas ecuaciones involucran varios parámetros: la curva de fuego, las leyes $\lambda(\theta)$ y $c_p(\theta)$ del material, los coeficientes de intercambio en superficie. Toman por defecto los valores de la EN 1992-1-2 y permanecen modificables en la entrada.

El campo térmico en SectionPro

SectionPro resuelve el campo térmico sobre una sección de forma arbitraria, ya sea maciza, hueca o compuesta de varios materiales, sin limitarse a las geometrías tabuladas de la norma. Sus principales capacidades:

- **Curvas de fuego.** ISO 834 (fuego normalizado), hidrocarburos, curva exterior, o curva definida por el usuario en forma de puntos tiempo-temperatura.
- **Exposición por cara.** Cada cara está expuesta o no de forma independiente. Una viga hormigonada en una losa cuenta con tres caras al fuego, permaneciendo adiabática la cara superior; un pilar cuenta con cuatro.
- **Protecciones.** Puede definirse una capa de protección cara por cara (espesor d_p , conductividad λ_p , densidad ρ_p , calor específico $c_{p,p}$): placas de yeso, revestimientos proyectados o aislantes. Su resistencia térmica entra en la condición de contorno.
- **Materiales y geometría.** Hormigón silíceo o calcáreo, contenido de humedad, densidad y límite de conductividad son ajustables. La sección puede presentar huecos y cavidades, zonas multimaterial y aceros embebidos.

Se obtiene, en cada instante solicitado, el campo de temperatura completo: mapa de isotermas, temperaturas en las armaduras y magnitudes sintéticas (temperatura máxima en la superficie, temperatura media, temperatura en el núcleo). Estos datos sirven luego de entrada al cálculo de capacidad residual, que será objeto del artículo siguiente.

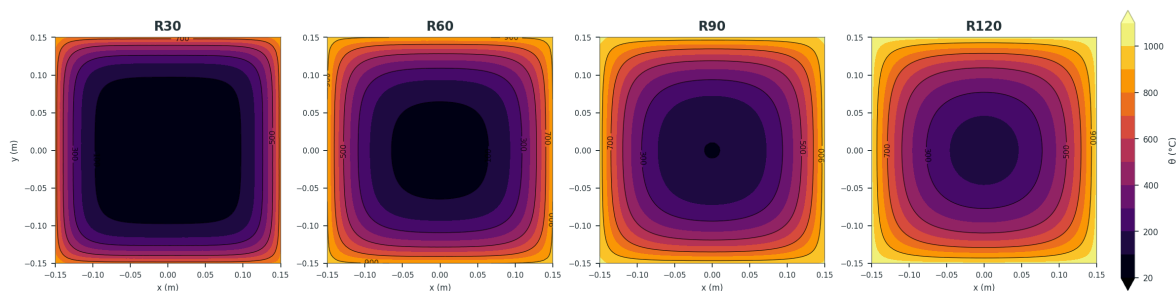


Figura 1: Ejemplo de campo calculado por SectionPro: pilar 300×300 expuesto en sus cuatro caras, isotermas a las duraciones R30 / R60 / R90 / R120.

Validación según el Anexo A de la EN 1992-1-2

El Anexo A de la EN 1992-1-2 proporciona perfiles de temperatura de referencia para secciones habituales expuestas al fuego normalizado ISO 834: una losa (Fig A.2), vigas (Fig A.3 a A.10) y

pilares (Fig A.11 a A.20). Estos perfiles se establecieron para un contenido de humedad del 1,5 % y el límite inferior de conductividad. Son estas hipótesis las que adoptamos como patrón de validación.

Se reproducen dos geometrías representativas de la norma con estas mismas hipótesis: la losa, caso unidimensional expuesto en una cara, y el pilar expuesto en sus cuatro caras, para el cual la norma proporciona directamente la posición de la isoterma 500 °C que delimita el hormigón considerado resistente. En cada diagrama, las isothermas calculadas por SectionPro, en rojo, se superponen a los perfiles publicados en el Anexo A, en negro, trazados en el mismo sistema de referencia. La confrontación recae así directamente sobre las mismas curvas.

— EN 1992-1-2, Anexo A — SectionPro

La transferencia en la losa permanece casi unidimensional desde la cara expuesta, mientras que el pilar desarrolla un campo doblemente simétrico cuyo núcleo frío se estrecha a medida que la exposición se prolonga.

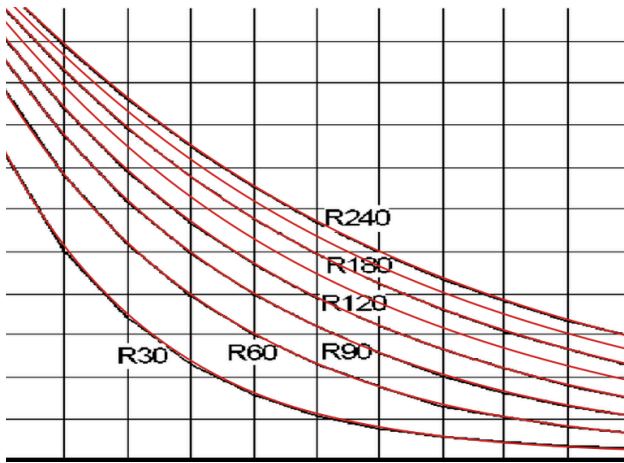


Figura 2: Losa $h = 200$ mm expuesta en su cara inferior, de R30 a R240 (profundidad 0 a 100 mm en abscisas, temperatura en ordenadas).

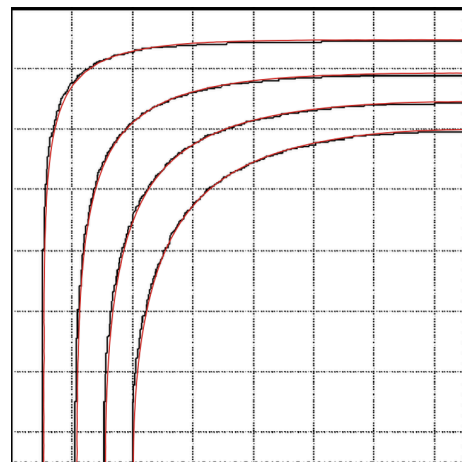


Figura 3: Pilar 300×300 , isoterma 500 °C a R30, R60, R90 y R120 (cuarto de sección, 0 a 150 mm de lado).

Balance de validación. En la losa, caso unidimensional de referencia, el perfil calculado se superpone al de la Fig A.2 en todo el rango de recubrimientos útiles y hasta el núcleo. En el pilar expuesto en sus cuatro caras, la posición de la isoterma 500 °C sigue la norma en cada duración. El solver térmico queda así validado en estas dos configuraciones de exposición.

■ Ejemplo de aplicación

Más allá de las formas tabuladas por la norma, SectionPro trata una geometría cualquiera. Los dos ejemplos siguientes, una sección hexagonal y una sección circular, están expuestos en todo su perímetro.

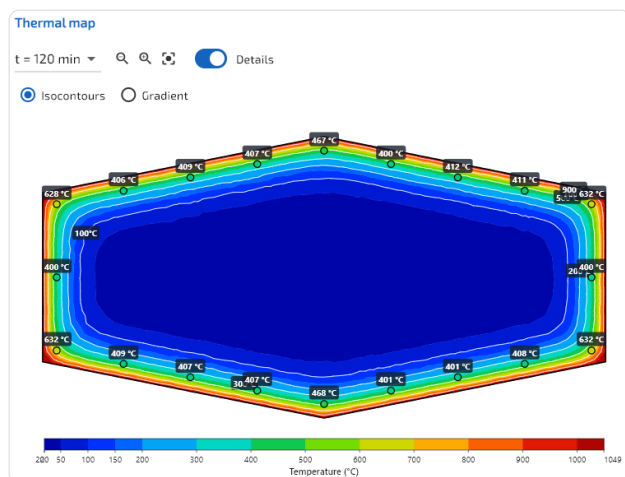


Figura 4: Sección hexagonal, campo de temperatura a $t = 120$ min. El modo « Details » muestra las temperaturas en las armaduras (marcadores): núcleo central frío, esquinas calientes en la superficie.

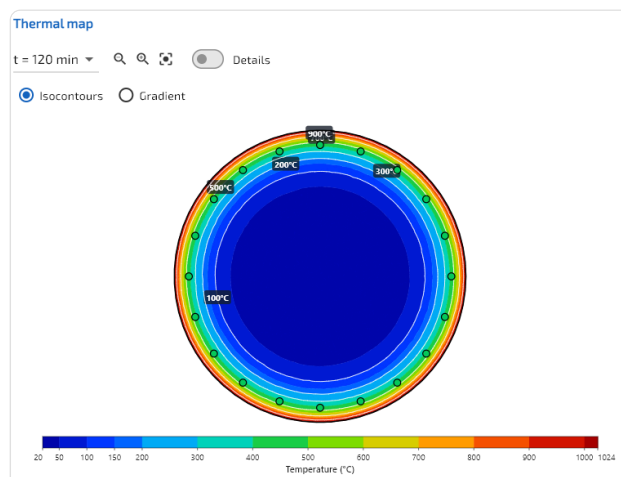


Figura 5: Sección circular expuesta en todo su perímetro, isothermas a $t = 120$ min. Los contornos de referencia (100, 200, 300, 500 y 900 °C) se trazan en blanco.

Rendimiento

El cálculo del campo térmico es casi instantáneo: menos de un segundo, incluso para las duraciones de resistencia más largas. Los tiempos medidos en los casos de validación se recogen a continuación.

Sección	Caras	Duración simulada	Tiempo de cálculo
Viga 300×160	3	R90 (3 instantes)	0,12 s
Pilar 300×300	4	R120 (4 instantes)	0,35 s
Viga 600×300	3	R120 (4 instantes)	0,52 s
Losa 200	1	R240 (8 instantes)	0,57 s

Exportación

El campo térmico se exporta en forma de imagen (mapa de isothermas, en tema claro u oscuro), en formato CSV (coordenadas de los nodos, temperaturas nodales en cada instante, temperaturas de las armaduras) y en la memoria de cálculo PDF producida por SectionPro. Los instantes de salida son libres, uniformes o elegidos uno a uno, lo que permite apuntar con precisión a las duraciones de resistencia reglamentarias R30, R60, R90 y R120.

Conclusión

El campo térmico constituye la base de toda verificación al fuego. SectionPro lo calcula mediante elementos finitos transitorios, resolviendo la ecuación del calor no lineal que acopla la conductividad dependiente de la temperatura, el calor específico con pico de humedad y la radiación en θ^4 , para una geometría cualquiera y una exposición definida cara por cara, protecciones incluidas. Las leyes de materiales y la curva de fuego toman en ella por defecto los valores de la EN 1992-1-2, modificables en la entrada.

La confrontación con los perfiles del Anexo A respalda este enfoque: el perfil calculado se superpone a la referencia en el caso unidimensional de la losa, y la posición de la isoterma 500 °C en el pilar

expuesto en sus cuatro caras sigue la norma en cada duración. El campo así obtenido proporciona una base fiable para el cálculo de la capacidad portante residual en situación de incendio.