

Análise térmica ao fogo

Campo de temperatura

Tutorial SectionPro · Perfis de temperatura transitórios
numa secção sujeita ao fogo, por elementos finitos

BridgeKernel · 2026

I Introdução

A verificação ao fogo de uma secção em betão armado assenta, antes de mais, no conhecimento da temperatura em cada ponto da secção após uma dada duração de exposição, por exemplo 30, 60, 90 ou 120 minutos. Esta distribuição espacial, o campo térmico, governa o resto do cálculo: a redução da resistência do betão e dos aços, e depois a capacidade resistente residual, decorrem diretamente dela. Constitui, porém, uma etapa térmica autónoma, que o SectionPro resolve e apresenta independentemente da verificação mecânica.

O presente artigo limita-se a esta etapa térmica. Recorda os seus fundamentos, descreve o modelo adotado no SectionPro e, em seguida, compara os resultados com os perfis de referência do Anexo A da EN 1992-1-2.

O problema térmico

A transferência de calor transitória na secção obedece à equação do calor não linear:

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

As propriedades térmicas do betão variam com a temperatura. A condutibilidade $\lambda(\theta)$ decresce de forma monótona, enquanto o calor específico $c_p(\theta)$ apresenta um pico acentuado em torno de 115 °C, associado à vaporização da água livre e de amplitude tanto maior quanto mais elevado for o teor de humidade. Este pico absorve uma parte importante do fluxo e atrasa nitidamente a progressão da frente de calor para o núcleo da secção.

Nas faces expostas, o fluxo líquido combina convecção e radiação:

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

onde θ_g é a temperatura dos gases (curva de incêndio), θ_m a temperatura de superfície, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $\varepsilon_m = 0.7$ (valores por defeito, ajustáveis). As faces não expostas são consideradas adiabáticas ($\partial\theta/\partial n = 0$).

A curva de incêndio normalizada ISO 834 fornece a temperatura dos gases:

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

Estas equações envolvem vários parâmetros: a curva de incêndio, as leis $\lambda(\theta)$ e $c_p(\theta)$ do material, os coeficientes de troca à superfície. Estes assumem por defeito os valores da EN 1992-1-2 e permanecem modificáveis na entrada.

O campo térmico no SectionPro

O SectionPro resolve o campo térmico numa secção de forma arbitrária, seja ela maciça, vazada ou composta por vários materiais, sem se restringir às geometrias tabeladas da norma. As suas principais capacidades:

- **Curvas de incêndio.** ISO 834 (incêndio normalizado), hidrocarbonetos, curva exterior, ou curva definida pelo utilizador sob a forma de pontos tempo-temperatura.
- **Exposição por face.** Cada face está exposta ou não de forma independente. Uma viga betonada numa laje conta com três faces ao fogo, permanecendo a face superior adiabática; um pilar conta com quatro.
- **Proteções.** Uma camada de proteção pode ser definida face a face (espessura d_p , condutibilidade λ_p , massa volúmica ρ_p , calor específico $c_{p,p}$): placas de gesso, argamassas projetadas ou isolantes. A sua resistência térmica entra na condição de fronteira.
- **Materiais e geometria.** Betão silicioso ou calcário, teor de humidade, massa volúmica e limite de condutibilidade são ajustáveis. A secção pode conter furos e cavidades, zonas multimaterial e armaduras embebidas.

Obtém-se, em cada instante pedido, o campo de temperatura completo: mapa de isotérmicas, temperaturas nas armaduras e grandezas sintéticas (temperatura máxima à superfície, temperatura média, temperatura no núcleo). Estes dados servem depois de entrada para o cálculo da capacidade residual, que será objeto do próximo artigo.

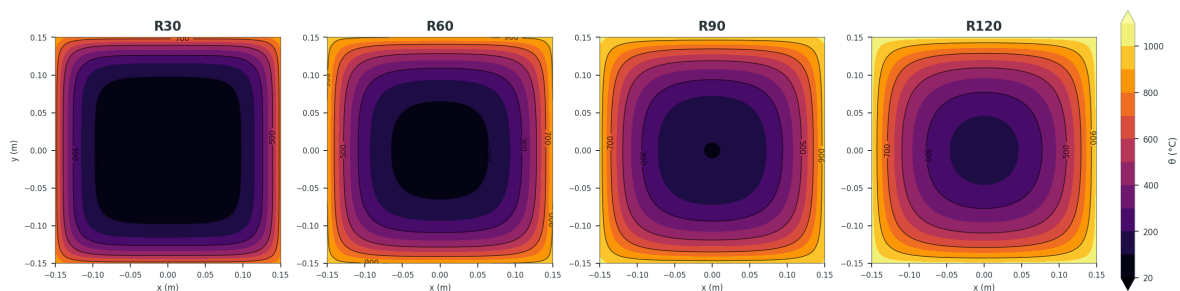


Figura 1: Exemplo de campo calculado pelo SectionPro: pilar 300×300 exposto nas suas quatro faces, isotérmicas às durações R30 / R60 / R90 / R120.

Validação segundo o Anexo A da EN 1992-1-2

O Anexo A da EN 1992-1-2 fornece perfis de temperatura de referência para secções correntes expostas ao incêndio normalizado ISO 834: uma laje (Fig A.2), vigas (Fig A.3 a A.10) e pilares (Fig A.11 a

A.20). Estes perfis foram estabelecidos para um teor de humidade de 1,5 % e o limite inferior de condutibilidade. São estas as hipóteses que adotamos como padrão de validação.

Duas geometrias representativas da norma são reproduzidas com estas mesmas hipóteses: a laje, caso unidimensional exposto numa face, e o pilar exposto nas suas quatro faces, para o qual a norma fornece diretamente a posição da isotérmica 500 °C que delimita o betão considerado resistente. Em cada diagrama, as isotérmicas calculadas pelo SectionPro, a vermelho, estão sobrepostas aos perfis publicados no Anexo A, a preto, traçados no mesmo referencial. A comparação incide assim diretamente sobre as mesmas curvas.

— EN 1992-1-2, Anexo A — SectionPro

A transferência na laje mantém-se quase unidimensional a partir da face exposta, enquanto o pilar desenvolve um campo duplamente simétrico cujo núcleo frio se estreita à medida que a exposição se prolonga.

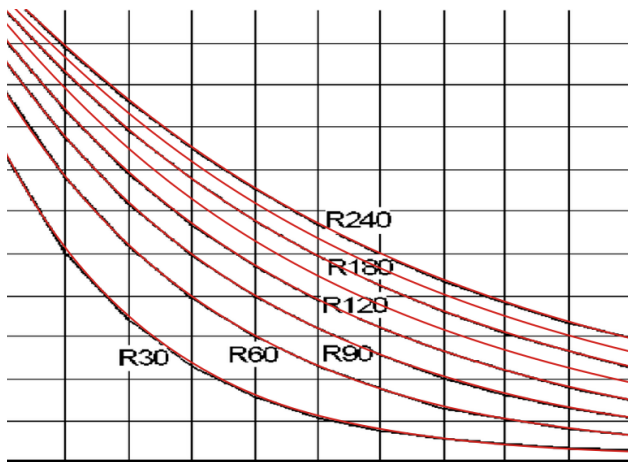


Figura 2: Laje $h = 200$ mm exposta na face inferior, de R30 a R240 (profundidade 0 a 100 mm em abcissa, temperatura em ordenada).

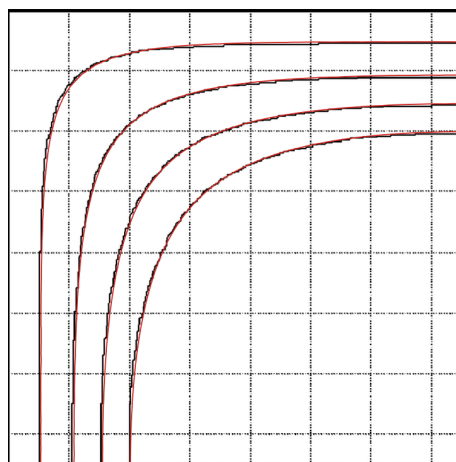


Figura 3: Pilar 300×300 , isotérmica 500 °C a R30, R60, R90 e R120 (quarto de seção, 0 a 150 mm de lado).

Balanco da validação. Na laje, caso unidimensional de referência, o perfil calculado sobrepõe-se ao da Fig A.2 em toda a gama de recobrimentos úteis, tal como até ao núcleo. No pilar exposto nas suas quatro faces, a posição da isotérmica 500 °C segue a norma em cada duração. O solver térmico fica assim validado nestas duas configurações de exposição.

Exemplo de aplicação

Para além das formas tabeladas pela norma, o SectionPro trata uma geometria qualquer. Os dois exemplos abaixo, uma secção hexagonal e uma secção circular, estão expostos em todo o seu perímetro.

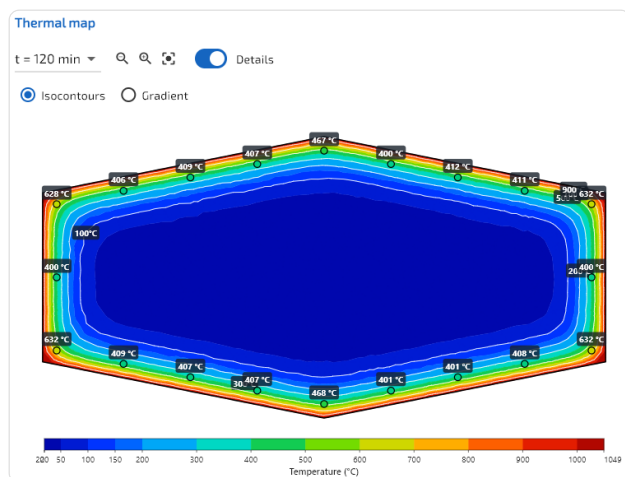


Figura 4: Secção hexagonal, campo de temperatura a $t = 120$ min. O modo « Details » apresenta as temperaturas nas armaduras (pastilhas): núcleo central frio, cantos quentes à superfície.

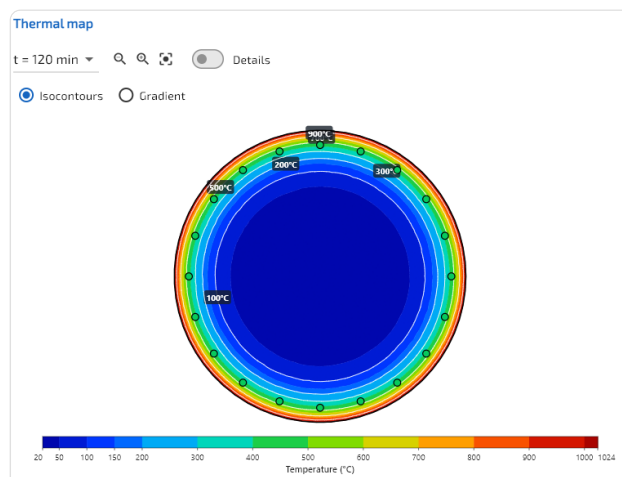


Figura 5: Secção circular exposta em todo o seu perímetro, isotérmicas a $t = 120$ min. Os contornos de referência (100, 200, 300, 500 e 900 °C) estão traçados a branco.

Desempenho

O cálculo do campo térmico é quase instantâneo: menos de um segundo, incluindo para as durações de resistência mais longas. Os tempos medidos nos casos de validação são apresentados abaixo.

Secção	Faces	Duração simulada	Tempo 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
Laje 200	1	R240 (8 instantes)	0,57 s

Exportação

O campo térmico é exportado sob a forma de imagem (mapa de isotérmicas, em tema claro ou escuro), no formato CSV (coordenadas dos nós, temperaturas nodais em cada instante, temperaturas das armaduras) e na nota de cálculo PDF produzida pelo SectionPro. Os instantes de saída são livres, uniformes ou escolhidos um a um, o que permite visar com precisão as durações de resistência regulamentares R30, R60, R90 e R120.

Conclusão

O campo térmico constitui a base de toda a verificação ao fogo. O SectionPro calcula-o por elementos finitos transitórios, resolvendo a equação do calor não linear que acopla a condutibilidade dependente da temperatura, o calor específico com pico de humidade e a radiação em θ^4 , para uma geometria qualquer e uma exposição definida face a face, incluindo proteções. As leis dos materiais e a curva de incêndio assumem aí por defeito os valores da EN 1992-1-2, modificáveis na entrada.

A comparação com os perfis do Anexo A reforça esta abordagem: o perfil calculado sobrepõe-se à referência no caso unidimensional da laje, e a posição da isotérmica 500 °C no pilar exposto nas suas

quatro faces segue a norma em cada duração. O campo assim obtido fornece uma base fiável para o cálculo da capacidade resistente residual em situação de incêndio.