

Análise térmica ao fogo

Campo de temperatura

Tutorial SectionPro · Perfis de temperatura transientes
em uma seção submetida ao fogo, por elementos finitos

BridgeKernel · 2026

I Introdução

A verificação ao fogo de uma seção de concreto armado baseia-se, antes de tudo, no conhecimento da temperatura em cada ponto da seção após uma dada duração de exposição, por exemplo 30, 60, 90 ou 120 minutos. Essa distribuição espacial, o campo térmico, governa o restante do cálculo: a queda de resistência do concreto e dos aços, e em seguida a capacidade portante residual, decorrem diretamente dela. Ela constitui, no entanto, uma etapa térmica autônoma, que o SectionPro resolve e apresenta independentemente da verificação mecânica.

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

O problema térmico

A transferência de calor transiente na seção 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 concreto variam com a temperatura. A condutividade $\lambda(\theta)$ 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 umidade. Esse pico absorve uma parcela importante do fluxo e retarda nitidamente a progressão da frente de calor em direção ao núcleo da seção.

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 padrão, ajustáveis). As faces não expostas são supostas adiabáticas ($\partial\theta/\partial n = 0$).

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

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

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

O campo térmico no SectionPro

O SectionPro resolve o campo térmico em uma seção de forma arbitrária, seja ela maciça, vazada ou composta por vários materiais, sem se restringir às geometrias tabeladas da norma. Suas principais capacidades:

- **Curvas de incêndio.** ISO 834 (incêndio-padrão), hidrocarbonetos, curva exterior, ou curva definida pelo usuário sob a forma de pontos tempo-temperatura.
- **Exposição por face.** Cada face está exposta ou não de forma independente. Uma viga moldada em uma laje possui três faces ao fogo, permanecendo a face superior adiabática; um pilar possui quatro.
- **Proteções.** Uma camada de proteção pode ser definida face a face (espessura d_p , condutividade λ_p , massa específica ρ_p , calor específico $c_{p,p}$): placas de gesso, argamassas projetadas ou isolantes. Sua resistência térmica entra na condição de contorno.
- **Materiais e geometria.** Concreto silicoso ou calcário, teor de umidade, massa específica e limite de condutividade são ajustáveis. A seção pode conter furos e cavidades, zonas multimateriais e aços embutidos.

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

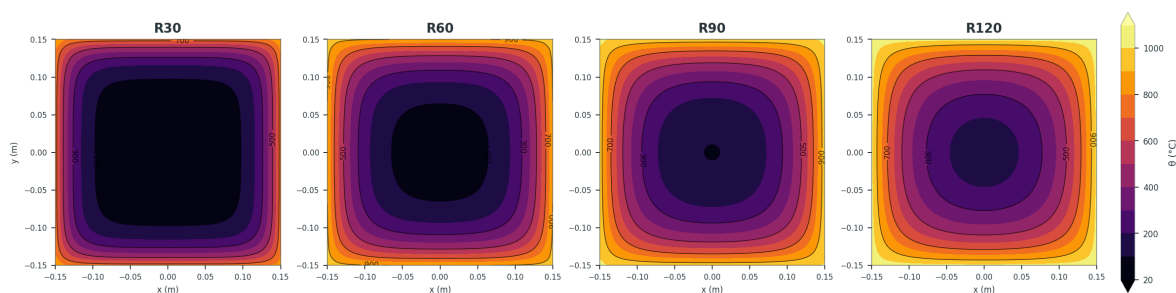


Figura 1: Exemplo de campo calculado pelo SectionPro: pilar 300×300 exposto em suas quatro faces, isotermas nas durações R30 / R60 / R90 / R120.

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 seções correntes expostas ao incêndio-padrão ISO 834: uma laje (Fig A.2), vigas (Fig A.3 a A.10) e pilares (Fig A.11 a A.20).

Esses perfis foram estabelecidos para um teor de umidade de 1,5 % e o limite inferior de condutividade. São essas hipóteses que adotamos como padrão de validação.

Duas geometrias representativas da norma são reproduzidas com essas mesmas hipóteses: a laje, caso unidimensional exposto em uma face, e o pilar exposto em suas quatro faces, para o qual a norma fornece diretamente a posição da isoterma 500 °C que delimita o concreto considerado resistente. Em cada diagrama, as isotermas calculadas pelo SectionPro, em vermelho, são superpostas aos perfis publicados no Anexo A, em preto, traçados no mesmo referencial. O confronto incide, assim, diretamente sobre as mesmas curvas.

— EN 1992-1-2, Anexo A — SectionPro

A transferência na laje permanece 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.

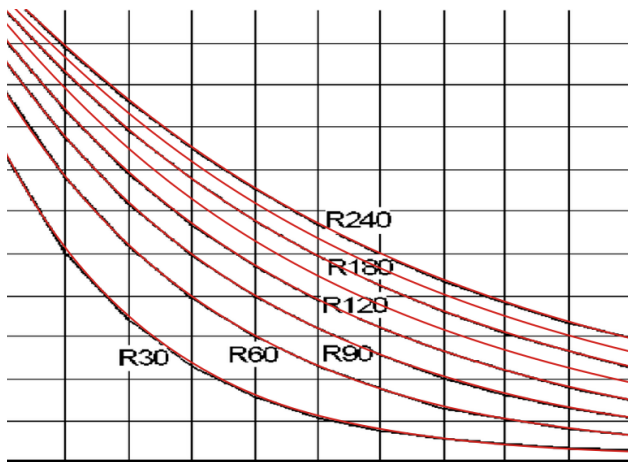


Figura 2: Laje $h = 200$ mm exposta na face inferior, de R30 a R240 (profundidade 0 a 100 mm na abscissa, temperatura na ordenada).

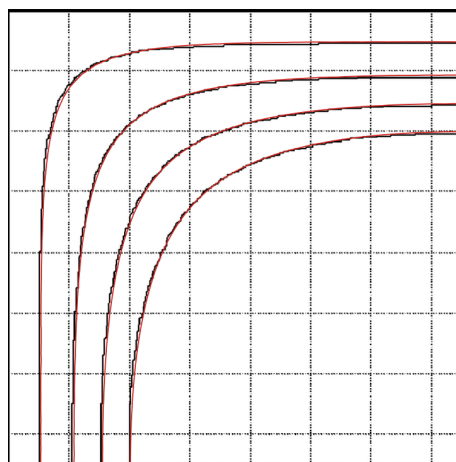


Figura 3: Pilar 300×300 , isoterma 500 °C em R30, R60, R90 e R120 (quarto de seção, 0 a 150 mm de lado).

Balanco da validação. Na laje, caso unidimensional de referência, o perfil calculado se superpõe ao da Fig A.2 em toda a faixa de cobrimentos úteis, assim como até o núcleo. No pilar exposto em suas quatro faces, a posição da isoterma 500 °C segue a norma em cada duração. O solucionador térmico é assim validado nessas duas configurações de exposição.

Exemplo de aplicação

Além das formas tabeladas pela norma, o SectionPro trata uma geometria qualquer. Os dois exemplos a seguir, uma seção hexagonal e uma seção circular, são expostos em todo o seu contorno.

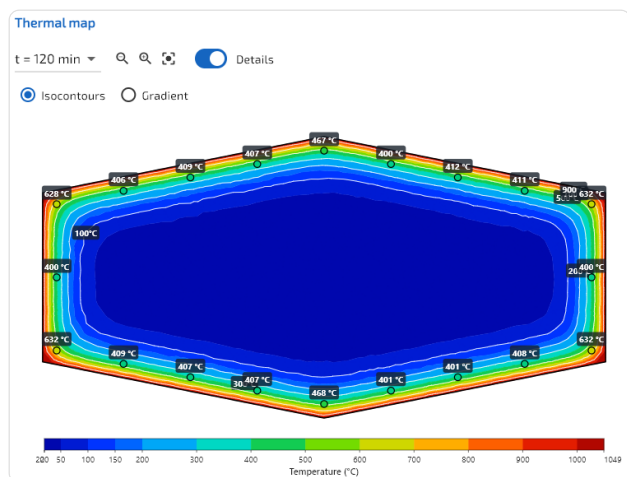


Figura 4: Seção hexagonal, campo de temperatura em $t = 120$ min. O modo “Details” exibe as temperaturas nas armaduras (marcadores): núcleo central frio, cantos quentes na superfície.

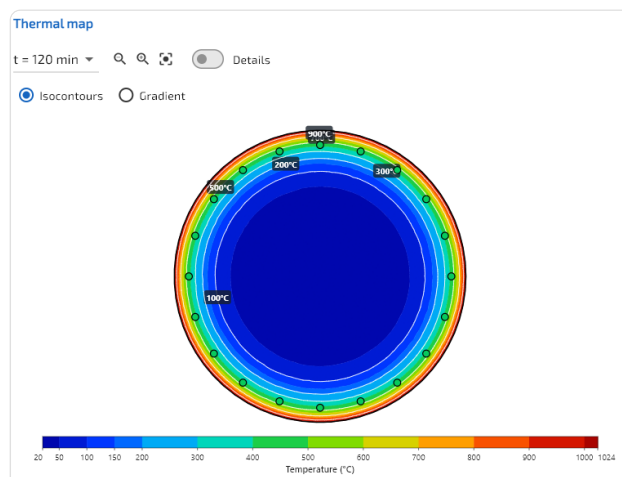


Figura 5: Seção circular exposta em todo o seu contorno, isothermas em $t = 120$ min. Os contornos de referência (100, 200, 300, 500 e 900 °C) são traçados em branco.

Desempenho

O cálculo do campo térmico é quase instantâneo: menos de um segundo, inclusive para os tempos de resistência mais longos. Os tempos medidos nos casos de validação estão indicados abaixo.

Seção	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 isothermas, em tema claro ou escuro), no formato CSV (coordenadas dos nós, temperaturas nodais em cada instante, temperaturas das armaduras) e na memória de cálculo em PDF produzida pelo SectionPro. Os instantes de saída são livres, uniformes ou escolhidos um a um, o que permite mirar com precisão os tempos de resistência regulamentares R30, R60, R90 e R120.

Conclusão

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

O confronto com os perfis do Anexo A reforça essa abordagem: o perfil calculado se superpõe à referência no caso unidimensional da laje, e a posição da isoterma 500 °C no pilar exposto em suas

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