

Análise termomecânica ao fogo

Capacidade residual da secção aquecida

Tutorial SectionPro · Resistência residual de uma secção ao fogo,
pelo método da isotérmica 500 °C da EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introdução

O cálculo ao fogo desenrola-se em duas etapas sucessivas. A primeira etapa é térmica, tal como descrito no artigo anterior: o SectionPro resolve o problema de transferência de calor na secção real e devolve o campo de temperatura no betão, nas armaduras e em qualquer perfil metálico embebido em cada instante pedido.

A segunda etapa é mecânica. Para cada duração de fogo selecionada, os módulos mecânicos partem do campo de temperatura correspondente e derivam a secção resistente utilizada na verificação. A contribuição do betão é reduzida em função da região aquecida da secção, enquanto os varões de armadura e o perfil metálico embebido recebem propriedades mecânicas dependentes da temperatura. A secção aquecida resultante é depois analisada no mesmo espírito que uma secção à temperatura ambiente: verificação de casos de carga, curvas e superfície de interação, distâncias, curvas de rigidez e tempo até à rotura.

O método da isotérmica 500 °C

Para o betão, o SectionPro segue o método da isotérmica 500 °C da EN 1992-1-2. O betão aquecido acima de 500 °C é descartado; o betão que permaneceu abaixo de 500 °C é conservado com a sua resistência total à temperatura ambiente e a sua habitual lei parábola-retângulo ($\epsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\epsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). A geometria resistente reduz-se assim à região delimitada pela isotérmica 500 °C, que se contrai à medida que a exposição aumenta.

Cada varão de armadura é reduzido à sua própria temperatura: a sua tensão de cedência e o seu módulo passam a $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ e $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, com os fatores de redução da EN 1992-1-2 (Quadros 3.2a e 3.2b). Um varão situado fora da isotérmica 500 °C não é removido; continua a contribuir com a sua resistência reduzida.

O mesmo tratamento aplica-se a um perfil estrutural embebido quando este é discretizado na etapa térmica: cada elemento de aço é lido à sua temperatura, reduzido por $k_y(\theta)$ e $k_E(\theta)$, e o betão que ocupa é removido para não ser contabilizado duas vezes. Uma vez construída a secção aquecida, a verificação mecânica decorre como uma análise de secção corrente, com o fogo a afetar a geometria

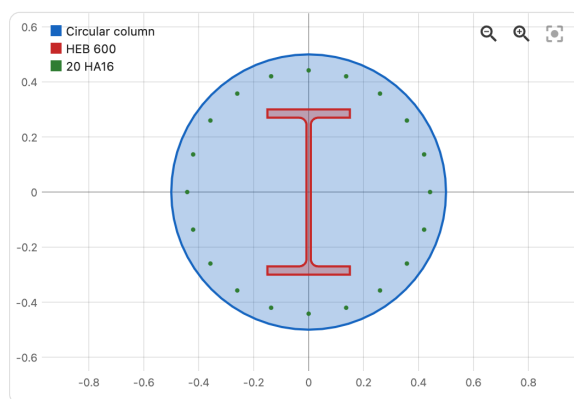
resistente e as leis dos materiais utilizadas no instante selecionado. Sobre esta secção reduzida, o SectionPro executa:

- Verificação da secção: o equilíbrio de um caso de carga, com o campo completo de tensões e extensões num dado instante.
- Curva de interação: a fronteira de resistência num plano de esforços escolhido, com uma componente fixa.
- Superfície de interação: o domínio de resistência 3D completo em (N, M_z, M_y) .
- Distâncias: a utilização de cada carga por projeção nessa superfície.
- Rigidez: a resposta momento–curvatura e a rigidez de flexão secante e tangente.
- Tempo até à rotura: o tempo de exposição a partir do qual a carga sai do domínio de resistência.

A secção do exemplo

Os cálculos são ilustrados no pilar misto fornecido com os exemplos do SectionPro:

- Secção circular, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Perfil HEB 600 embebido em aço S235.
- 20 varões Ø16 B500B no perímetro.
- Exposição ao fogo normalizado ISO 834.



Verificação da secção

Para uma carga (N, M_z, M_y) especificada para a verificação, o SectionPro determina o estado de extensão $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, uma extensão axial e duas curvaturas, que satisfaz o equilíbrio interno com os esforços impostos. Resolve-o iterativamente, integrando as tensões sobre a secção aquecida em cada passo: o betão conservado sobre os seus contornos, os varões e o perfil discretizado como fibras, cada um governado pela sua lei reduzida.

A partir do estado de extensão convergido, o SectionPro extrai as tensões e extensões em cada fibra, a posição do eixo neutro e uma utilização definida como a razão entre a extensão da fibra condicionante e a extensão última desse material. Uma utilização inferior a 1 significa que a carga é suportada; um valor igual ou superior a 1 significa que a secção reduzida já não consegue equilibrá-la.

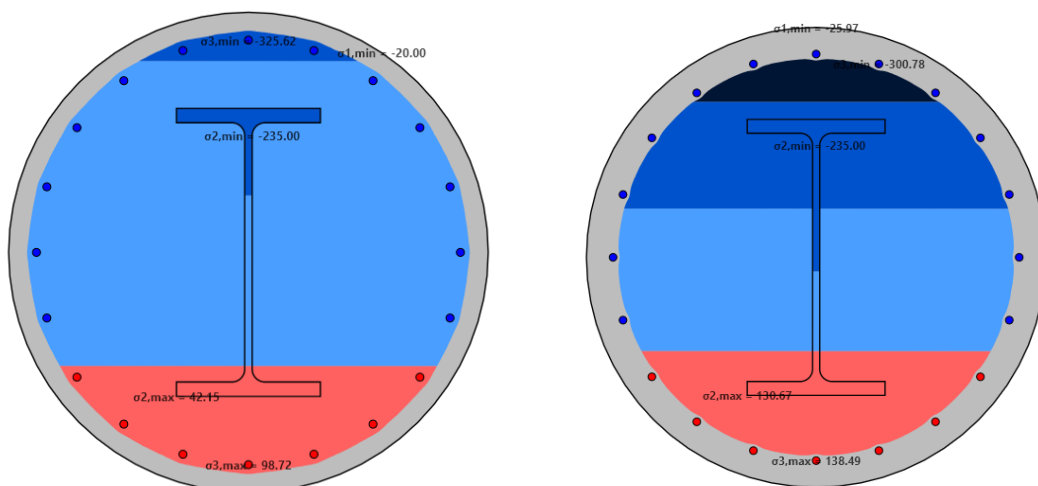


Figura 1: Estado de tensões e extensões convergido em R120 e R240 sob a carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e $\text{kN} \cdot \text{m}$.

No exemplo, a carga é $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e $\text{kN} \cdot \text{m}$. As vistas R120 e R240 colocam a mesma carga sobre uma secção cuja área resistente diminui com a exposição: o betão no interior da isotérmica 500 °C suporta a compressão, enquanto os varões e o perfil embebido, ainda frios, equilibram a flexão. Em R240, a secção atinge a rotura por esmagamento do betão conservado.

Curva de interação N-Mz

A curva de interação $N-M_z$ é a fronteira de resistência da secção em flexão uniaxial: o conjunto de pares de esforço axial e momento fletor que consegue suportar em torno do eixo em estudo. Recalculadas para cada duração de fogo sobre a secção reduzida, as curvas sobrepostas dão uma visão direta da capacidade perdida com o aquecimento.

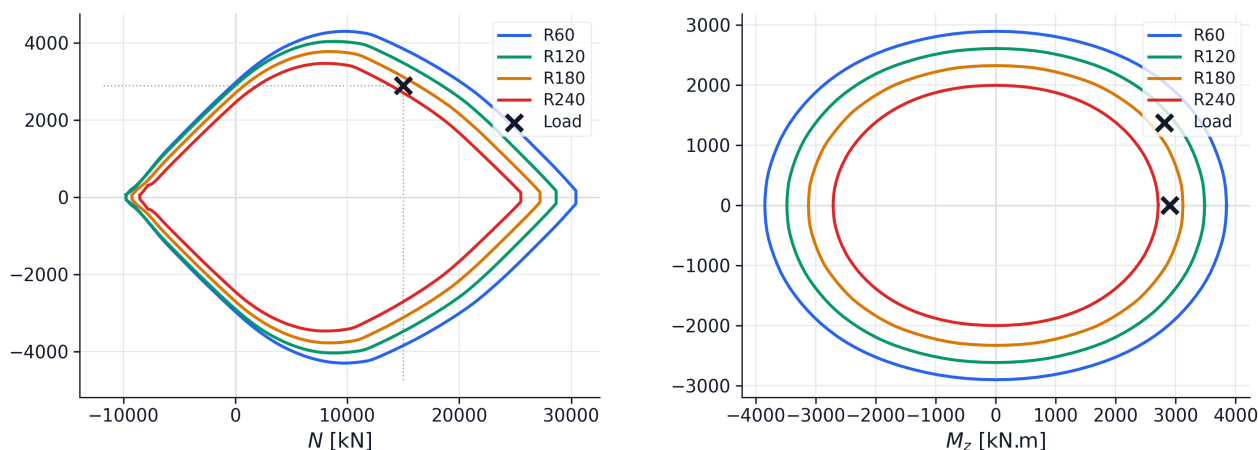


Figura 2: Curvas de interação ao fogo $N-M_z$ e M_y-M_z sob ISO 834.

As figuras mostram a perda de capacidade à medida que a temperatura aumenta: os domínios de resistência contraem-se progressivamente com a duração do fogo. Para a carga seleccionada, a rotura ocorre entre R180 e R240.

Superfície de interação 3D

Em flexão biaxial, a resistência já não pode ser captada por uma única curva plana: torna-se uma superfície fechada no espaço (N, M_z, M_y) , o domínio de resistência da secção. O SectionPro calcula

esta superfície diretamente a partir dos estados de extensão últimos da secção, tomados em todas as direções de flexão. Construída sobre a secção aquecida, permite verificar diretamente qualquer carga biaxial, sem a reduzir a um eixo preferencial: uma carga no interior da superfície é suportada, uma carga no exterior excede a capacidade.

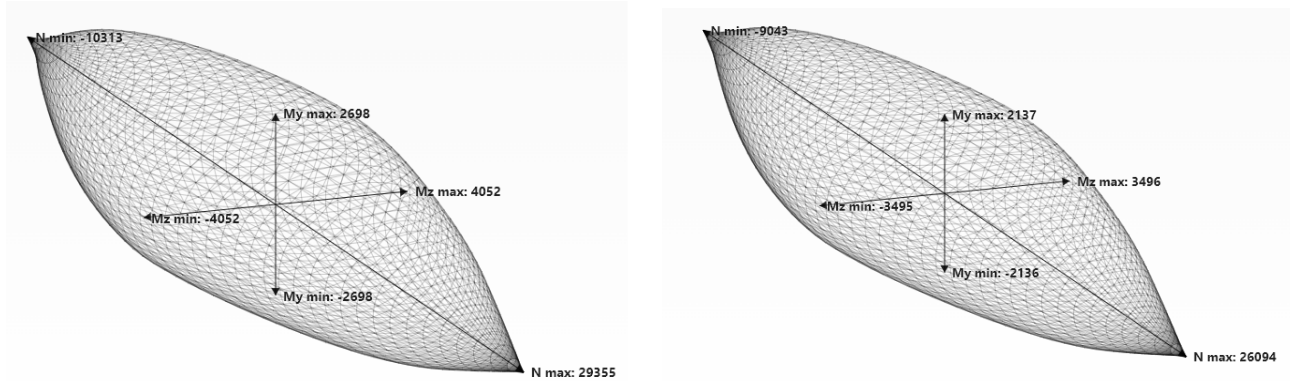


Figura 3: Superfície de interação de resistência ao fogo (N - M_z - M_y) em R120 e R240.

Distâncias

O módulo de distâncias verifica graficamente vários casos de carga em flexão biaxial face à mesma superfície de interação. Cada carga (N, M_z, M_y) é projetada na superfície e devolvida com uma utilização η , para que o engenheiro possa ler de imediato quais as cargas que permanecem no interior do domínio de resistência e quais o excedem.

- $\eta < 1$: a carga mantém-se **interior** e a secção dispõe de capacidade de reserva.
- $\eta = 1$: a carga situa-se na fronteira, no limite exato.
- $\eta > 1$: a carga torna-se **exterior** e a capacidade é excedida.

Sob fogo, o domínio contrai-se com a exposição, pelo que o estado de uma mesma carga pode passar de interior a exterior à medida que a duração aumenta.

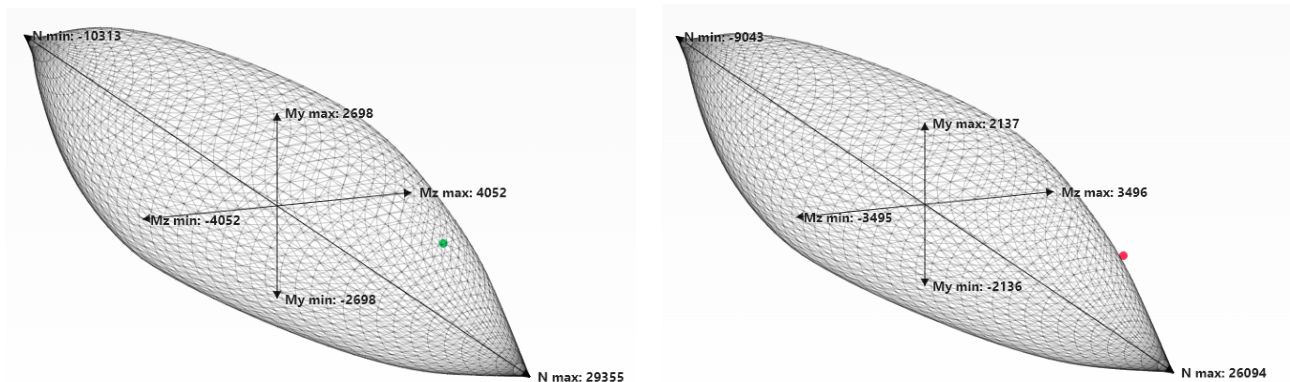


Figura 4: Verificação por distâncias de uma carga de fogo sobre o domínio de resistência 3D, em R120 (esquerda) e R240 (direita). O domínio contrai-se com a exposição; a distância normalizada η indica se a carga se mantém **interior** ($\eta \leq 1$) ou se torna **exterior** ($\eta > 1$).

O ponto de carga passa de **interior** em R120 a **exterior** em R240, o que é consistente com os resultados da verificação da secção e da curva de interação.

Rigidez ao fogo

O aquecimento reduz também a rigidez de flexão dos pilares. À medida que a curvatura aumenta, esta perda de rigidez pode amplificar os efeitos de segunda ordem mesmo antes de a resistência última ser atingida.

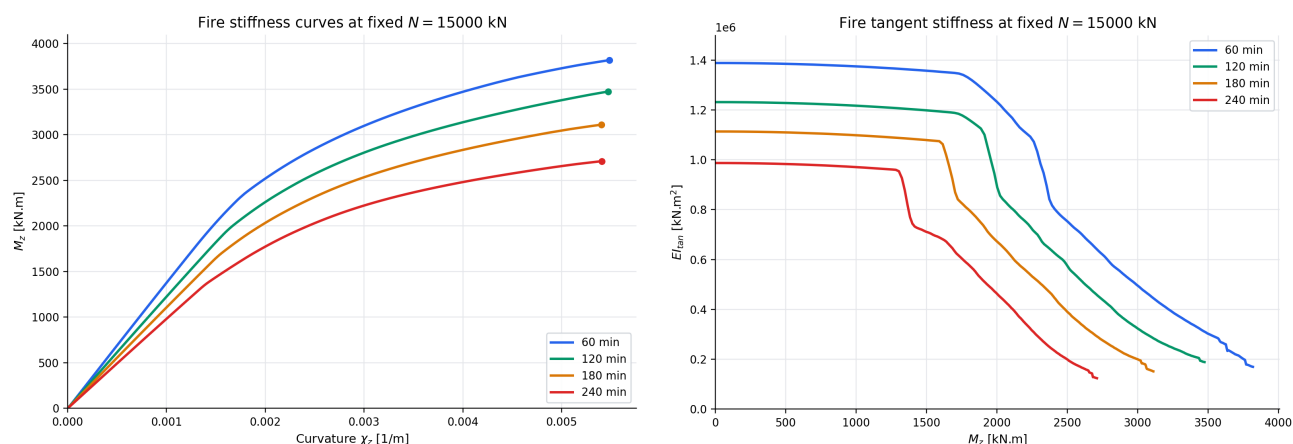


Figura 5: Rigidez ao fogo para $N = 15000$ kN e $M_y = 0$. À esquerda, a resposta momento-curvatura $M_z-\chi$. À direita, a rigidez tangente EI_{tan} em função de M_z .

As curvas mostram uma degradação acentuada da rigidez com a duração do fogo: a resposta momento-curvatura achata-se e a rigidez tangente cai abruptamente à medida que a secção aquecida se aproxima da rotura.

Tempo até à rotura

O tempo até à rotura é o cálculo mais específico do fogo. Para uma carga de serviço fixa, o SectionPro reconstrói a secção reduzida em cada instante de saída térmica e resolve o equilíbrio sobre ela. A capacidade diminui à medida que a isotérmica 500°C se contrai e as temperaturas do aço aumentam; o tempo até à rotura é o instante em que a carga sai do domínio de resistência, quando a secção reduzida já não consegue equilibrá-la dentro dos limites de extensão dos materiais.

Realiza-se em seguida um ensaio de isolamento sobre a mesma secção para verificar se uma proteção passiva resolve este problema específico de resistência ao fogo. A mesma carga é avaliada primeiro sobre a secção nua e depois com uma camada isolante contínua sobre o perímetro de betão.

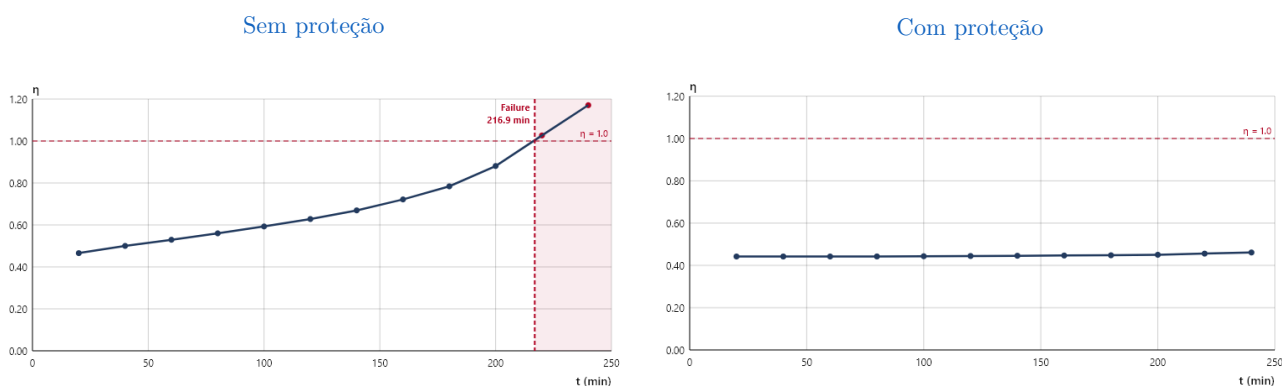


Figura 6: Tempo até à rotura sob a carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e kN · m. Neste caso, a proteção passiva empurra a saída do domínio de resistência para além de R240.

A proteção é modelada como uma camada passiva contínua descrita por quatro parâmetros térmicos. Para este ensaio de isolamento, foram utilizados os seguintes valores:

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

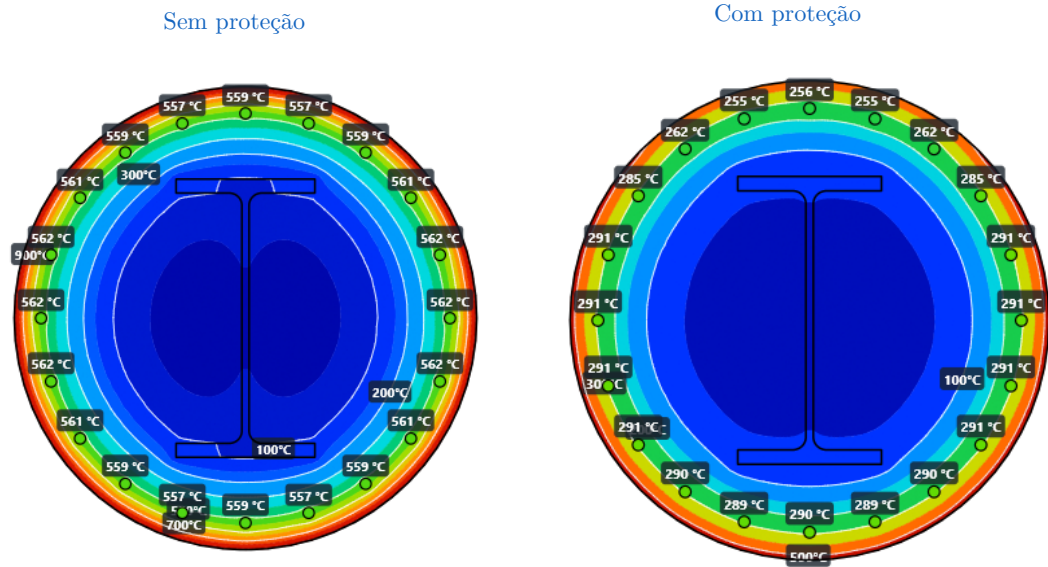


Figura 7: Campo de temperatura em R240, secção nua e protegida.

A proteção é muito eficaz neste caso: os varões de armadura passiva descem de cerca de 560 °C para cerca de 300 °C e o betão permanece abaixo de 500 °C mesmo após 240 min, pelo que toda a secção de betão é conservada mecanicamente.

Desempenho do software

A tarefa principal é o cálculo do campo térmico nas durações de fogo pedidas. Uma vez disponíveis estes campos de temperatura, as verificações mecânicas são rápidas, e o fluxo de trabalho completo mantém-se abaixo de um segundo para este exemplo.

Cálculo	Tempo
Campo térmico (2 etapas, R120/R240)	0,20 s
Verificação da secção (tensão-extensão)	+ 4 ms
Curva de interação N-Mz (160 pontos)	+ 31 ms
Domínio My-Mz para N fixo	+ 35 ms
Superfície de interação 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Curva de rigidez (momento-curvatura)	+ 11 ms
Tempo até à rotura (varrimento completo)	+ 52 ms

Pilar misto do artigo, medido numa máquina de secretária. Os tempos mecânicos são indicados após a resolução do campo térmico.

Conclusão

O método da isotérmica 500 °C transforma o campo térmico numa secção resistente reduzida: o betão mantido com a sua resistência no interior da isotérmica, os varões e o aço embebido enfraquecidos

pela sua temperatura local. A partir deste estado aquecido, a análise fornece a resistência da carga imposta, os domínios de interação, as distâncias das cargas, a perda de rigidez e o instante em que a carga sai do domínio de resistência.

No pilar misto estudado, o perfil embebido permanece resguardado pelo betão circundante e conserva uma parte significativa da capacidade nas durações intermédias. A proteção passiva contínua reduz nitidamente as temperaturas em R240 e adia o tempo até à rotura da carga em estudo.

Os diferentes cálculos são coerentes entre si: todos apontam para a mesma perda de capacidade e para o mesmo intervalo de rotura. A verificação da secção fornece o estado de tensões e extensões detalhado para uma carga. A curva de interação é a vista de engenharia preferida quando se pretende um domínio de resistência num plano. A superfície de interação fornece o domínio biaxial global. A verificação por distâncias fornece um estado OK/KO rápido para várias cargas. As curvas de rigidez mostram se a secção entrou num regime de forte degradação da rigidez. A análise do tempo até à rotura fornece, por fim, um tempo de exposição aproximado antes de a carga já não poder ser suportada. Cada vista tem a sua própria força e, em conjunto, dão uma leitura coerente do comportamento ao fogo.