

Análise termomecânica ao fogo

Capacidade residual da seção aquecida

Tutorial SectionPro · Resistência residual de uma seção em situação de incêndio, pelo método da isoterma 500 °C da EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introdução

O cálculo ao fogo é realizado em duas etapas sucessivas. A primeira etapa é térmica, conforme descrito no artigo anterior: o SectionPro resolve o problema de transferência de calor na seção transversal real e retorna o campo de temperatura no concreto, nas armaduras e em qualquer perfil metálico embutido em cada instante solicitado.

A segunda etapa é mecânica. Para cada duração de incêndio selecionada, os módulos mecânicos partem do campo de temperatura correspondente e deduzem a seção resistente utilizada na verificação. A contribuição do concreto é reduzida de acordo com a região aquecida da seção, enquanto as barras de armadura e o perfil metálico embutido recebem propriedades mecânicas dependentes da temperatura. A seção aquecida resultante é então analisada no mesmo espírito de uma seção à temperatura ambiente: verificação de caso de carga, curvas e superfície de interação, distâncias, curvas de rigidez e tempo até a ruptura.

O método da isoterma 500 °C

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

Cada barra de armadura é reduzida à sua própria temperatura: sua resistência ao escoamento e seu módulo tornam-se $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ e $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, com os fatores de redução da EN 1992-1-2 (Tabelas 3.2a e 3.2b). Uma barra situada fora da isoterma 500 °C não é eliminada; ela continua a contribuir com sua resistência reduzida.

O mesmo tratamento aplica-se a um perfil estrutural embutido quando ele 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 concreto que ele ocupa é removido para não ser contabilizado duas vezes. Uma vez construída a seção aquecida, a verificação mecânica prossegue como uma análise de seção padrão, com o fogo afetando a geometria

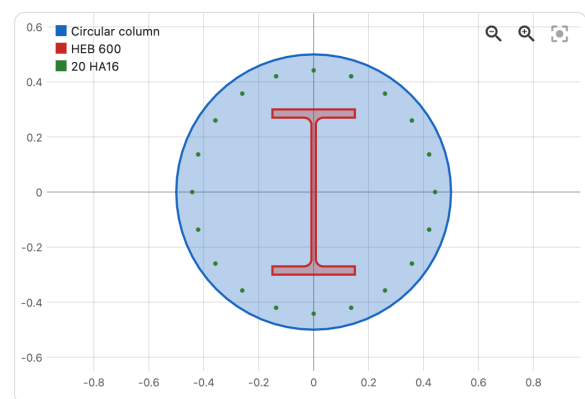
resistente e as leis dos materiais utilizadas no instante selecionado. Sobre essa seção reduzida, o SectionPro executa:

- Verificação da seção: o equilíbrio de um caso de carga, com o campo completo de tensões e deformações em um dado instante.
- Curva de interação: a fronteira de resistência em um plano de esforços escolhido, com uma componente fixada.
- Superfície de interação: o domínio de resistência 3D completo em (N, M_z, M_y) .
- Distâncias: a taxa de utilização de cada carga por projeção sobre essa superfície.
- Rigidez: a resposta momento-curvatura e a rigidez flexional secante e tangente.
- Tempo até a ruptura: o tempo de exposição no qual a carga deixa o domínio de resistência.

A seção do exemplo

Os cálculos são ilustrados sobre o pilar misto fornecido com os exemplos do SectionPro:

- Seção circular, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Perfil HEB 600 embutido em aço S235.
- 20 barras $\varnothing 16$ B500B no perímetro.
- Exposição ao incêndio-padrão ISO 834.



Verificação da seção

Para uma carga (N, M_z, M_y) especificada para a verificação, o SectionPro determina o estado de deformação $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, uma deformação axial e duas curvaturas, que satisfaz o equilíbrio interno com os esforços impostos. Ele resolve isso iterativamente, integrando as tensões sobre a seção aquecida a cada passo: o concreto conservado sobre seus contornos, as barras e o perfil discretizado como fibras, cada um regido por sua lei reduzida.

A partir do estado de deformação convergido, o SectionPro extrai as tensões e deformações em cada fibra, a posição da linha neutra e uma taxa de utilização definida como a razão entre a deformação da fibra determinante e a deformação última desse material. Uma taxa de utilização inferior a 1 significa que a carga é suportada; um valor igual ou superior a 1 significa que a seção reduzida não consegue mais equilibrá-la.

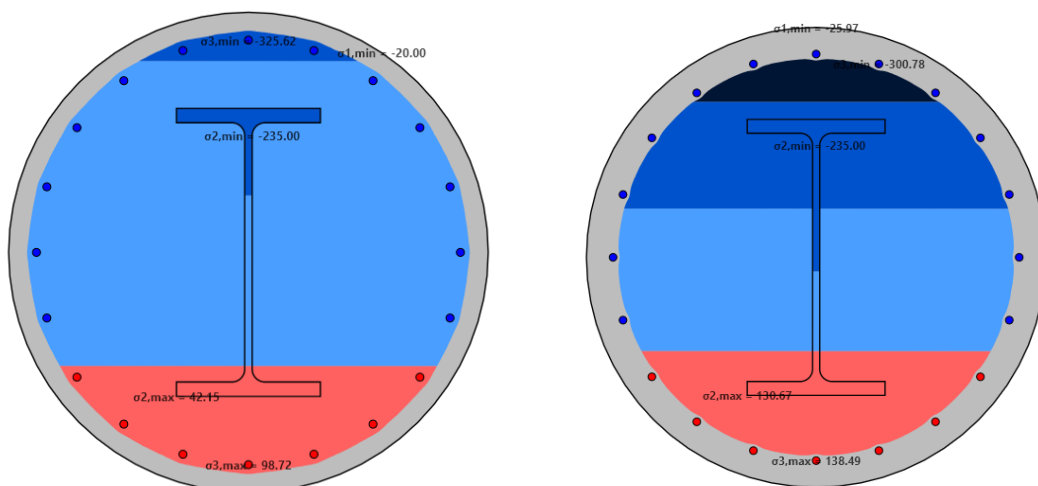


Figura 1: Estado convergido de tensões e deformações em R120 e R240 sob a carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e kN · m.

No exemplo, a carga é $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e kN · m. As vistas R120 e R240 aplicam a mesma carga sobre uma seção cuja área resistente diminui com a exposição: o concreto no interior da isoterma 500 °C suporta a compressão, enquanto as barras e o perfil embutido, ainda frios, equilibram a flexão. Em R240, a seção atinge a ruptura por esmagamento do concreto conservado.

Curva de interação N–Mz

A curva de interação N – M_z é a fronteira de resistência da seção em flexão uniaxial: o conjunto de pares de força normal e momento fletor que ela pode suportar em torno do eixo estudado. Recalculadas para cada duração de incêndio sobre a seção reduzida, as curvas superpostas oferecem uma visão direta da capacidade perdida com o aquecimento.

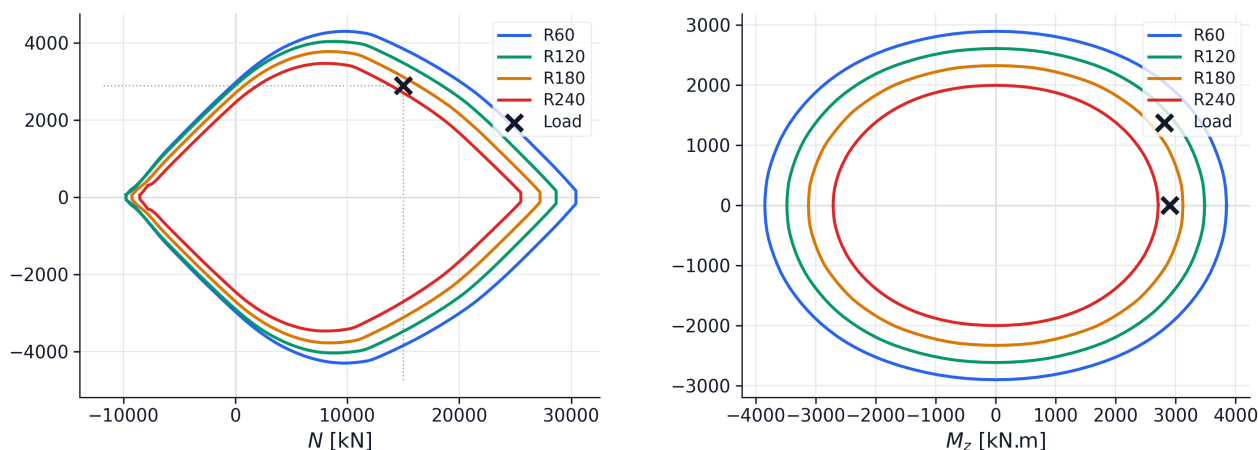


Figura 2: Curvas de interação ao fogo N – M_z e M_y – M_z sob ISO 834.

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

Superfície de interação 3D

Sob flexão biaxial, a resistência não pode mais ser representada por uma única curva plana: ela torna-se uma superfície fechada no espaço (N, M_z, M_y) , o domínio de resistência da seção. O SectionPro

calcula essa superfície diretamente a partir dos estados de deformação última da seção, considerados em todas as direções de flexão. Construída sobre a seção aquecida, ela permite verificar diretamente qualquer carga biaxial, sem reduzi-la a um eixo preferencial: uma carga no interior da superfície é suportada, uma carga no exterior excede a capacidade.

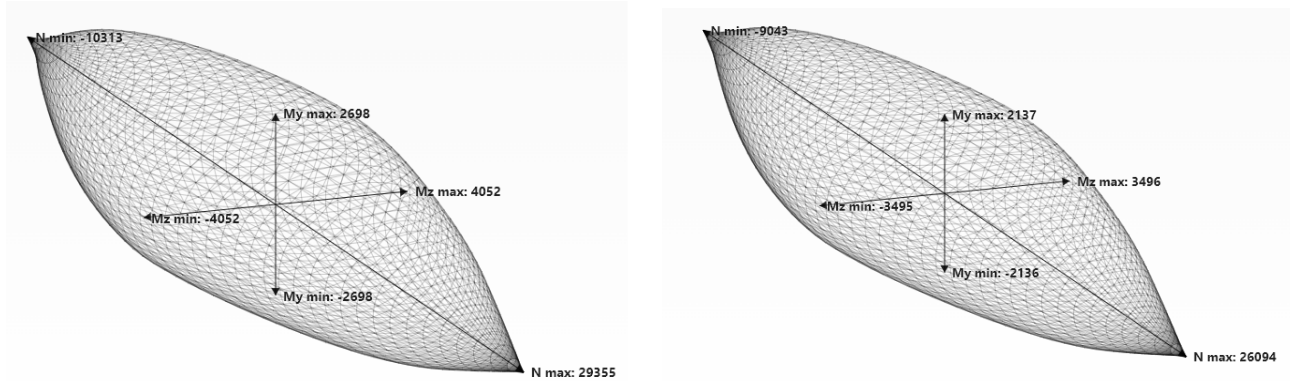


Figura 3: Superfície de interação de resistência ao fogo (N - M_z - M_y) em R120 e R240.

Distâncias

O módulo de distâncias verifica graficamente vários casos de carga em flexão biaxial contra a mesma superfície de interação. Cada carga (N, M_z, M_y) é projetada sobre a superfície e retornada com uma taxa de utilização η , de modo que o engenheiro pode identificar imediatamente quais cargas permanecem no interior do domínio de resistência e quais o excedem.

- $\eta < 1$: a carga permanece **interna** e a seção possui capacidade de reserva.
- $\eta = 1$: a carga situa-se na fronteira, no limite exato.
- $\eta > 1$: a carga torna-se **externa** e a capacidade é excedida.

Em situação de incêndio, o domínio contrai-se com a exposição, de modo que o status de uma mesma carga pode mudar de interno para externo à medida que a duração aumenta.

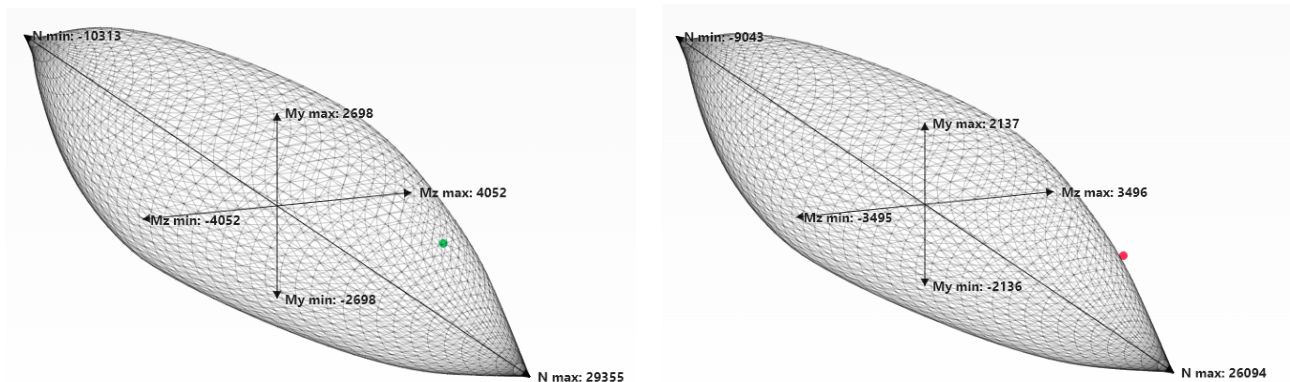


Figura 4: Verificação por distância de uma carga de incêndio sobre o domínio de resistência 3D, em R120 (à esquerda) e R240 (à direita). O domínio contrai-se com a exposição; a distância normalizada η indica se a carga permanece **interna** ($\eta \leq 1$) ou torna-se **externa** ($\eta > 1$).

A carga passa de **interna**, em R120, a **externa**, em R240, o que é coerente com os resultados da verificação da seção e da curva de interação.

Rigidez ao fogo

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

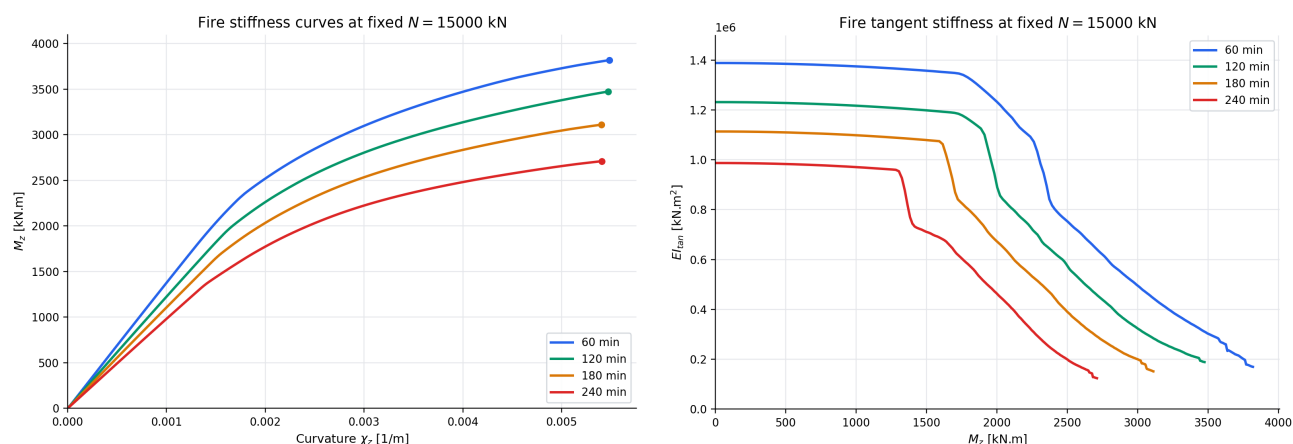


Figura 5: Rigidez ao fogo com $N = 15000$ kN e $M_y = 0$. À esquerda, a resposta momento-curvatura $M_z-\chi$. À direita, a rigidez tangente EI_{tan} em função de M_z .

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

Tempo até a ruptura

O tempo até a ruptura é o cálculo mais específico do fogo. Para uma carga de serviço fixa, o SectionPro reconstrói a seção reduzida em cada instante de saída térmica e resolve o equilíbrio sobre ela. A capacidade diminui à medida que a isoterma 500°C se contrai e as temperaturas do aço aumentam; o tempo até a ruptura é o instante no qual a carga deixa o domínio de resistência, quando a seção reduzida não consegue mais equilibrá-la dentro dos limites de deformação dos materiais.

Em seguida, um ensaio de isolamento é realizado sobre a mesma seção para verificar se uma proteção passiva resolve esse problema específico de resistência ao fogo. A mesma carga é avaliada primeiro sobre a seção sem proteção, depois com uma camada isolante contínua sobre o perímetro do concreto.

Sem proteção

Com proteção

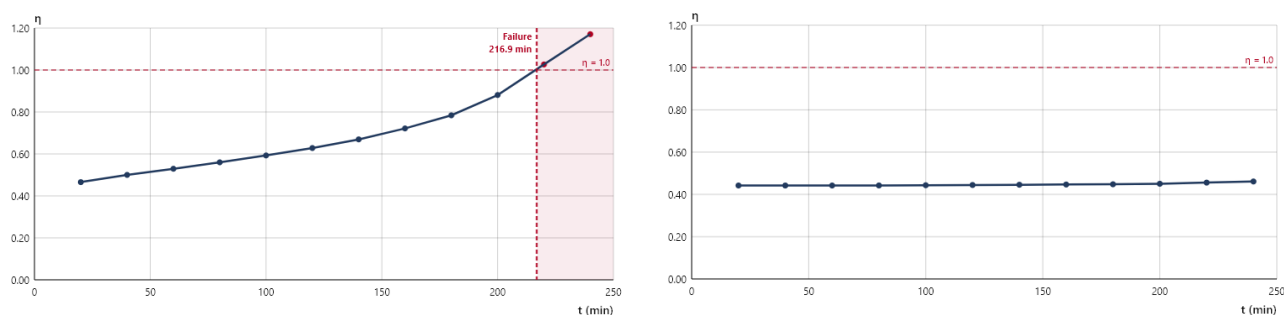


Figura 6: Tempo até a ruptura sob a carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, em kN e kN · m. A proteção passiva empurra a saída do domínio de resistência para além de R240 neste caso.

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)

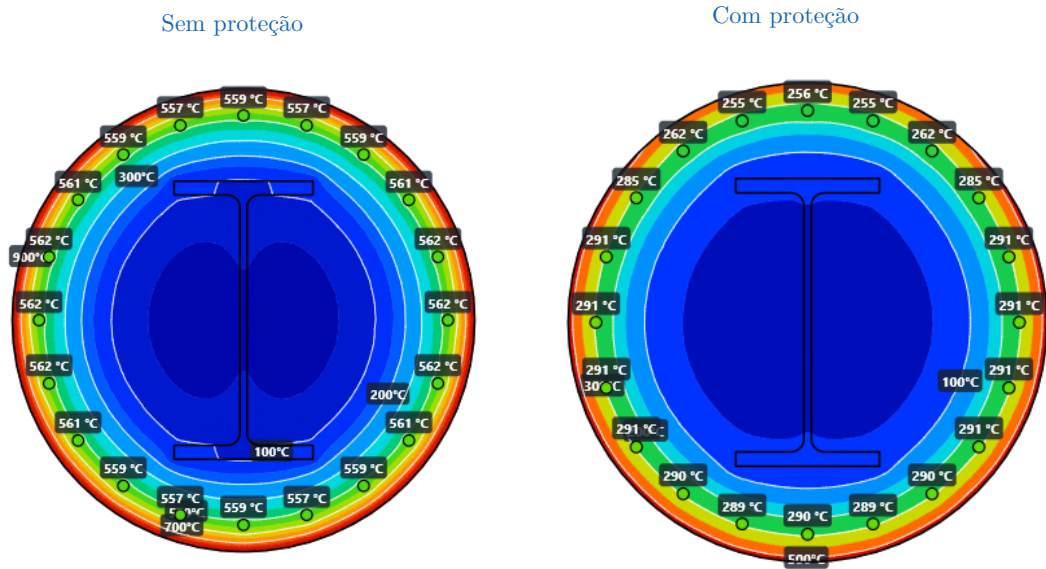


Figura 7: Campo de temperatura em R240, sem proteção e com proteção.

A proteção é muito eficaz neste caso: as barras passivas passam de cerca de 560 °C para cerca de 300 °C, e o concreto permanece abaixo de 500 °C mesmo após 240 min, de modo que toda a seção de concreto é conservada mecanicamente.

Desempenho do software

A tarefa principal é o cálculo do campo térmico nas durações de incêndio solicitadas. Uma vez disponíveis esses campos de temperatura, as verificações mecânicas são rápidas, e o fluxo de trabalho completo permanece abaixo de um segundo para este exemplo.

Cálculo	Tempo
Campo térmico (2 etapas, R120/R240)	0,20 s
Verificação da seção (tensão-deformação)	+ 4 ms
Curva de interação N-Mz (160 pontos)	+ 31 ms
Domínio My-Mz com N fixo	+ 35 ms
Superfície de interação 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Curva de rigidez (momento-curvatura)	+ 11 ms
Tempo até a ruptura (varredura completa)	+ 52 ms

Pilar misto do artigo, medido em uma máquina desktop. Os tempos mecânicos são dados após a resolução do campo térmico.

Conclusão

O método da isoterma 500 °C transforma o campo térmico em uma seção resistente reduzida: o concreto mantido com sua resistência no interior da isoterma, as barras e o aço embutido enfraquecidos

por sua temperatura local. A partir desse estado aquecido, a análise fornece a resistência da carga imposta, os domínios de interação, as distâncias das cargas, a perda de rigidez e o tempo no qual a carga deixa o domínio de resistência.

No pilar misto estudado, o perfil embutido permanece protegido pelo concreto circundante e conserva uma parcela significativa da capacidade nas durações intermediárias. A proteção passiva contínua reduz notavelmente as temperaturas em R240 e adia o tempo até a ruptura da carga em estudo.

Os diferentes cálculos são coerentes entre si: todos apontam para a mesma perda de capacidade e para a mesma faixa de ruptura. A verificação da seção fornece o estado detalhado de tensões e deformações para uma carga. A curva de interação é a visão de engenharia preferida quando se necessita de um domínio de resistência em um plano. A superfície de interação fornece o domínio biaxial global. A verificação por distância fornece um status OK/KO rápido para várias cargas. As curvas de rigidez mostram se a seção entrou em um regime de forte degradação da rigidez. A análise do tempo até a ruptura fornece, por fim, um tempo de exposição aproximado antes de a carga não poder mais ser suportada. Cada visão tem sua própria força, e juntas oferecem uma leitura coerente do comportamento ao fogo.