

Segurança ao fogo de estruturas de betão: métodos simplificados do EC2 – Parte 1-2



**Márcio
Fernandes¹**



Rui Faria²



Miguel Azenha³

RESUMO

A consideração dos efeitos da acção do fogo no dimensionamento das estruturas de betão armado constitui, hoje em dia, uma componente importante da verificação da segurança das construções. Assim é fundamental um bom conhecimento da regulamentação existente, bem como a aquisição de competências que permitam ganhar sensibilidade relativamente aos fenómenos e parâmetros envolvidos numa verificação da segurança ao fogo, para que possam ser tomadas decisões acertadas. No presente trabalho serão abordadas as diversas exigências e metodologias de cálculo regulamentares, incidindo sobre o Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndios em Edifícios e sobre os Eurocódigos 1 e 2. Particularmente no que se refere ao Eurocódigo 2: Parte 1-2, serão abordadas três metodologias de cálculo da capacidade resistente das secções dos elementos estruturais numa situação de incêndio: o Método Tabular, o Método da Isotérmica dos 500°C e Método das Zonas. No final deste artigo serão apresentadas aplicações dos métodos a duas secções correntes de vigas e pilares, tirando ilações acerca das capacidades resistentes calculadas.

PALAVRAS-CHAVE

Fogo; estruturas de betão armado: perfis de temperatura; métodos simplificados de cálculo de resistências.

¹ Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, ec02148@fe.up.pt

² Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil – LABEST, rfaria@fe.up.pt

³ Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil – LABEST, mazenha@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

A sensibilidade social à importância da acção do fogo tem vindo a aumentar ao longo dos anos, devido ao crescente número de incêndios em estruturas e aos danos associados, o que se traduz numa crescente exigência relativamente às capacidades resistentes a satisfazer pelas estruturas de engenharia civil. De uma forma simplificada esta acção traduz-se numa acentuada alteração da temperatura dos elementos estruturais afectados, que origina dilatações térmicas e redução das propriedades resistentes (entre outras) dos materiais que os constituem. As dilatações térmicas podem provocar esforços importantes em estruturas hiperestáticas, enquanto as alterações das propriedades dos materiais (físicas e químicas) provocam uma degradação das mesmas em função da temperatura atingida, que resultam numa diminuição da capacidade resistente dos elementos, podendo originar a ruína da estrutura.

No Eurocódigo 2: Parte 1-2 [1] são apresentados procedimentos de cálculo de estruturas de betão armado e pré-esforçado em situação de incêndio, sendo definidas as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais em função da temperatura. São também apresentadas diversas metodologias para a verificação da segurança das secções de elementos de betão estrutural em situação de incêndio, sendo dado um maior relevo às metodologias simplificadas como o Método Tabular, o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método das Zonas. De uma forma geral, a aplicação destas metodologias de verificação da segurança consiste, primeiramente, em definir a combinação de acções adequada à situação de incêndio, de acordo com o Eurocódigo 1: Parte 1-2 [2] (o fogo é considerado uma acção accidental), e determinar o tempo exigido de resistência ao fogo de acordo com o Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RG/SCIE) [3]. No RG/SCIE definem-se classes de tempo (em minutos) de exposição das estruturas ao fogo em função de diversos parâmetros, nomeadamente a altura do edifício, o tipo de ocupação, o número máximo de pessoas presentes e a área bruta; este tempo é considerado como o necessário para permitir a evacuação dos ocupantes do edifício, a actuação dos meios de socorro e limitar a propagação de fogo e fumos, garantindo assim a estabilidade, estanqueidade e um bom isolamento térmico da estrutura. Seguidamente, e para cada elemento estrutural, as capacidades resistentes dos materiais são reduzidas em função das temperaturas atingidas durante o incêndio, usando como base perfis de temperatura instalados nas secções transversais em função da duração de exposição ao fogo. Finalmente determina-se a capacidade resistente de cada secção crítica, verificando-se se aquela é superior ao esforço instalado no elemento. No presente artigo apresentam-se análises térmicas de secções transversais comuns de pilares e vigas de betão armado, definindo-se os correspondentes perfis de temperatura para aplicação das metodologias simplificadas de cálculo de resistências do EC2: Parte 1-2. Estas três metodologias são descritas e aplicadas a exemplos adequadamente seleccionados, procedendo-se à interpretação das diferenças encontradas no que respeita à verificação da segurança em situação de incêndio.

2. PERFIS DE TEMPERATURA

A aplicação dos métodos de verificação da segurança ao fogo requer o conhecimento dos perfis de temperatura nas secções transversais dos elementos estruturais, os quais vão permitir calcular as respectivas reduções de resistência, em correspondência com as degradações das propriedades dos materiais.

Existem diversas curvas de aquecimento para aproximação à curva de incêndio real, com vista a descrever a variação de temperatura em função do tempo de exposição, podendo ser contabilizados diversos factores como a carga de incêndio, as condições de ventilação e as propriedades dos elementos envolventes do compartimento. Para permitir uma maior eficácia na regulamentação e controlo das exigências impostas a uma estrutura em situação de fogo, encontra-se normalizada a Curva de Incêndio Padrão ISO 834, cuja expressão se apresenta na Eq. 1, onde t se refere ao tempo de exposição em minutos e $\theta(t)$ à temperatura em °C. Esta curva depende apenas do tempo de exposição ao fogo, com um comportamento sempre crescente, englobando a maioria das exigências impostas aos elementos em situação de incêndio.

$$\theta(t) = 20 + 345 \log(8t + 1.1) \quad (1)$$

Aplicando esta curva de aquecimento a um determinado elemento estrutural obtém-se o campo de temperaturas, caracterizado por isotérmicas no interior da correspondente secção e função do tempo de exposição ao fogo, denominado correntemente por perfil de temperaturas. O Eurocódigo 2: Parte 1-2 apresenta alguns exemplos de perfis de temperatura para o Incêndio Padrão, mas verifica-se que estes estão definidos apenas para um número reduzido de secções. No caso de secções para as quais não se encontrem definidos os perfis de temperatura, é permitido efectuar interpolações entre os perfis disponíveis no EC2, de forma a estimar o perfil adequado para a secção pretendida. Esta aproximação pode introduzir erros significativos nas zonas da secção mais afectadas pelo fogo. Na definição dos perfis de temperatura de secções de betão armado não é considerada a existência de armaduras no seu interior, devido à elevada condutividade térmica do aço e às pequenas percentagens de aço usualmente adoptadas. Desta forma, considera-se que cada varão se encontra a uma temperatura igual à da isotérmica da secção de betão que passa no centro geométrico da barra de aço respectiva. Assim sendo, numa dada secção de betão armado diferentes varões poderão apresentar diferentes resistências em situação de fogo, função da respectiva localização na secção, e portanto no perfil de temperaturas.

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA TÉRMICO

Para a simulação numérica dos campos de temperatura nos elementos estruturais em situação de incêndio recorreu-se à equação de condução de calor em sólidos para regimes transientes:

$$k \nabla \cdot (\nabla T) = \rho_c \dot{T} \quad (2)$$

em que k é a condutibilidade térmica, ρ_c é o calor específico volumétrico do betão e T é a temperatura. Para k e ρ_c encontram-se disponíveis no EC2 valores de referência, que por serem dependentes da temperatura tornam não-linear o problema expresso na Eq. (2), o qual é então resolvido com o recurso ao método de Newton-Raphson. A formulação das condições fronteira no presente problema térmico é mista (ver Eq. (3), tendo-se considerado: (i) uma parcela de convecção q_{conv} , cujo cálculo é feito em função do coeficiente de convecção $h = 25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (indicado no EC2) e da diferença entre a temperatura na superfície do betão T_{sup} e a temperatura exterior T_{ext} ; (ii) uma parcela relativa às trocas de calor por radiação q_{rad} , função de T_{sup} e T_{ext} , da emissividade $\varepsilon = 0.7$ (definida no EC2) e da constante de Stefan-Boltzman σ ($\sim 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

$$q_{conv} = h (T_{sup} - T_{ext}) \quad ; \quad q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{sup}^4 - T_{ext}^4) \quad (3)$$

Calculadas com estas formulações, as Figuras 1 e 2 permitem visualizar as distribuições espaciais de temperaturas em secções transversais de pilares e vigas expostos ao Incêndio Padrão. Para os cálculos térmicos utilizou-se ao programa comercial DIANA [4], recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, com malhas mais refinadas junto aos cantos das secções.

Os pilares consideraram-se expostos ao fogo nas 4 faces, encontrando-se reproduzidos nas Figs 1a e 1b os perfis das temperaturas máximas numa secção de $30 \times 30 \text{ cm}^2$, para tempos de exposição ao Fogo Padrão de 60 e 120 minutos (resistências R60 e R120, respectivamente), que são coincidentes com os fornecidos na Parte 1-2 do EC2. Após validação do modelo numérico, com esta e outras geometrias das secções transversais de betão foram efectuadas comparações para diversos tempos de exposição ao Fogo Padrão, tendo-se verificado que para além da profundidade das isotérmicas aumentar com o tempo de exposição, os perfis apresentavam as temperaturas mais elevadas nos cantos, mais expostas (ver Figs 1a e 1b). Nestas zonas observa-se também um aquecimento mais rápido do que no resto da secção, facto atestado pelo acentuado arredondamento das isotérmicas. Fazendo variar a secção do pilar para a mesma resistência R120 ao Fogo Padrão (ver Figs 1b e 1c), é possível verificar que a penetração das isotérmicas varia apenas ligeiramente ao longo das arestas com 30cm. Estes resultados permitem concluir que a profundidade das isotérmicas depende principalmente da dimensão da menor face exposta ao fogo.

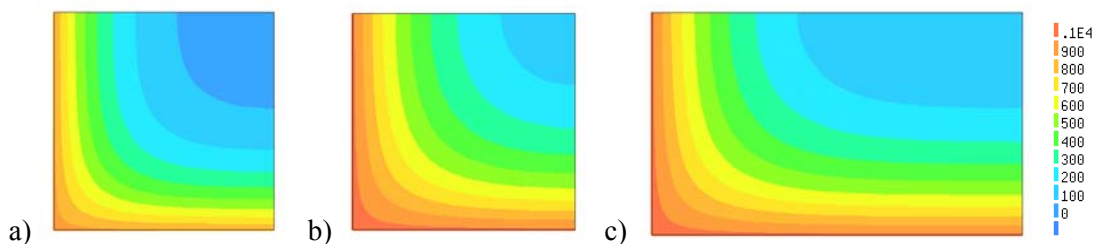


Figura 1. Isotérmicas (°C) de pilares: a) 30×30cm² R60, b) 30×30cm² R120 e c) 50×30cm² R120.

As vigas são elementos geralmente expostos ao fogo apenas em 3 faces (as laterais e a inferior), sendo garantida a protecção da face superior pela presença da laje. Caso não exista laje, deverá ser analisada a exposição da viga em função da sua localização. Na Fig. 2 são comparadas as duas situações, verificando-se que a presença da laje atenua as temperaturas nas zonas superior e central, mas praticamente não afecta as isotérmicas na zona inferior da viga.

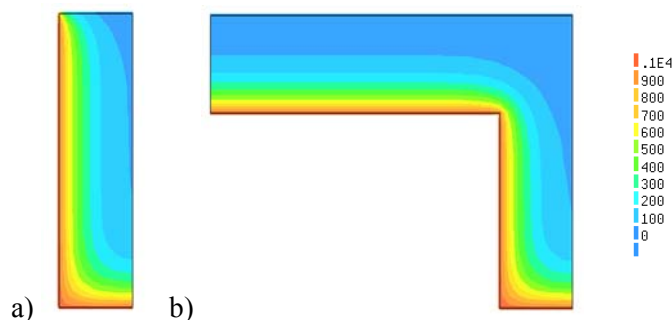


Figura 2. Isotérmicas (°C) de vigas 30×60cm², R120: a) viga isolada e b) viga e laje associada.

4. METODOLOGIAS SIMPLIFICADAS DE CÁLCULO DE RESISTÊNCIAS DE SECÇÕES AO FOGO

Para aplicação de metodologias de verificação da segurança ao fogo tem de ser considerada uma combinação de acções adequada à situação de incêndio, e fixar-se o tempo de exposição da estrutura. O fogo é considerado uma acção accidental, e como tal, segundo o Eurocódigo 1: Parte 1-2 [2], para além desta acção deverão considerar-se actuando na estrutura os esforços resultantes da combinação frequente de acções. O EC2: Parte 1-2 permite verificar, de forma isolada, a segurança de cada elemento constituinte da estrutura, considerando-se satisfeita a segurança ao fogo caso todos os elementos respeitem as verificações separadamente. Este procedimento engloba uma aproximação, pois desta forma são desprezados efeitos como as restrições à expansão térmica dos elementos, que induzem esforços nas secções. Para além disto, o EC2: Parte 1-2 permite ainda definir os esforços de cálculo em situação de incêndio com base nos que ocorrem nas situações de estado limite último à temperatura normal, através da relação entre as respectivas acções de dimensionamento, isto é,

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} \times E_d \quad ; \quad \eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_1 \times Q_k}{\gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times Q_k} \quad (4)$$

sendo $E_{d,fi}$ o esforço de cálculo em situação de incêndio, E_d o valor da acção para a combinação de estado limite último à temperatura ambiente, η_{fi} o factor de redução para a acção de incêndio, G_k e Q_k os valores característicos das acções permanentes e variáveis, γ_G e γ_Q os usuais coeficientes parciais de segurança e ψ_1 o factor de redução para a combinação frequente.

O EC2: Parte 1-2 caracteriza a diminuição das resistências do betão e do aço com o aumento da temperatura através de expressões que explicitam coeficientes redutores k_θ (ver Fig. 3), os quais quando multiplicados pela resistência característica do material (à temperatura ambiente) X_k permitem obter a resistência $X_{d,fi}$ em situação de incêndio:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \times X_k / \gamma_{M,fi} \quad (5)$$

sendo $\gamma_{M,fi}$ o coeficiente de segurança do material para a situação de incêndio (toma o valor unitário).

No EC2: Parte 1-2 são apresentadas três metodologias simplificadas para verificação da segurança ou para cálculo da resistência ao fogo de secções de betão armado: o Método Tabular (o de maior facilidade de aplicação), o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método das Zonas.

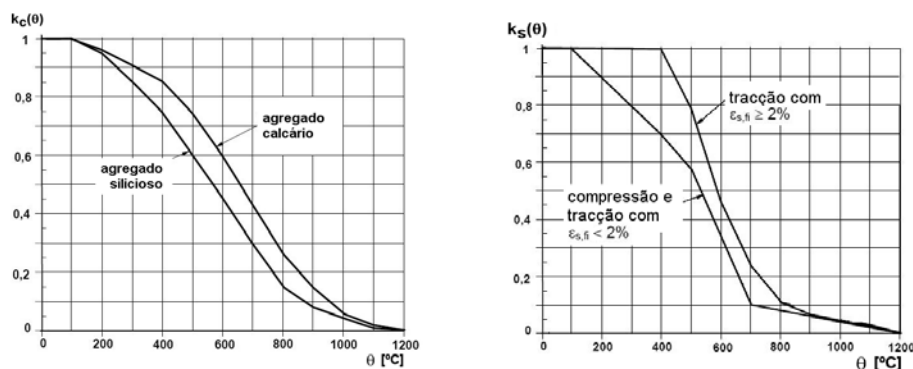


Figura 3. Evolução do coeficiente de redução de resistência do betão $k_c(\theta)$ e do aço $k_s(\theta)$ com a temperatura θ [1].

4.1 Método Tabular

O Método Tabular consiste num conjunto de tabelas que fornecem as dimensões e recobrimentos mínimos para a resistência ser assegurada até um tempo máximo de exposição ao Fogo Padrão. Estas tabelas foram construídas com bases empíricas, confirmadas pela experiência e por avaliação teórica de resultados de ensaios experimentais, sendo considerado um factor de redução de referência de $\eta_{fi} = 0.7$ e uma temperatura crítica das armaduras de 500°C. Para situações com diferentes temperaturas críticas são apresentados procedimentos que permitem corrigir as dimensões tabeladas. A verificação da segurança através do Método Tabular consiste em respeitar uma dimensão mínima b para a secção transversal do elemento de betão, e uma distância mínima a desde a face exposta ao fogo até ao eixo dos varões, em função das condições do problema. Existem tabelas diferenciadas para cada tipo de elemento a analisar (laje, viga ou pilar).

4.2 Método da Isotérmica dos 500°C

A determinação da resistência de secções de betão armado segundo este método é efectuada para a curva de Incêndio Padrão ou para curvas de aquecimento que provoquem perfis de temperatura semelhantes. A aplicação deste método requer a verificação de larguras mínimas para as secções transversais de betão, reproduzidas no Quadro 1.

Quadro 1. Dimensões mínimas da secção em função da resistência ao fogo.

Resistência ao fogo	R60	R90	R120	R180	R240
Largura mínima da secção [mm]	90	120	160	200	280

Este método baseia-se numa redução da área da secção transversal, sendo retirada uma zona de betão afectada pelo incêndio, determinada com base na profundidade média da isotérmica dos 500°C. A zona não danificada é considerada com as mesmas características que em situação de temperatura normal. As formas arredondadas da isotérmica são aproximadas através de um rectângulo com uma área semelhante, sendo ainda necessário diminuir as propriedades resistentes das armaduras em função da temperatura a que ficam sujeitas na secção. Para a aplicação do Método da Isotérmica dos 500°C deve ser seguido o seguinte procedimento:

- Determinação da isotérmica dos 500°C para o tempo de exposição ao fogo requerido, através de perfis de temperatura da secção;
- Determinação da largura b_{fi} e da altura h_{fi} da secção de betão activa em situação de incêndio, excluindo as zonas com temperaturas superiores a 500°C;
- Determinação da temperatura no centro geométrico de cada varão;
- Determinação do coeficiente de redução da resistência de cada varão em função da temperatura correspondente;
- Através de métodos convencionais de cálculo (equações de equilíbrio entre os esforços internos e as forças aplicadas) determinação da capacidade resistente da secção, considerando a área de betão reduzida e considerando os coeficientes de redução de resistência de cada varão;
- Comparação da capacidade resistente com o efeito da acção actuante ($E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$).

4.3 Método das Zonas

O Método das Zonas é aplicável a elementos estruturais sujeitos apenas à curva de Incêndio Padrão. É mais trabalhoso que o Método da Isotérmica dos 500°C, mas fornece resultados mais precisos, especialmente para pilares. Este método aproxima o diagrama real da capacidade resistente do betão em situação de incêndio por um diagrama uniforme, sendo retirada uma espessura de betão a_z (ver Fig. 4).

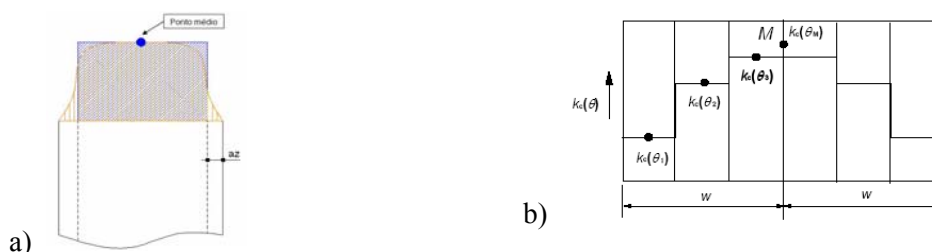


Figura 4.a) Aproximação das tensões resistentes do betão sujeito ao fogo, segundo o Método das Zonas; b) Divisão em zonas da secção.

O valor da espessura a_z a retirar é obtido dividindo a secção em 3 ou mais zonas paralelas de igual espessura (elementos rectangulares). O procedimento a adoptar para aplicação do Método das Zonas consiste em:

- Divisão do elemento em n zonas iguais ($n \geq 3$ para lajes);
- Determinação da temperatura no centro de cada zona de betão e do respectivo coeficiente de redução da resistência $k_c(\theta_i)$; idem para o ponto M assinalado na Fig. 4b;
- Determinação do coeficiente médio de redução da resistência do betão:

$$k_{c,m} = [(1 - 0.2/n)/n] \times \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (6)$$

- Determinação da espessura a_z a retirar:

$$a_z = w (1 - k_{c,m} / k_c(\theta_M)) \quad (7)$$

- Determinação da largura b_{fi} e altura h_{fi} da secção de betão, retirando a espessura a_z ;
- Efectuar os passos c) e d) apresentados para o Método da Isotérmica dos 500°C;
- Determinação da capacidade resistente da secção usando a secção de betão reduzida, e aplicando os coeficientes de redução de resistência do aço $k_s(\theta)$ e do betão $k_c(\theta_M)$, através de métodos convencionais;
- Comparação da capacidade resistente $R_{d,fi}$ com o efeito da acção $E_{d,fi}$.

4.4 Efeitos de segunda ordem

A introdução dos efeitos de segunda ordem torna-se importante no cálculo dos pilares, sendo o procedimento indicado no EC2: Parte 1-2 baseado na curvatura nominal da peça em situação de incêndio (válido para estruturas contraventadas). O momento resistente de primeira ordem da secção,

$M_{0Rd,fi}$, para comparação com o momento flector actuante de primeira ordem $M_{Ed,fi}$, é obtido fazendo $M_{0Rd,fi} = M_{Rd,fi} - M_{2,fi}$, o que consiste em retirar à resistência total da secção em situação de incêndio $M_{Rd,fi}$ (obtida através das metodologias simplificadas já descritas) o momento de segunda ordem $M_{2,fi}$.

5. APLICAÇÕES

A aplicação dos métodos simplificados do EC2: Parte 1-2 para o cálculo da resistência de elementos submetidos à acção do fogo será ilustrada com base em exemplos de vigas e pilares, nos quais a exigência ao fogo padrão foi fixada em R90. Considerou-se um betão da classe C25/30 e armaduras da classe S500.

5.1 Vigas

Apresenta-se o estudo de uma viga simplesmente apoiada com secção $25 \times 50 \text{ cm}^2$, armada com $4\phi 20$ [5]. À temperatura normal considerou-se a viga solicitada por um momento flector actuante igual ao momento resistente ($M_{0Ed} = M_{0Rd}$); em situação de incêndio considerou-se um coeficiente $\eta_{fi} = 0.5$ para a determinação do momento actuante $M_{Ed,fi}$. A resistência em situação de incêndio foi determinada recorrendo a equações de equilíbrio envolvendo as forças internas, conforme esquematizado na Fig. 5. No Quadro 2 apresenta-se um resumo de alguns passos para obtenção dos esforços em situação de incêndio.

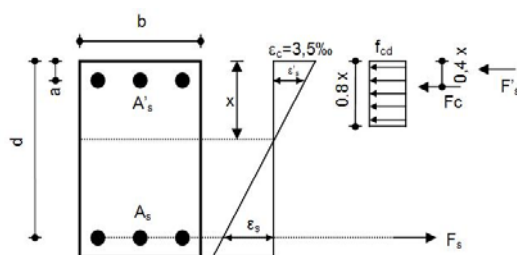


Figura 5. Esquema de dimensionamento adoptado.

Quadro 2. Obtenção dos esforços em situação de incêndio.

Secção [cm ²]	A_s [cm ²]	d [m]	x [m]	$M_{0Rd} = M_{0Ed}$ [kN.m]	η_{fi}	$M_{Ed,fi}$ [kN.m]
25×50	12.57	0.457	0.1639	213.87	0.5	106.94

O passo seguinte consiste na aplicação dos três métodos abordados. Para aplicação do Método Tabular recorreu-se à Tabela 5.5 do EC2: Parte 1-2, relativa a vigas simplesmente apoiadas. Para secções com apenas uma camada de armadura é necessário agravar de 10mm os valores desta tabela relativos à distância do eixo dos varões à periferia da secção. No Quadro 3 ilustra-se a aplicação deste método (a face lateral é a mais desfavorável).

Para aplicação do Método da Isotérmica dos 500°C procedeu-se à análise do perfil de temperaturas para a secção em causa, verificando-se que a isotérmica dos 500°C se encontra a uma distância das faces laterais de 2.9cm. A determinação da distância desta isotérmica à face inferior não é necessária, por se tratar da parte traccionada do betão, que é desprezada no cálculo da capacidade resistente. Com base no mesmo perfil verificou-se que a temperatura dos varões de canto seria de 582°C, e a dos varões interiores de 416°C, a que correspondem valores de k_s iguais a 0.377 e 0.680, respectivamente. Com a secção reduzida de betão e com as propriedades do aço reduzidas, foi possível determinar a resistência ao fogo através deste método, conforme resumido no Quadro 3.

Na aplicação do Método das Zonas dividiu-se a secção num total de 6 zonas, tendo-se determinado uma secção reduzida a partir de um valor de $a_z = 3.34 \text{ cm}$, e obtido $k_c(\theta_M) = 0.993$. A redução da

resistência do aço é igual à apresentada no Método da Isotérmica dos 500°C (ver novamente resumo de resultados no Quadro 3).

Pode constatar-se que o mais expedito dos três métodos simplificados de verificação da segurança ao fogo, o Método Tabular, conduz à conclusão de que a presente viga é insegura, enquanto que os Métodos da Isotérmica dos 500°C e da Zonas, mais elaborados, conduzem à conclusão contrária (com resultados muito similares entre si). Esta situação serve para ilustrar que o Método Tabular, se bem que mais expedito, tende a ser excessivamente conservativo nalgumas situações, justificando-se então o recurso ao Método da Isotérmica dos 500°C ou ao Método da Zonas.

Quadro 3. Aplicação dos diversos métodos a uma viga.

Método Tabular							
<i>Secção</i> [cm ²]	<i>A_s</i>	<i>recobrimento</i> [cm]	<i>b</i> [cm]	<i>a</i> [cm]	<i>b_{min}</i> [cm]	<i>a_{min}</i> [cm]	<i>Segurança</i> $i \geq i_{min}$
25×50	4φ20	2.5	25	43	25	52.5	KO
Método da Isotérmica dos 500°C							
<i>Secção</i> [cm ²]	<i>A_s</i>	<i>d</i> [m]	<i>x</i> [m]	<i>M_{Rd,fi}</i> [kNm]	ϵ_s [%]	<i>M_{Ed,fi}</i> [kNm]	<i>Segurança</i> $M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}$
25×50	4φ20	0.457	0.0863	126.96	13.42	106.94	OK
Método das Zonas							
<i>Secção</i> [cm ²]	<i>A_s</i>	<i>d</i> [m]	<i>x</i> [m]	<i>M_{Rd,fi}</i> [kNm]	ϵ_s [%]	<i>M_{Ed,fi}</i> [kNm]	<i>Segurança</i> $M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}$
25×50	4φ20	0.457	0.0905	126.39	12.62	106.94	OK

5.2 Pilares

Neste exemplo analisar-se-á um pilar com secção 25×25cm², armado com 4φ16 (2 varões em faces opostas). Para determinação dos esforços actuantes foram considerados dois cenários: (i) pilar sujeito apenas a esforço axial, que à temperatura ambiente iguala o esforço axial resistente (i.e., $N_{0Ed} = N_{0Rd}$); e (ii) pilar em flexão composta, sujeito a um esforço axial $N_{0Ed} = 750$ kN, e a um momento flector que à temperatura ambiente iguala o momento flector resistente máximo para aquele N_{0Ed} (i.e., $M_{0Ed} = M_{0Rd}(N_{0Ed})$). Em ambos os casos considerou-se um factor de redução de esforços para a situação de incêndio igual a $\eta_{fi} = 0.7$. No Quadro 4 é apresentado um resumo dos cálculos para obtenção dos esforços actuantes em situação de incêndio, limitando a extensão do aço a 20%.

Quadro 4. Obtenção dos esforços em situação de incêndio.

<i>Cenário</i>	<i>Secção</i> [cm ²]	<i>A_s</i> [cm ²]	<i>N_{0Ed}</i> [kN]	<i>x</i> [m]	<i>M_{0Rd}</i> [kNm]	η_{fi}	<i>N_{Ed,fi}</i> [kN]	<i>M_{Ed,fi}</i> [kNm]
(i)	25×25	4φ16	1571.6	-	-	0.7	1100	-
(ii)	25×25	4φ16	750	0.1875	67.58	0.7	525	47.30

Na aplicação do Método Tabular recorreu-se à Tabela 5.2a do EC2: Parte 1-2 relativa a pilares. No Quadro 5 ilustra-se, de forma condensada, a aplicação deste método, sendo que para os dois cenários (i) e (ii) se tem a mesma exigência, pois já são tidos em conta efeitos de segunda ordem. Assinala-se a conclusão de que por este método o pilar não seria seguro em situação de incêndio, para qualquer dos cenários.

Analisando o perfil de temperaturas e a Isotérmica dos 500°C, verifica-se que esta se encontra a uma profundidade de 3.78cm a partir das faces expostas. Com base no mesmo perfil verificou-se que a temperatura dos varões de canto era de 620°C, correspondendo-lhes um $k_s = 0.289$. As capacidades resistentes do pilar em situação de incêndio foram avaliadas para os dois cenários, encontrando-se resumidos no Quadro 5 os resultados mais importantes. Note-se que na situação de compressão

simples foram deliberadamente excluídos os efeitos de segunda ordem, pois pretendia-se verificar se em situação de incêndio o pilar seria seguro considerando apenas uma situação de compressão axial centrada. Como se constata, com base neste método em nenhum dos cenários o pilar seria seguro.

Para aplicação do Método das Zonas a secção foi dividida em 6 zonas, tendo-se obtido $a_z = 4.4\text{cm}$ e $k_c(\theta_M) = 0.975$. A redução da resistência do aço foi igual à referida para o Método da Isotérmica dos 500°C . De novo se conclui ser este pilar inseguro em situação de incêndio, para os dois cenários referidos.

Quadro 5. Aplicação dos diversos métodos a um pilar.

Método Tabular									
Secção [cm²]	A_s	recobrimento [cm]	η_{fi}	b [cm]	a [cm]	b_{min} [cm]	a_{min} [cm]	Segurança $i \geq i_{min}$	
25×25	4φ16	2.5	0.7	25	41	35	53	KO	
Método da Isotérmica dos 500°C									
Secção [cm²]	A_s	$N_{Rd,fi}$ [m]	x [m]	$M_{Rd,fi}$ [kNm]	$M_{2,fi}$ [kNm]	$M_{0Rd,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [m]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	Segurança
25×25	4φ16	876.5	-	-	-	-	1100	-	KO
25×25	4φ16	525	0.1485	24.02	5.46	18.56	525	47.30	KO
Método das Zonas									
Secção [cm²]	A_s	$N_{Rd,fi}$ [m]	x [m]	$M_{Rd,fi}$ [kNm]	$M_{2,fi}$ [kNm]	$M_{0Rd,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [m]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	Segurança
25×25	4φ16	754.8	-	-	-	-	1100	-	KO
25×25	4φ16	525	0.1568	16.42	5.17	11.26	525	47.30	KO

6. CONCLUSÕES

O EC2: Parte 1-2 permite uma abordagem bastante simplificada da acção do fogo em estruturas de betão, aproximando a curva de aquecimento pela curva do Incêndio Padrão, com temperaturas sempre crescentes. As resistências dos materiais durante um incêndio são determinadas em função dos correspondentes valores à temperatura ambiente (ou a frio), aplicando-lhes coeficientes de redução essencialmente dependentes da temperatura. Assume-se que uma análise por elementos é geralmente suficiente para garantir a segurança de uma estrutura em situação de incêndio, desprezando-se assim as acções indirectas decorrentes das restrições à livre deformação dos elementos estruturais.

Analisando os perfis de temperaturas máximas que em situação de incêndio se desenvolvem em diversas secções, verifica-se que o betão apresenta um bom comportamento ao fogo, sendo afectado de forma relevante apenas numa camada exterior de espessura reduzida (alguns cm). Observa-se que as zonas de canto possuem temperaturas mais elevadas, por se encontrarem mais expostas ao fogo, apresentando também gradientes de temperatura muito elevados. A dimensão da face exposta do elemento apresenta-se como um factor determinante na definição da profundidade das isotérmicas. No EC2: Parte 1-2 o reduzido número de secções contempladas nos perfis de temperatura que são fornecidos pode induzir erros consideráveis na obtenção das temperaturas nas zonas de canto, onde um erro de 1cm pode originar diferenças da ordem dos 100°C nos varões de aço, o que pode não ser desprezável.

De entre os métodos simplificados de dimensionamento ou verificação da segurança ao fogo previstos no EC2: Parte 1-2 – ilustrados no presente artigo em exemplos de uma viga simplesmente apoiada e de um pilar em compressão simples ou em flexão composta –, o Método Tabular é o mais simples e rápido de aplicar, mas sendo conservativo é recomendado para casos onde as exigências ao fogo sejam reduzidas (até R30-R60). Para exigências mais elevadas recomenda-se a utilização de métodos mais

rigorosos, permitindo aproveitar melhor a capacidade resistente da secção. O Método das Zonas é o método mais trabalhoso, apresentando-se como o mais rigoroso, sendo recomendado na verificação ao fogo de elementos em flexão composta. Em alternativa poderá ser utilizado o Método da Isotérmica dos 500°C, de aplicação mais simples que o Método das Zonas.

Finalmente importa referir que entre as estratégias a adoptar para aumentar a resistência ao fogo de elementos estruturais de betão se podem considerar as seguintes: (i) favorecer uma distribuição das armaduras pelas faces da secção, por forma a evitar agrupamentos nas zonas de canto (zonas de temperaturas mais elevadas), (ii) aumentar os recobrimentos, de forma a introduzir os varões em zonas de menores temperaturas ou (iii) aumentar as dimensões da secção de betão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através da Bolsa Individual de Doutoramento concedida ao terceiro autor.

REFERÊNCIAS

- [1] Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-2, 2004
- [2] Eurocódigo 1: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-2, 2004
- [3] Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RG/SCIE), 2007.
- [4] TNO DIANA – TNO Company, 2007 <URL: <http://www.tnodiana.com/>>.
- [5] Fernandes, M. - Verificação da Resistência ao Fogo de Estruturas com Base nos Métodos Simplificados do EC2 – Parte 1-2, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Tese de Mestrado.