

FIDESC4 – Um programa de cálculo para verificação da resistência ao fogo de elementos em aço com secção transversal de Classe 4

Paulo Vila Real

Prof. Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro
pvreal@ua.pt

Élio Maia

Bolseiro
Universidade de Aveiro
Aveiro
eliomaia@ua.pt

Carlos Couto

Doutorando
Universidade de Aveiro
Aveiro
ccouto@ua.pt

Cláudia Amaral

Doutoranda
Universidade de Aveiro
Aveiro
claudiaamaral@ua.pt

Nuno Lopes

Prof. Auxiliar
Universidade de Aveiro
Aveiro
Nuno.lopes@ua.pt

SUMÁRIO

A Parte 1.2 do Eurocódigo 3 preconiza, para elementos com secção transversal de Classe 4, a utilização de uma temperatura crítica por defeito de 350°C, se nenhum cálculo for efetuado para a sua determinação, tendo em conta os esforços efetivamente instalados. Esta temperatura crítica pode ser demasiado conservadora pelo que é recomendável que se faça o seu cálculo de acordo com o Anexo E do mesmo Eurocódigo, segundo o qual a área da secção transversal efetiva e o módulo de flexão efetivo devem ser determinados em conformidade com a Parte 1.5 do Eurocódigo 3. Este artigo apresenta o programa FIDESC4, desenvolvido para o cálculo da temperatura crítica e da resistência de secções transversais e de elementos estruturais metálicos em situação de incêndio, de acordo com os métodos de cálculo simplificados da Parte 1.2 do Eurocódigo 3.

Palavras-chave: Estruturas metálicas; Classe 4; Fogo; Métodos simplificados de cálculo.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Como é do conhecimento geral, quando as estruturas metálicas são expostas à ação do fogo, os elementos atingem temperaturas elevadas e, conseqüentemente, a sua capacidade resistente diminui drasticamente, podendo a estrutura, em último caso, entrar em colapso, caso não tenham sido tomadas as devidas precauções na fase de projeto.

A Parte 1.2 do Eurocódigo 3 [1] preconiza, para elementos com secção transversal de Classe 4, a utilização de uma temperatura crítica de 350°C, se nenhum cálculo for efetuado para a sua determinação tendo em conta os esforços efetivamente instalados. Esta temperatura crítica pode ser demasiado conservadora pelo que é recomendável que se faça o seu cálculo de acordo com o Anexo E do mesmo Eurocódigo, segundo o qual a área da secção transversal efetiva e o módulo de flexão efetivo devem ser determinados em conformidade com a Parte 1.5 do Eurocódigo 3 [2], ou seja, com base nas propriedades dos materiais a 20 °C.

O *software* de cálculo automático FIDESC4, apresentado no presente artigo, foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro para o cálculo da temperatura crítica e da resistência de secções transversais e de elementos estruturais metálicos em situação de incêndio, de acordo com os métodos de cálculo simplificados da Parte 1.2 do Eurocódigo 3 [1]. Relativamente às secções transversais de Classe 4, o programa foi desenvolvido de acordo com a Parte 1.5 daquele Eurocódigo [2].

Este programa de cálculo automático, que permite o cálculo de elementos estruturais com secções transversais de qualquer classe, foi desenvolvido em *VB.NET (VisualBasic.NET)* e é compatível com o sistema operativo Windows.

1.2 Cálculo estrutural ao fogo

De acordo com a Parte 1.2 do Eurocódigo 3, no domínio da resistência, o elemento estrutural mantém-se estável durante a ocorrência de um incêndio enquanto se verificar a relação (1).

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (1)$$

em que $R_{fi,d,t}$ representa $M_{fi,t,Rd}$ (valor de cálculo do momento fletor resistente), $N_{fi,t,Rd}$ (valor de cálculo do esforço de tração resistente), $N_{b,fi,t,Rd}$ (valor de cálculo do esforço de compressão resistente) etc. e os valores correspondentes a $M_{fi,Ed}$ (valor de cálculo do momento fletor atuante), $N_{fi,Ed}$ (valor de cálculo do esforço de tração atuante) etc. estão traduzidos por $E_{fi,d}$.

Em alternativa, utilizando uma distribuição de temperatura uniforme na secção, a verificação da segurança pode ser efetuada no domínio da temperatura.

Como facilmente se perceberá, a resistência ao fogo de um elemento de aço, e por conseguinte a sua temperatura crítica ou de colapso, depende do nível de carregamento do elemento, ou seja, do seu grau de utilização (quanto mais carregado estiver o elemento, menor será a sua temperatura crítica).

Para um elemento com distribuição uniforme de temperatura, a temperatura crítica representa a temperatura do aço no instante em que a capacidade de carga do elemento iguala o efeito das cargas aplicadas, ou seja, o instante em que ocorre o colapso e se verifica a condição (2).

$$E_{fi,d} = R_{fi,d,t} \quad (2)$$

A resistência de elementos com secção transversal de Classe 4 deve ser verificada utilizando as expressões para elementos comprimidos, vigas e elementos sujeitos à ação combinada de flexão e compressão. Nestas expressões, a área da secção transversal é substituída pela área efetiva e o módulo de flexão pelo módulo de flexão da secção efetiva.

A área efetiva da secção transversal e o módulo de flexão da secção efetiva são calculados de acordo com a Parte 1.5 do Eurocódigo 3, com base nas propriedades do aço a 20°C. Em situação de incêndio, a classificação da secção transversal é mais severa (considera-se uma redução de 15% nos limites de esbelteza).

Para o cálculo em situação de incêndio, a tensão de cedência do aço deve ser considerada, no caso de elementos de Classe 4 igual ao limite convencional de proporcionalidade a 0.2% em vez da tensão correspondente à extensão total de 2% como acontece para as restantes classes das secções transversais.

A resistência ao fogo de um elemento estrutural sujeito a uma carga axial e/ou a momentos fletores, depende da classe obtida através do Quadro 1. Nesta tabela, encontram-se também representados os fatores de redução (relativamente a f_y) para a tensão de cedência de cálculo, função da classe da secção transversal.

Quadro 1. Tipo de verificação da resistência.

Classe da secção	Resistência	Fator de redução (relativo a f_y) para a tensão de cedência de cálculo
1, 2	Resistência plástica	$k_{y,\theta}$
3	Resistência elástica	$k_{y,\theta}$
4	Resistência elástica considerando a secção efetiva	$k_{0,2p,\theta}$

2. BREVE DESCRIÇÃO DO SOFTWARE FIDESC4

2.1 Considerações gerais

O programa FIDESC4 calcula a temperatura crítica ou verifica a resistência de secções transversais e elementos de aço solicitados segundo o eixo forte e/ou segundo o eixo fraco no caso de secções transversais duplamente simétricas ou segundo o eixo forte no caso de secções monossimétricas.

O *software* possui dois módulos de cálculo da resistência do fogo: um respeitante a secções transversais e um outro a elementos (colunas, vigas e vigas-coluna), tal como se ilustra na Figura 1.

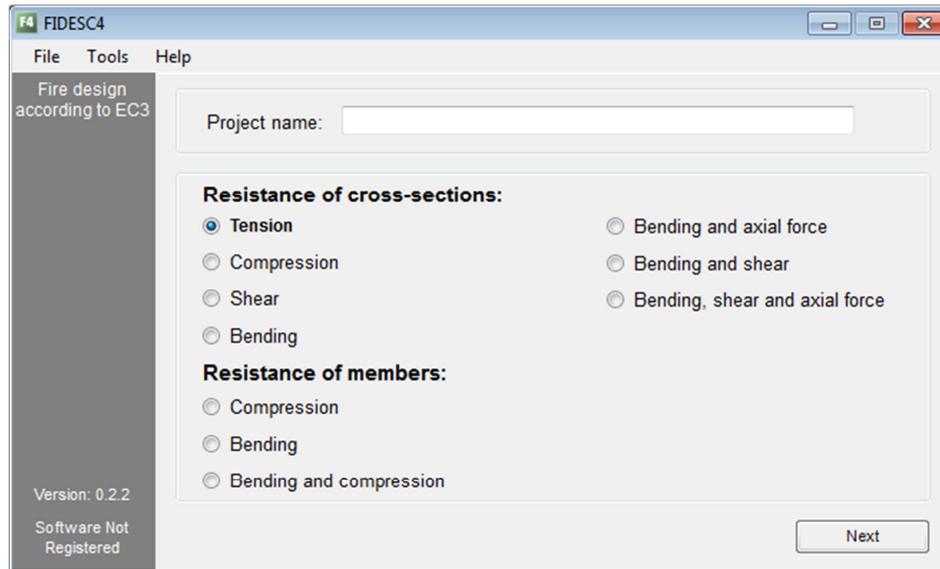


Figura 1. Menu principal.

O programa calcula a temperatura crítica de secções transversais sujeitas a:

- Tração;
- Compressão;
- Esforço transverso;
- Flexão (biaxial);
- Flexão e esforço axial (tração ou compressão);
- Flexão e esforço transverso;
- Flexão, esforço transverso e esforço axial.

Relativamente à resistência de elementos estruturais, o programa verifica a resistência à encurvadura de elementos submetidos a:

- Compressão;
- Flexão;
- Flexão composta com esforço axial.

O utilizador pode escolher qual o tipo de secção transversal a adotar para o perfil. Tipologias de secções transversais comuns incluem: HD, HE, HL, HP, IPE, UB, UC, W, L, RHS, CHS (perfis laminados a quente, soldados, bissimétricos ou monossimétricos) de uma base de dados. Podem ser inseridas dimensões definidas pelo utilizador (ver Figura 2).

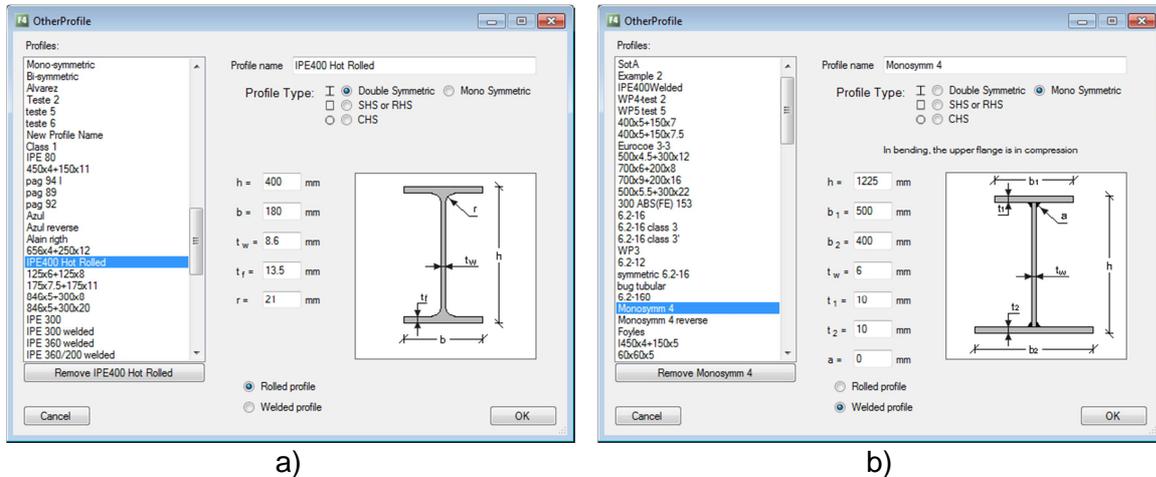


Figura 2. Caixa de diálogo referente aos perfis do utilizador para: a) secção transversal bissimétrica; b) secção transversal monossimétrica.

Se a secção transversal for de Classe 4, o *software* calcula, de acordo com o Anexo E da EN 1993-1-2 e com a EN 1993-1-5, a secção efetiva, tal como se ilustra na Figura 3. Adicionalmente, o programa inclui uma nova abordagem desenvolvida no âmbito do projeto FIDESC4 [3] para o referido cálculo.

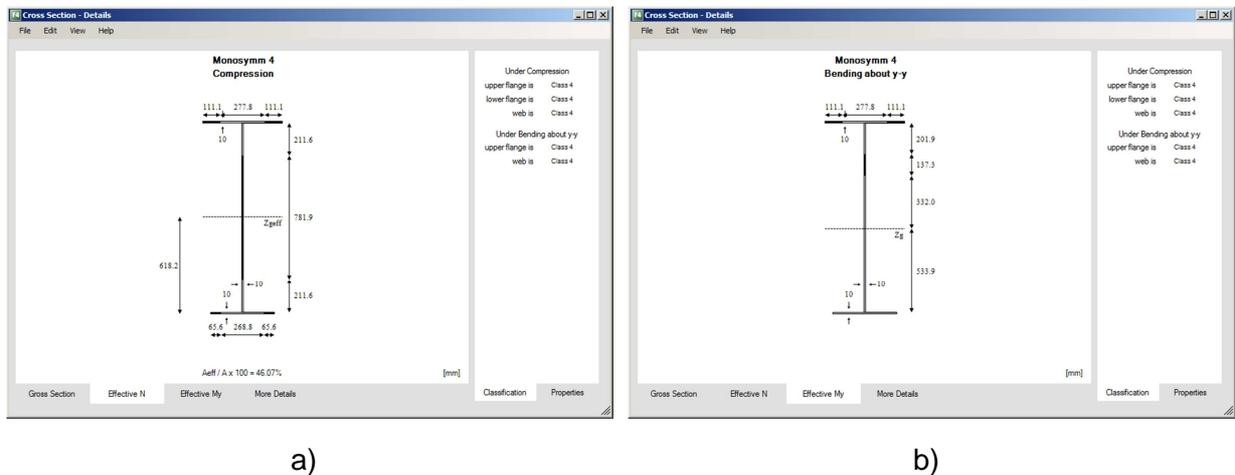


Figura 3. Secção efetiva: a) sujeita a compressão; b) sujeita a flexão segundo o eixo forte.

2.2 Metodologias adotadas

Para cada solicitação descrita, o programa calcula a temperatura crítica (Opção A) ou, dada uma determinada temperatura, verifica a resistência ao fogo (Opção B) dependendo do carregamento. A Figura 4 e a Figura 5 mostram os dois tipos de cálculo.

Para o cálculo da temperatura crítica (Opção A), o programa utiliza um processo incremental iniciado a uma temperatura de 20°C com um incremento de $\Delta\theta = 0.1^\circ\text{C}$ (ver Figura 4) até o valor de cálculo da resistência ao fogo $R_{fi,d,t}$ ser igual ao valor dos efeitos das ações em situação de incêndio $E_{fi,d}$, de acordo com a Eq. (2).

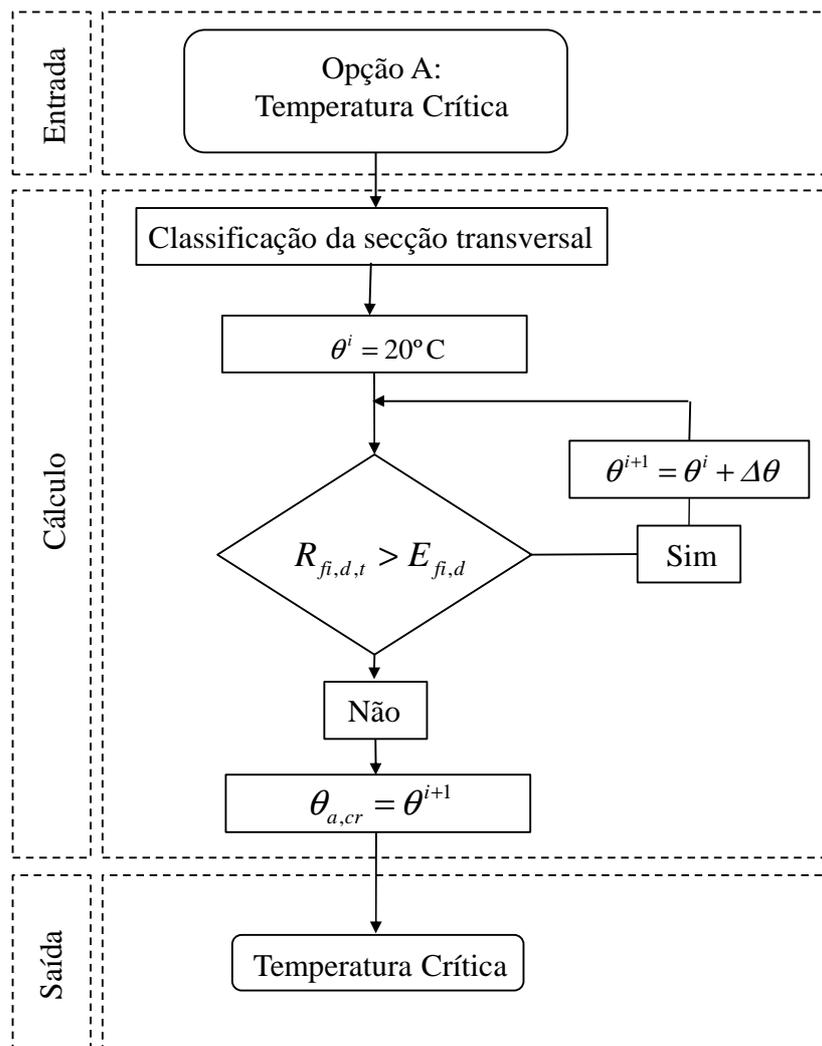


Figura 4. Opção A: Fluxograma de cálculo da temperatura crítica.

Para a verificação da resistência ao fogo da secção transversal ou do elemento a uma determinada temperatura, o utilizador introduz a respetiva temperatura e o *software* efetua as verificações necessárias de acordo com a Figura 5.

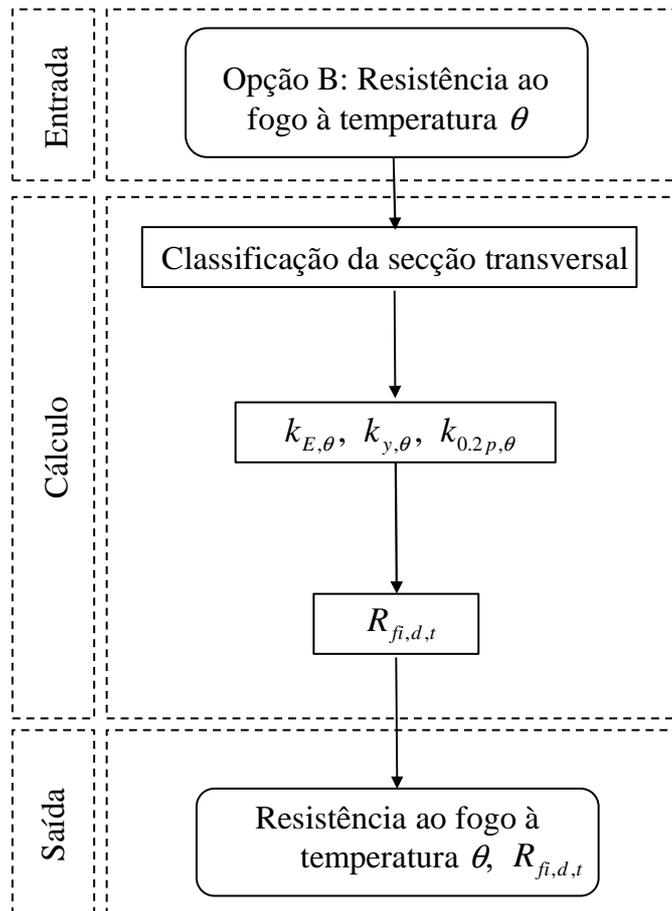


Figura 5. Opção B: Fluxograma de cálculo da verificação da resistência ao fogo.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO – VIGA-COLUNA DE CLASSE 4

Considere-se uma viga-coluna de 2.7 m de altura em aço S355, como ilustrado na Figura 6. Considere-se ainda que a viga-coluna está sujeita a um momento fletor de diagrama uniforme, cujo valor de cálculo em situação de incêndio é $M_{y,fi,Ed} = 20$ kNm, segundo o eixo forte e a um esforço de compressão de valor $N_{fi,Ed} = 20$ kN.

$h = 460 \text{ mm}$ (altura total da secção)
 $b = 150 \text{ mm}$
 $t_w = 4 \text{ mm}$
 $t_f = 5 \text{ mm}$
 $a = 5 \text{ mm}$ (espessura do cordão de soldadura)

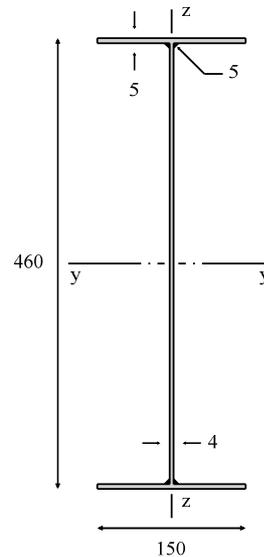


Figura 6. Dimensões da secção transversal do elemento em estudo.

Pretende-se avaliar:

- a temperatura crítica da viga-coluna;
- a resistência ao fogo da viga-coluna para uma temperatura de 600°C.

Solução:

Como será mostrado, a secção transversal desta viga-coluna é de Classe 4 pelo que, para verificar a resistência ao fogo da secção transversal, se deve utilizar a Eq. (6.44) da EN 1993-1-1 adaptada à situação de incêndio:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{A_{eff} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{M_{y,fi,Ed}}{W_{eff,y,min} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (3)$$

Para a resistência à encurvadura da viga-coluna, deve usar-se a Eq. (4.21c) e a Eq. (4.21d) da EN 1993-1-2, adaptadas a perfis de secção transversal de Classe 4:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_{eff} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{eff,y} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (4)$$

e

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A_{eff} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (5)$$

a) As janelas apresentadas de seguida (Figura 7 a Figura 15) mostram o procedimento necessário para obtenção da temperatura crítica da viga-coluna.

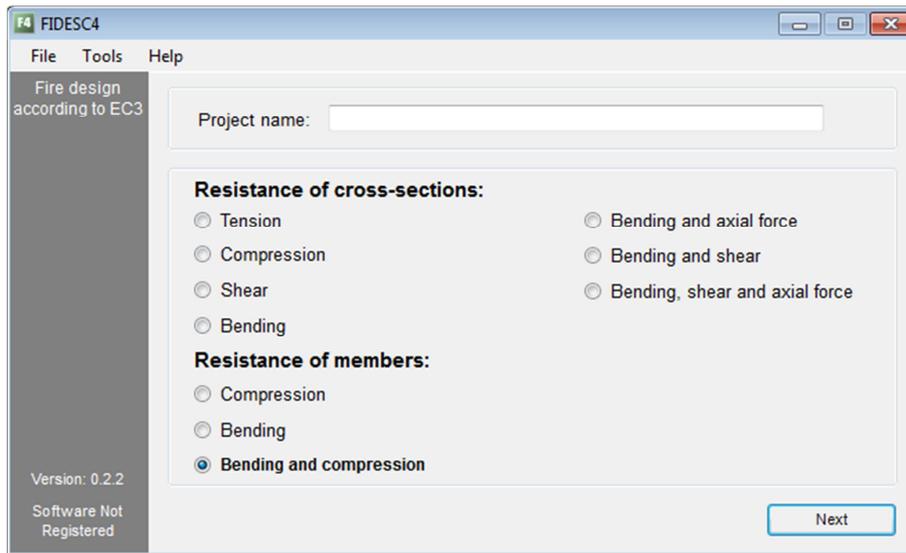


Figura 7. Ecrã principal do FIDESC4 com escolha do tipo de cálculo.

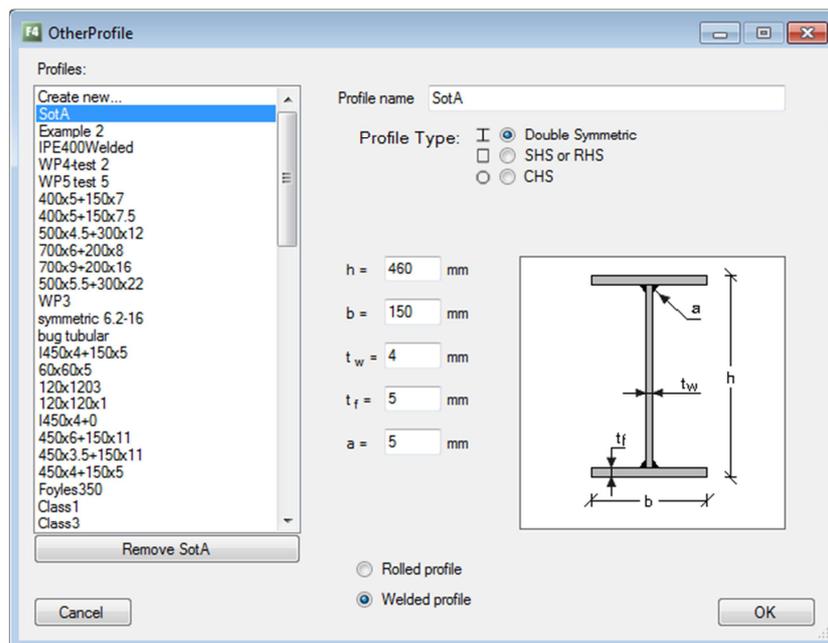


Figura 8. Definição da secção transversal.

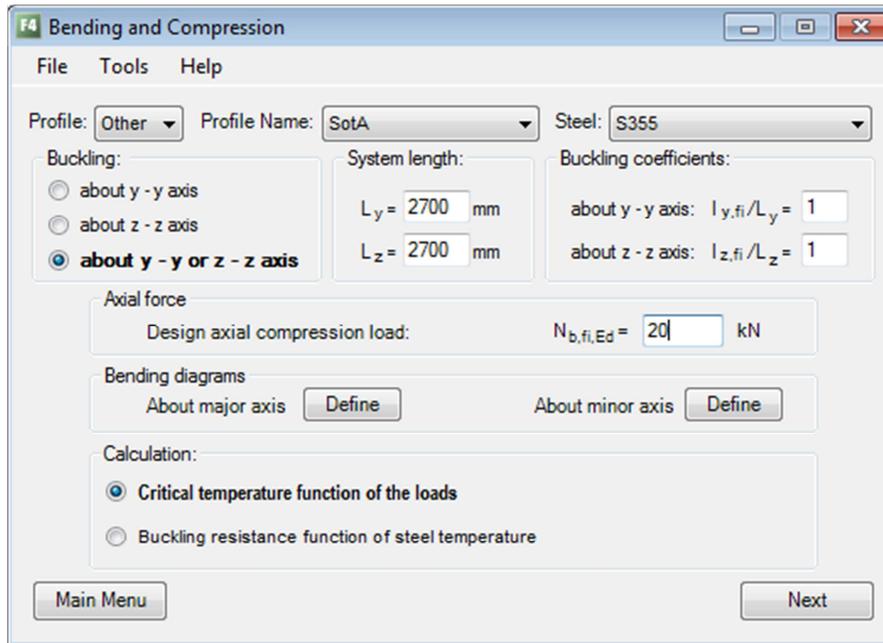


Figura 9. Escolha do aço e introdução de dados.

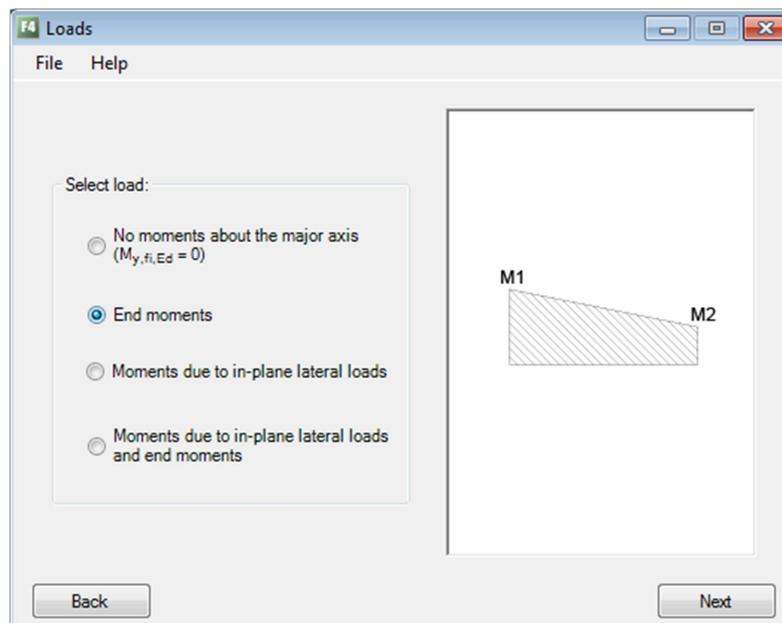


Figura 10. Escolha do tipo diagrama de momentos segundo o eixo forte.

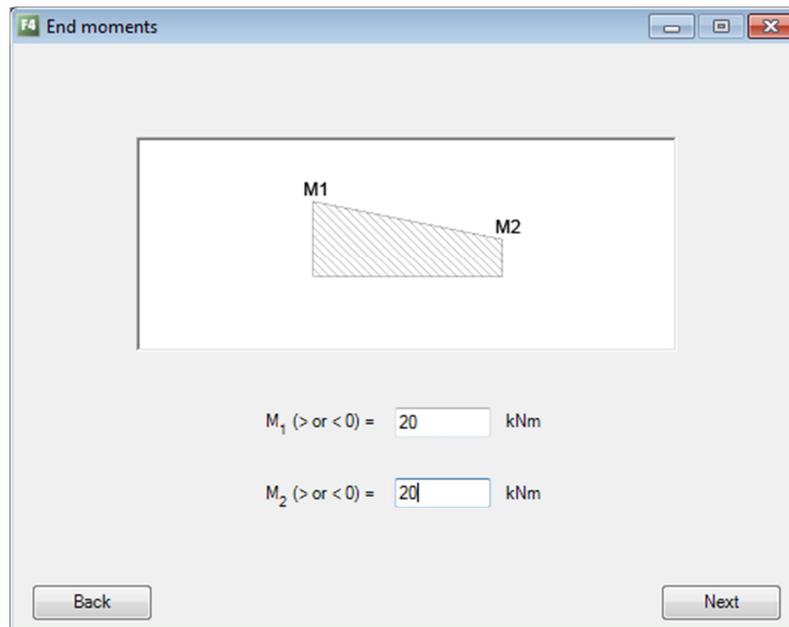


Figura 11. Introdução dos valores dos momentos.

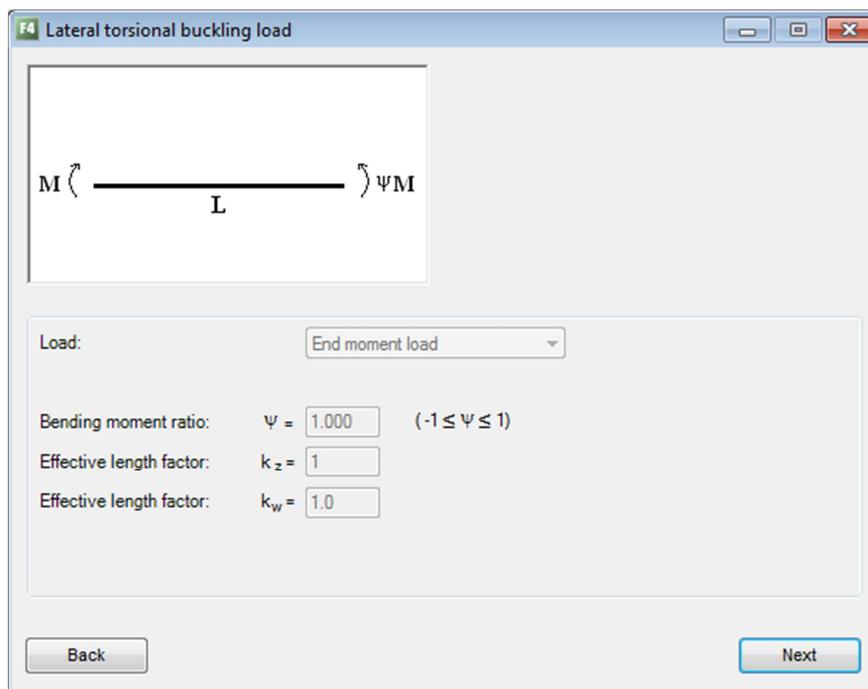


Figura 12. Definição do diagrama de momentos para a encurvadura lateral.

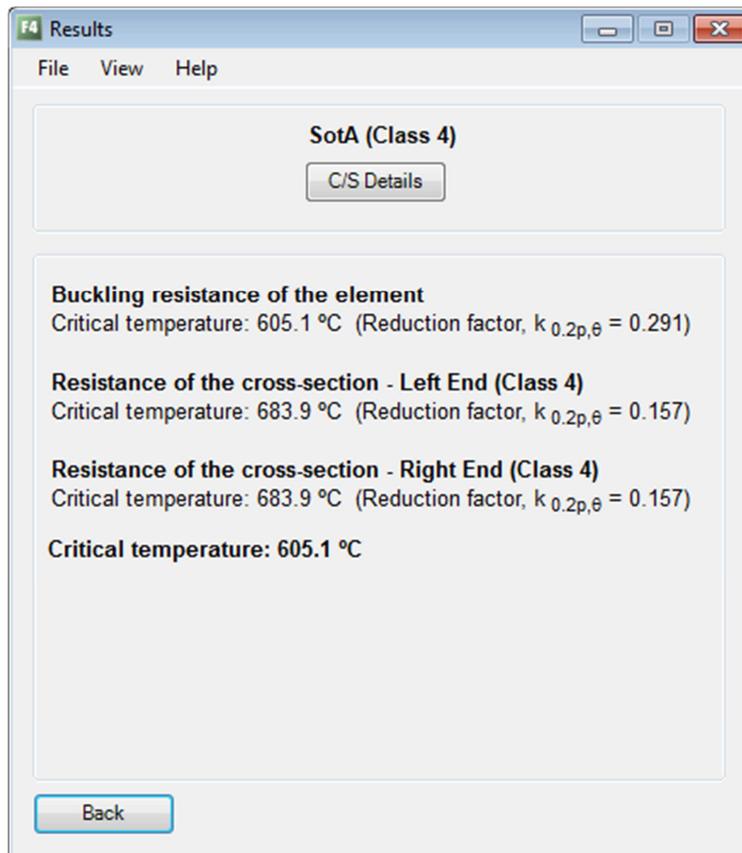


Figura 13. Ecrã de resultados, apresentando a temperatura crítica.

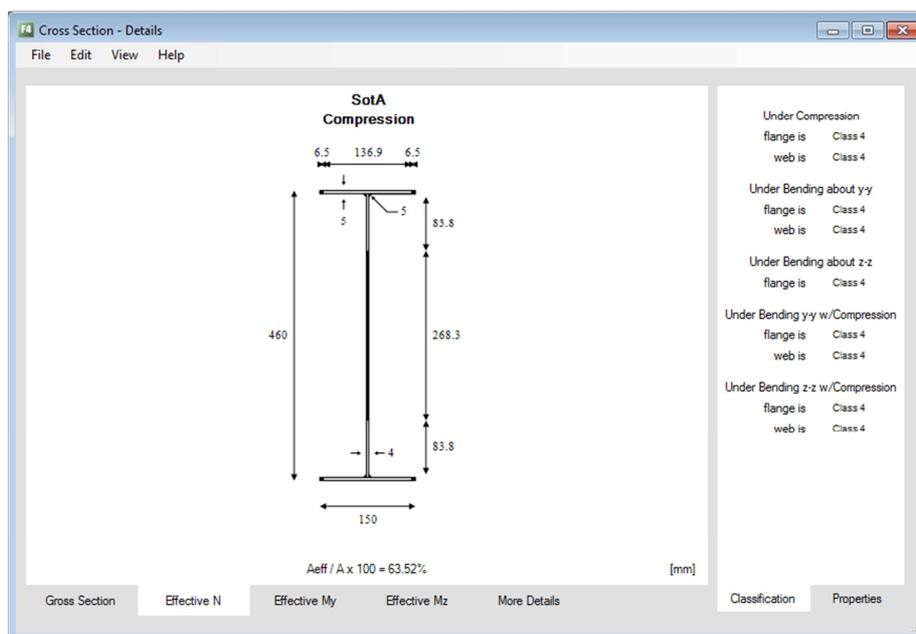


Figura 14. Secção efetiva em compressão.

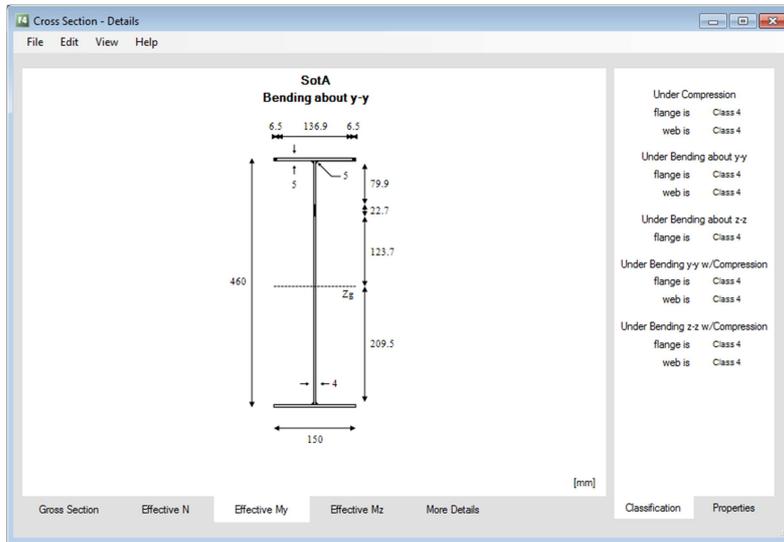


Figura 15. Secção efetiva em flexão segundo o eixo forte.

b) Verificação da resistência ao fogo da viga-coluna à temperatura de 600°C (Figuras 16 e 17)

Figura 16. Introdução da temperatura para verificação da resistência ao fogo.

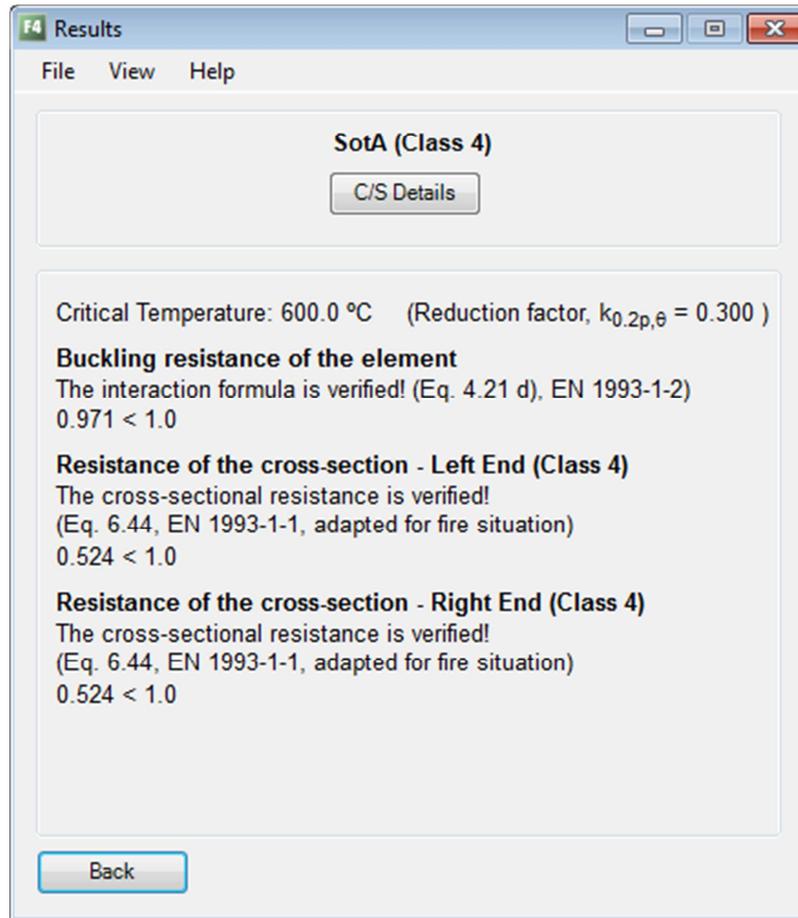


Figura 17. Ecrã de resultados, apresentando a verificação da resistência ao fogo.

A resistência da viga-coluna a 600°C está verificada.

4. CONCLUSÕES

No presente artigo mostraram-se os procedimentos de cálculo, de acordo com a Parte 1-2 do Eurocódigo 3 para a verificação da resistência ao fogo de elementos estruturais com secção transversal de Classe 4, que serviram de base ao desenvolvimento do programa FIDESC4 apresentado. Através de um exemplo de aplicação, foram evidenciadas as potencialidades do programa.

AGRADECIMENTOS

O trabalho realizado neste artigo foi financiado pela Comissão Europeia, através do Research Fund for Coal and Steel no âmbito do Projeto de Investigação Europeu “FIDESC4 - Fire Design of Steel Members with Welded or Hot-rolled Class 4 Cross-sections”, com a referência RFSR-CT-2011-00030.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN, “EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.” European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.
- [2] CEN, “EN 1993-1-5, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements.” European Committee for Standardisation, Brussels, pp. 1–53, 2006.
- [3] Couto C., P. Vila Real, N. Lopes, B. Zhao, “Effective width method to account for the local buckling of steel thin plates at elevated temperatures,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 84, pp. 134–149, Nov. 2014.