

ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO EM VIGAS METÁLICAS COM APOIOS DE EXTREMIDADE NÃO RÍGIDOS A TEMPERATURAS ELEVADAS

André S. Reis¹, Nuno F. F. S. B. Lopes¹ e Paulo J. M. M. F. Vila Real¹

1: Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal
e-mails: andresreis@ua.pt, nuno.lopes@ua.pt, pvreal@ua.pt

Palavras-chave: Fogo, encurvadura por esforço transversal, análise numérica, Eurocódigo 3

Resumo. *O uso de vigas compostas de alma cheia tem vindo a aumentar nos últimos anos, decorrente da busca de soluções economicamente mais competitivas. Este tipo de vigas têm, em relação aos perfis laminados a quente comerciais, almas mais esbeltas que são altamente afetadas pela encurvadura por esforço transversal, um tipo de instabilidade que influencia fortemente a capacidade resistente das vigas. Em situação de incêndio, este fenómeno é amplificado devido à redução das propriedades mecânicas do aço causada pelas temperaturas elevadas. Contudo, no Eurocódigo 3 (EC3) não são dadas regras específicas para a verificação da encurvadura por esforço transversal a temperaturas elevadas. Assim, este trabalho estuda a encurvadura por esforço transversal em vigas compostas de alma cheia com apoios de extremidade não rígidos sujeitas a altas temperaturas. Com base em modelos numéricos calibrados, foram realizadas mais de 500 análises numéricas, geométrica e materialmente não lineares incluindo imperfeições (GMNIA), através da utilização do programa de elementos finitos SAFIR. Foram testadas vigas simplesmente apoiadas, com diferentes secções transversais, à temperatura normal e sujeitas a diferentes temperaturas uniformes de 350, 500 e 600°C. Foram também consideradas diferentes classes de aço, assim como diferentes coeficientes de forma a/h_w , definidos pela relação entre a distância entre reforços transversais (a) e a altura das almas (h_w). Por fim, foram realizadas comparações entre os resultados numéricos e as formulações presentes no EC3, para o dimensionamento à temperatura normal, adaptadas a altas temperaturas através da aplicação direta dos fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço a temperaturas elevadas.*

1. INTRODUÇÃO

As vigas compostas de alma cheia são frequentemente usadas na indústria da construção metálica, tanto em edifícios como em pontes, devido à sua leveza e capacidade para suportar grandes vãos. Para que sejam economicamente competitivas, estas vigas têm geralmente

almas muito esbeltas, tornando-as suscetíveis à ocorrência de fenômenos de instabilidade como, por exemplo, a encurvadura por esforço transverso.

A encurvadura por esforço transverso é um fenómeno importante no dimensionamento de elementos estruturais metálicos com secções esbeltas. Desta forma, este fenómeno foi largamente estudado nas últimas décadas levando à implementação do Método do Campo de Tensões Rodado [1] na Parte 1-5 do EC3 [2], usado para o dimensionamento à temperatura normal de elementos compostos por placas sujeitos a encurvadura por esforço transverso. No entanto, a encurvadura por esforço transverso em elementos estruturais metálicos em situação de incêndio não tem recebido a mesma atenção, não tendo sido ainda demonstrado se este método pode ser aplicado diretamente para a verificação da encurvadura por esforço transverso a temperaturas elevadas.

Uma vez que não são dadas quaisquer indicações na Parte 1-2 do EC3 [3] para a verificação da segurança de elementos estruturais metálicos sujeitos a encurvadura por esforço transverso em situação de incêndio, neste estudo aplicaram-se as regras para o dimensionamento à temperatura normal, de acordo com a Parte 1-5 do EC3, adaptadas a temperaturas elevadas através da aplicação direta dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço em função da temperatura, propostos na Parte 1-2 do EC3.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de vigas metálicas sujeitas a encurvadura por esforço transverso quando submetidas a temperaturas elevadas, avaliando se as prescrições da Parte 1-5 de EC3 para o dimensionamento à temperatura normal podem ser adaptadas para o dimensionamento em situação de incêndio. Com esse propósito, foi realizado um estudo numérico paramétrico usando o programa de elementos finitos SAFIR [4,5], desenvolvido na Universidade de Liège especialmente para a simulação do comportamento de estruturas de edifícios sujeitas a incêndio. Os modelos numéricos utilizados foram previamente calibrados com ensaios experimentais encontrados na literatura [6,7]. A influência das imperfeições iniciais foi tida em conta, considerando-se imperfeições geométricas e tensões residuais.

Neste estudo foram analisadas 132 vigas transversalmente reforçadas com apoios de extremidade não rígidos. Foi avaliado o comportamento destas vigas à temperatura normal e quando submetidas a temperaturas uniformes de 350°C, 500°C e 600°C, considerando a temperatura constante enquanto a carga é aumentada. Foram consideradas diferentes classes de aço (S235, S275, S355 e S460), assim como diferentes coeficientes de forma a/h_w . Por fim, foram realizadas comparações entre os resultados numéricos e as formulações analíticas da Parte 1-5 do EC3 adaptadas a temperaturas elevadas.

2. REGRAS DE DIMENSIONAMENTO DO EUROCÓDIGO 3

A Parte 1-1 do EC3 [8] estabelece que a resistência à encurvadura por esforço transverso deve ser verificada de acordo com a Parte 1-5 de EC3 [2]. Nesta Parte do EC3 podem ser encontradas formulações para a verificação da segurança de elementos estruturais metálicos compostos por placas sujeitos a encurvadura por esforço transverso e a interação entre esforço transverso e momento fletor. Essas formulações serão apresentadas nesta secção.

2.1. Encurvadura por esforço transversal

A resistência à encurvadura por esforço transversal deve ser verificada sempre que o rácio entre a altura e a espessura da alma satisfaça uma das seguintes condições:

- i. $h_w/t_w > 72\varepsilon/\eta$ para almas não reforçadas
- ii. $h_w/t_w > 31\varepsilon/\eta\sqrt{k_\tau}$ para almas reforçadas

onde ε é um parâmetro que depende da tensão de cedência do aço e do módulo de Young, η é um coeficiente relacionado com o endurecimento do aço, igual a 1.2 para aços com tensão de cedência até 460 MPa ou 1.0 para aços com tensão de cedência superior a 460 MPa, e k_τ é o coeficiente de encurvadura por esforço transversal que pode ser calculado a partir das expressões do Anexo A.3 da Parte 1-5 do EC3. Note-se que se estas condições forem satisfeitas é necessário dotar as vigas de reforços transversais nos apoios.

O Método do Campo de Tensões Rodado desenvolvido por Höglund [1] é a base das regras de dimensionamento implementadas na Parte 1-5 do EC3 [2]. No procedimento adotado na EN 1993-1-5, a resistência ao esforço transversal, $V_{b,Rd}$, é obtida de acordo com a Eq. (1), sendo a soma da resistência da alma à encurvadura por esforço transversal, $V_{bw,Rd}$, dada pela Eq. (2) e a contribuição do banzo para a encurvadura por esforço transversal, $V_{bf,Rd}$, que pode ser calculada de acordo com a Eq. (3).

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq h_w t_w \frac{\eta f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (1)$$

onde f_{yw} é a tensão de cedência do aço que constitui a alma, h_w é a altura da alma, t_w é a espessura da alma e γ_{M1} é um coeficiente parcial de segurança que é igual a 1.0

A contribuição da alma $V_{bw,Rd}$ é dada por

$$V_{bw,Rd} = \chi_w h_w t_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (2)$$

onde χ_w é um fator de redução da contribuição da alma para a encurvadura por esforço transversal, que pode ser encontrado na secção 5 da Parte 1-5 do EC3 [2].

A contribuição do banzo $V_{bf,Rd}$ é dada por

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (3)$$

onde f_{yf} é a tensão de cedência do aço que constitui o banzo, b_f é a largura do banzo, t_f é a espessura do banzo, M_{Ed} é o momento fletor atuante, $M_{f,Rd}$ é o momento plástico resistente considerando apenas a secção efetiva dos banzos e a distância c , que define a localização das rótulas plásticas que se formam nos banzos, é dada pela Eq. (4).

$$c = a \left(0.25 + \frac{1.6b_f t_f^2 f_{yf}}{h_w^2 t_w f_{yw}} \right) \quad (4)$$

onde a é a distância entre reforços transversais. É importante realçar que a largura dos banzos não deve exceder $15t$ em cada lado da alma, sendo b_f e t_f as dimensões do banzo com a menor resistência axial.

A Eq. (1) pode ser reescrita, usando as Eq. (2) e (4), da seguinte forma

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = (\chi_w + \chi_f) h_w t_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \leq h_w t_w \frac{\eta f_{yw}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \quad (5)$$

onde χ_f é o fator para a contribuição do banzo dado por

$$\chi_f = \frac{b_f t_f^2 f_{yf} \sqrt{3}}{c h_w t_w f_{yw}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

2.2. Interação entre esforço transversal e momento fletor

No que diz respeito à interação entre esforço transversal e momento fletor, a Parte 1-5 do EC3 [2] estabelece que esta deve ser verificada sempre que o esforço transversal atuante seja superior a metade da resistência da alma à encurvadura por esforço transversal ($V_{Ed} > 0.5V_{bw,Rd}$). Nesses casos deve ser satisfeita a seguinte expressão:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1 \right)^2 \leq 1 \text{ para } \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (7)$$

onde $M_{pl,Rd}$ é o momento plástico resistente considerando a secção efetiva dos banzos e a totalidade da alma, independentemente da classe da secção.

Note-se que a resistência à flexão deve ser verificada de acordo com o ponto 4.6 da Parte 1-5 do EC3 [2], razão pela qual se deve truncar a curva dada pela Eq. (7) pela reta vertical que corta o eixo das abcissas em $M_{pl,Rd}$, no caso de secções de Classe 1 ou 2 (ver Figura 1), ou em $M_{c,Rd}$, no caso de secções de Classe 3 ou 4 (ver Figura 2), o momento elástico resistente da secção ou o momento efetivo resistente da secção, respetivamente.

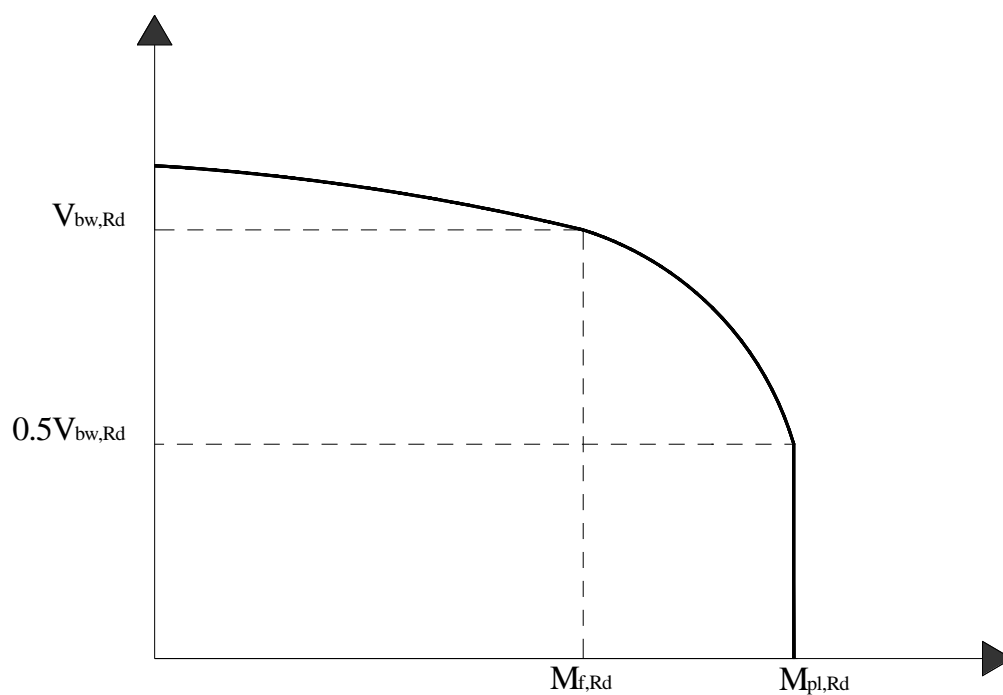


Figura 1. Diagrama de interação esforço transverso-momento fletor para perfis com secção de Classe 1 ou 2.

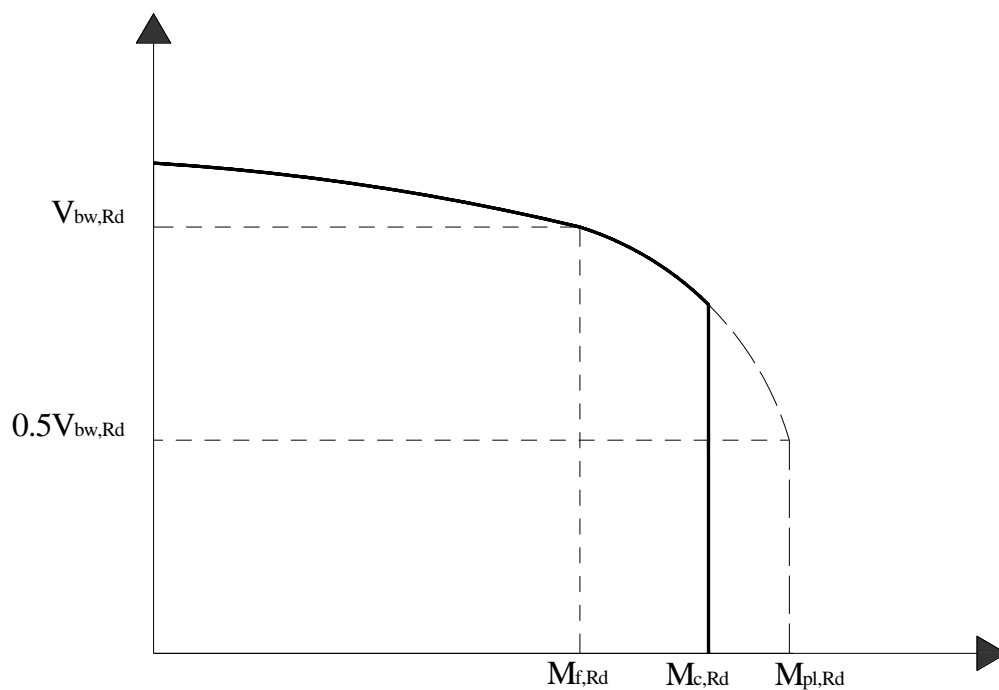


Figura 2. Diagrama de interação esforço transverso-momento fletor para perfis com secção de Classe 3 ou 4.

Note-se que $M_{pl,Rd}$ na Figura 1 é o momento plástico resistente da secção bruta, enquanto que na Figura 2 é o momento plástico resistente considerando a secção efetiva dos banzos e a totalidade da alma, independentemente da classe da secção.

2.3. Dimensionamento em situação de incêndio

A Parte 1-2 do EC3 [3] é dedicada à verificação da resistência ao fogo. Contudo, nesta Parte do EC3 não existem regras específicas para a verificação da capacidade resistente ao esforço transversal de elementos estruturais metálicos sujeitos a temperaturas elevadas.

Devido a esta ausência de informação, a verificação da capacidade resistente ao esforço transversal em situação de incêndio foi realizada com base nas regras de dimensionamento à temperatura normal, de acordo com a Parte 1-5 do EC3 [2], adaptadas para situação de incêndio através da aplicação direta dos fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço a temperaturas elevadas. Nesta metodologia, a redução da tensão de cedência do aço devido às temperaturas elevadas é realizada através da aplicação do fator de redução $k_{y,\theta}$, enquanto que o fator $k_{E,\theta}$ é usado para reduzir o módulo de elasticidade do aço na Eq. (8) [9], usada para o cálculo do parâmetro ε_θ necessário para determinar a esbelteza da alma a temperaturas elevadas ($\lambda_{w,\theta}$). Por fim, $k_{0.2p,\theta}$ é usado para a diminuição da resistência à flexão ($M_{f,Rd}$, $M_{c,Rd}$ e $M_{pl,Rd}$) a temperaturas elevadas de perfis com secções transversais de Classe 4. Estes fatores de redução encontram-se na Parte 1-2 do EC3.

$$\varepsilon_\theta = \sqrt{\frac{235}{f_y k_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{E k_{E,\theta}}{210000}} \quad (8)$$

com f_y e E em [MPa].

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1. Modelo de elementos finitos

Foram realizadas uma série de análises geometricamente e materialmente não lineares incluindo imperfeições (GMNIA) utilizando o programa SAFIR [4,5], um software de elementos finitos desenvolvido na Universidade de Liège para a simulação do comportamento ao fogo de estruturas. Assim, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional para a simulação do comportamento de vigas compostas de alma cheia sujeitas a encurvadura por esforço transversal, conforme se pode ver na Figura 3. Foram utilizados elementos finitos de casca quadrangulares de 4 nós, com 6 graus de liberdade por nó, de modo a conseguir reproduzir os fenómenos de encurvadura local que ocorrem devido à elevada esbelteza da alma das secções transversais das vigas analisadas. Após a realização de uma análise de sensibilidade, foi utilizada uma malha com 30 divisões na alma, 10 divisões nos banzos e 100 divisões por metro linear de viga. Foram colocadas restrições aos deslocamentos laterais no banzo superior de forma a prevenir a encurvadura lateral, uma vez que o modo de rotura

pretendido é o correspondente à encurvadura por esforço transversal e não à encurvadura lateral. Foi aplicada uma carga concentrada a meio vão, distribuída sobre toda a altura da alma, conforme se pode ver na Figura 3. Por fim, a lei constitutiva recomendada no Anexo C da Parte 1-5 do EC3 [2] foi utilizada à temperatura normal, enquanto que nas análises a temperaturas elevadas foi usado o modelo do comportamento do aço adotado na Parte 1-2 do EC3 [3]. Estes modelos não têm em consideração o endurecimento do aço. É importante realçar que este modelo numérico foi previamente validado [6] com ensaios experimentais da literatura [7].

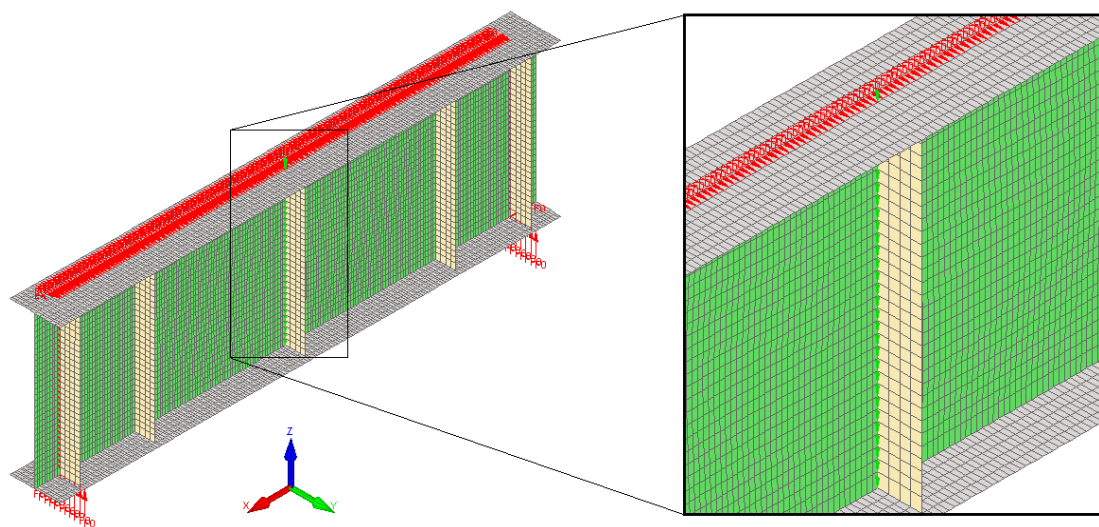


Figura 3. Modelo numérico.

3.2. Imperfeições geométricas e tensões residuais

As imperfeições geométricas estão presentes em todos os elementos estruturais metálicos e podem influenciar a sua capacidade de suporte de carga. Maioritariamente, estas imperfeições são devidas ao processo de produção e fabricação dos perfis, sendo necessário tê-las em consideração no modelo numérico. Desta forma, em primeiro lugar é realizada uma análise linear de encurvadura de forma a encontrar o primeiro modo de encurvadura, sendo a forma deste considerada como a imperfeição geométrica e incorporada na posterior análise não linear. A amplitude máxima considerada para as imperfeições foi, conforme recomendado na Parte 1-5 do EC3 [2], 80% das tolerâncias de fabrico essenciais para perfis soldados, que podem ser encontradas na norma EN 1090-2 [10]. Assim, a amplitude máxima considerada para as imperfeições geométricas foi $0.8b_f/100$ nos banzos e $0.8h_w/100$ na alma. Como a encurvadura local é restringida através da aplicação de contraventamentos laterais no banzo superior, apenas as imperfeições locais foram tidas em consideração na modelação numérica. Os primeiros modos de encurvadura local foram obtidos utilizando o programa de cálculo CAST3M [11], sendo usado o programa RUBY [12] como interface entre o CAST3M e o SAFIR. A Figura 4 mostra um exemplo de um dos modos de encurvadura considerados.

No que diz respeito às tensões residuais, foi considerado o padrão tipicamente observado em secções soldadas [13,14], conforme apresentado na Figura 5.

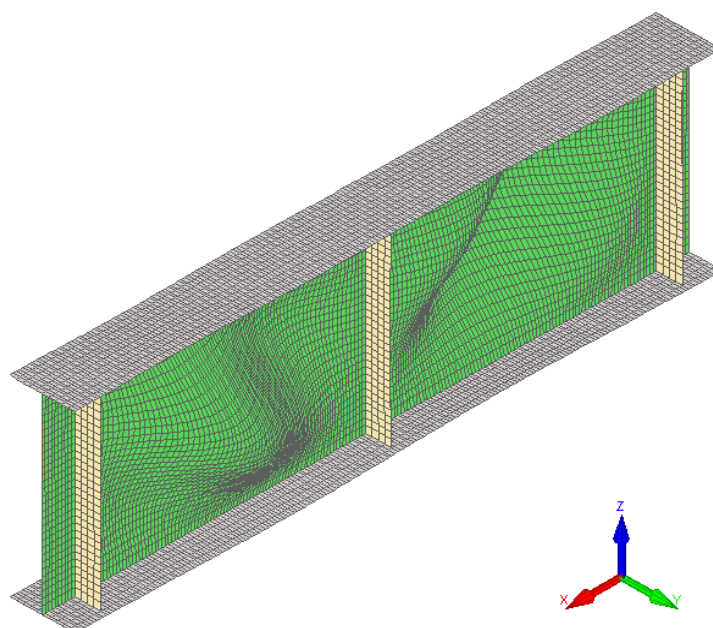


Figura 4. Imperfeições geométricas – exemplo de um modo de encurvadura local.

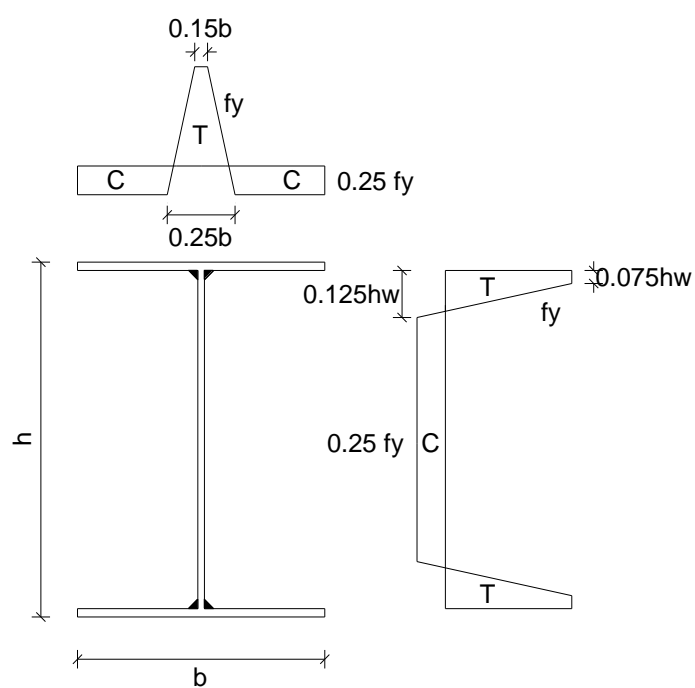


Figura 5. Padrão de tensões residuais considerado no modelo numérico.

3.3. Características das vigas analisadas

Neste trabalho foram estudadas vigas compostas de alma cheia com apoios de extremidade não rígidos e um vão de 1.8m. Foram consideradas diferentes distâncias entre os reforços transversais (a), conforme se pode observar na Figura 6. A espessura dos reforços transversais é 5, 10 e 12 mm (para I-300x t_w -100x t_f , I-600x t_w -200x t_f e I-900x t_w -300x t_f , respetivamente). As principais características das vigas analisadas são apresentadas na Tabela 1. Um total de 132 vigas foram testadas à temperatura normal e submetidas a três temperaturas uniformes de 350°C, 500°C e 600°C considerando a temperatura constante enquanto a carga é aumentada. Quanto às propriedades do aço, foram consideradas diferentes classes de aço (S235, S275, S355 e S460) e um módulo de Young igual a 210 GPa.

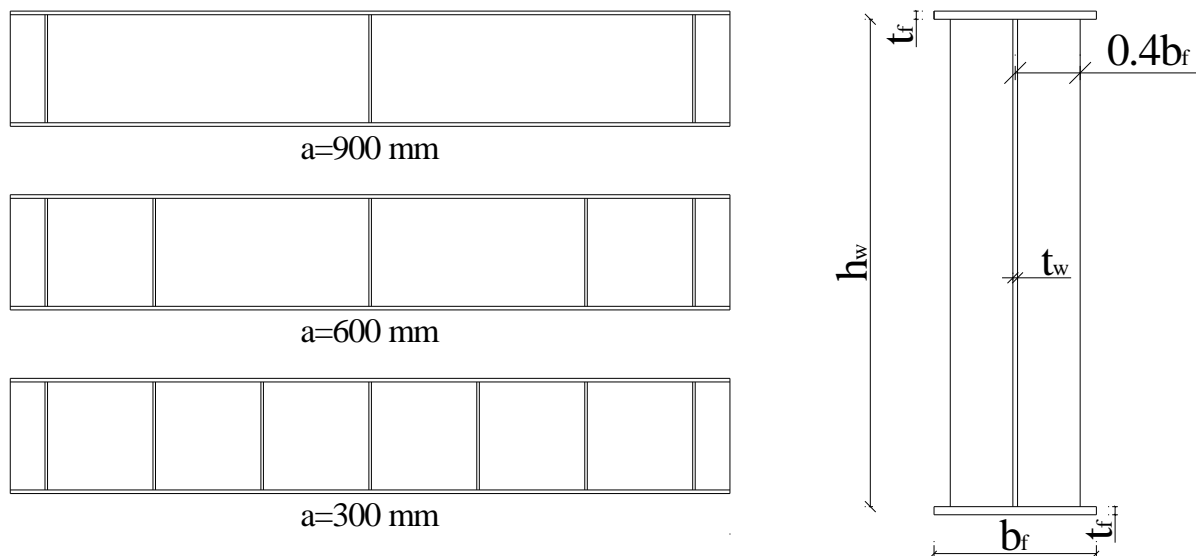


Figura 6. Alçado e notação da secção transversal das vigas analisadas.

Tabela 1. Características das vigas analisadas.

Plate Girder	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	t_f [mm]	a [mm]	f_y [MPa]
I-300x1.5+100x5.0	300	1.5	100	5.0	300, 600 e 900	235, 275, 355 e 460
I-300x2.0+100x10.0		2.0		10.0		
I-300x2.5+100x10.0		2.5		10.0		
I-600x3.0+200x10.0	600	3.0	200	10.0		
I-600x3.5+200x12.0		3.5		12.0		
I-600x4.0+200x12.0		4.0		12.0		
I-900x4.0+300x12.0	900	4.0	300	12.0		
I-900x4.5+300x15.0		4.5		15.0		
I-900x5.0+300x15.0		5.0		15.0		

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Considerações gerais

Na comparação dos resultados numéricos com as formulações do EC3 foram consideradas três zonas diferentes no diagrama de interação esforço transversal-momento fletor apresentado na Figura 7. As vigas que apresentam um modo de rotura devido ao esforço transversal pertencem à zona 1, enquanto que as vigas que exibem uma rotura causada pelo momento fletor inserem-se na zona 3. Por fim, as vigas que apresentam um modo de rotura resultante da interação entre esforço transversal e momento fletor pertencem à zona 2. Na Tabela 2 apresenta-se o rácio entre esforço transversal e momento fletor para cada uma das zonas do diagrama de interação.

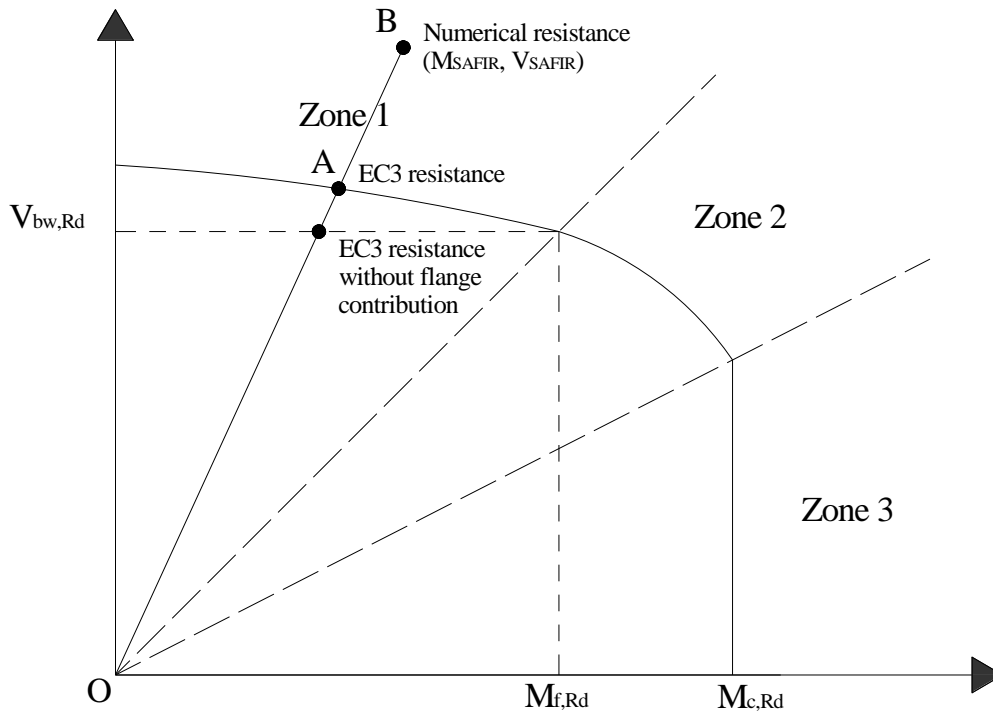


Figura 7. Diagrama de interação esforço transversal-momento fletor: representação das zonas 1, 2 e 3.

Tabela 2. Classificação das zonas do diagrama de interação esforço transversal-momento fletor.

Zona	Expressão
1	$V_{SAFIR}/M_{SAFIR} > V_{bw,Rd}/M_{f,Rd}$
2	$V_{SAFIR}/M_{SAFIR} \leq V_{bw,Rd}/M_{f,Rd}$ $V_{SAFIR}/M_{SAFIR} \geq 0.5V_{bw,Rd} \left(\sqrt{(1-M_{c,Rd}/M_{pl,Rd})/(1-M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})} + 1 \right) / M_{c,Rd}$
3	$V_{SAFIR}/M_{SAFIR} < 0.5V_{bw,Rd} \left(\sqrt{(1-M_{c,Rd}/M_{pl,Rd})/(1-M_{f,Rd}/M_{pl,Rd})} + 1 \right) / M_{c,Rd}$

Uma vez que a forma precisa do diagrama de interação esforço transverso-momento fletor varia com a resistência ao esforço transverso ($V_{bw,Rd}$ e $V_{bf,Rd}$) e com a resistência à flexão ($M_{f,Rd}$ e $M_{pl,Rd}$), e que estes parâmetros variam de viga para viga, a cada viga caberá um único diagrama de interação esforço transverso-momento fletor. Para avaliar as formulações adotadas no EC3 é assumido que o carregamento é proporcional, isto é, o rácio entre esforço transverso e momento fletor permanece constante. Apenas os resultados numéricos pertencentes à zona 1 são usados para avaliar a resistência à encurvadura por esforço transverso de acordo com o EC3 (Eq. (1)), enquanto que os resultados numéricos da zona 2 são usados para avaliar a Eq. (7) que diz respeito à interação entre esforço transverso e momento fletor. O rácio pelo qual cada ponto numérico (M_{SAFIR}, V_{SAFIR}) excede ou fica aquém do diagrama de interação esforço transverso-momento fletor da viga em análise foi designado por U_{EC3} ($U_{EC3} = \overline{OB}/\overline{OA}$ na Figura 7). Este rácio está representado nas Figuras 11 e 12. Um valor de U_{EC3} maior do que 1.0 significa um resultado do lado da segurança e que o ponto numérico está situado no lado de fora do diagrama de interação entre esforço transverso e momento fletor. Esta metodologia segue a já utilizada em [15].

Para comparação com as expressões implementadas no EC3, a contribuição da alma para a encurvadura por esforço transverso ($\chi_{w,SAFIR}$) é calculada através da Eq. (9) deduzindo a contribuição do banzo (χ_f), obtida usando a Eq. (6), à capacidade resistente ao esforço transverso dada pelo modelo numérico.

$$\chi_{w,SAFIR} = \frac{V_{SAFIR}}{h_w t_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}}} - \chi_f \quad (9)$$

4.2. Modos de rotura

Nas análises numéricas efetuadas a temperaturas elevadas foram observados diferentes modos de rotura. Na maioria dos casos a rotura das vigas deveu-se à encurvadura por esforço transverso, sendo apresentado na Figura 8 um exemplo da deformada típica observada neste tipo de rotura. Quanto às restantes vigas analisadas, estas apresentam um modo de rotura causado pela interação esforço transverso-momento fletor, caracterizado pela ocorrência de encurvadura local na alma e no banzo da viga, conforme se pode observar na Figura 9. Apenas duas vigas se encontram na zona 3 do diagrama de interação, onde a rotura é classificada como sendo maioritariamente causada pelo momento fletor. Mas, mesmo nestes casos, observa-se claramente a encurvadura por esforço transverso na alma da viga, o que já era de esperar pois o respetivo resultado numérico situa-se na fronteira entre a zona 2 e a zona 3, conforme se pode ver na Figura 10.

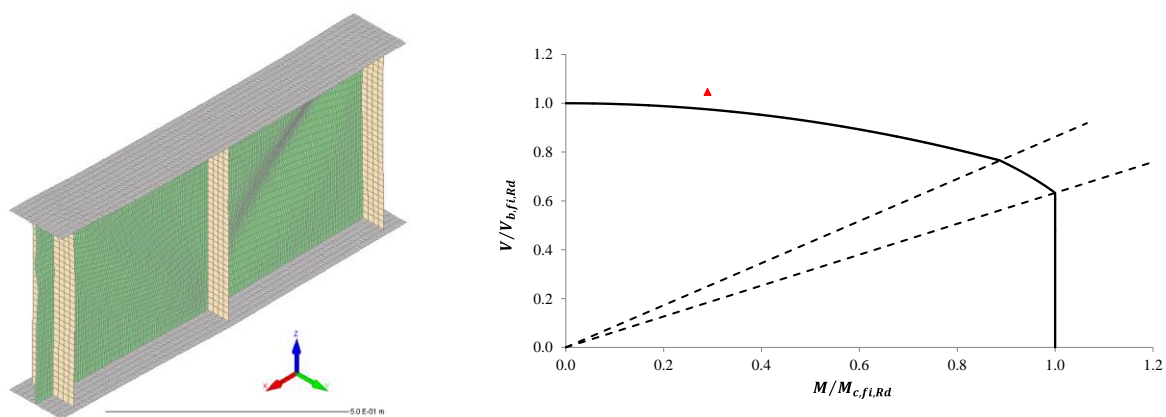


Figura 8. Zona 1 – rotura por esforço transversal (I-900x4.5+300x15.0_S355_350°C_a=900mm).

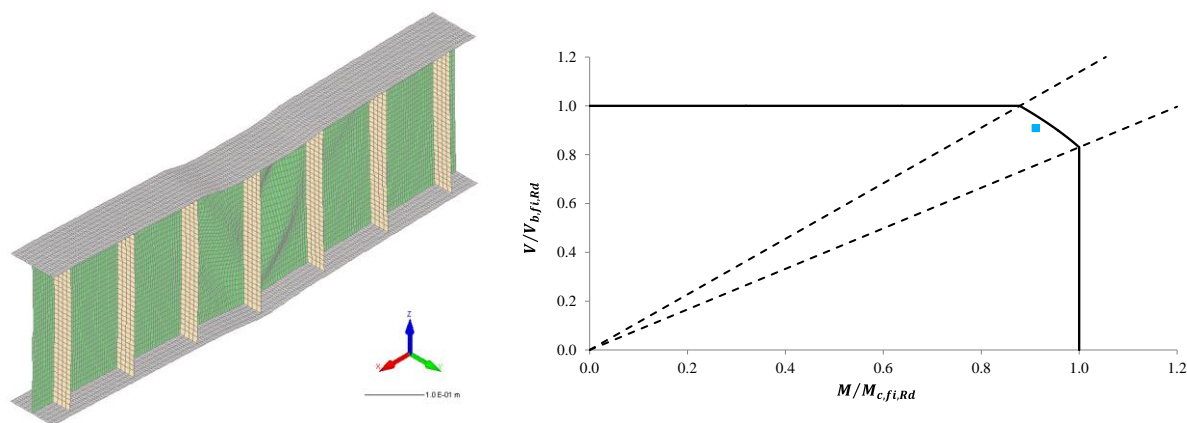


Figura 9. Zona 2 – rotura por interação esforço transversal-momento fletor (I-600x4.0+200x12.0_S235_500°C_a=300mm).

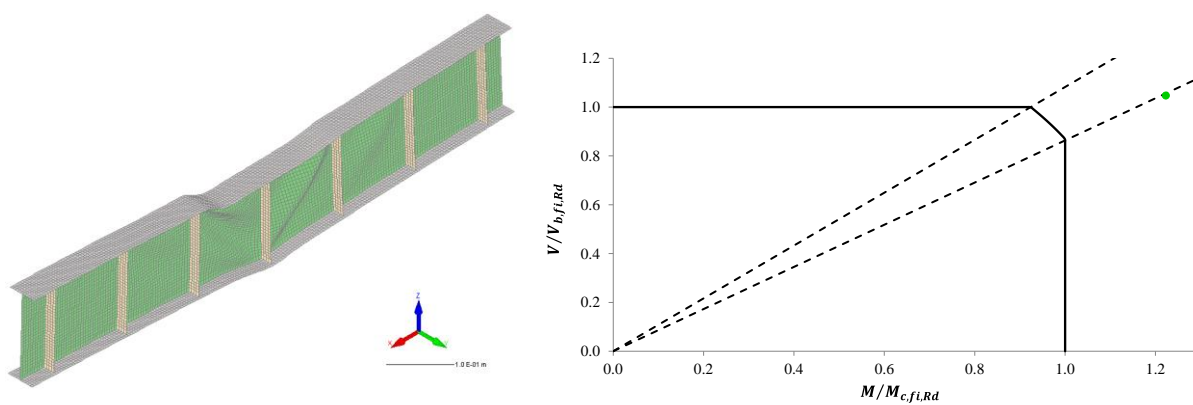


Figura 10. Zona 3 – rotura por flexão (I-300x2.5+100x10.0_S235_600°C_a=300mm).

4.3. Comparação de resultados

Os resultados obtidos no estudo numérico paramétrico foram utilizados para avaliar as formulações da Parte 1-5 do EC3 [2] para determinação da capacidade resistente ao esforço transversal à temperatura normal. Para além disso, foi também avaliada a adaptabilidade destas regras ao dimensionamento em situação de incêndio, através da aplicação dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas. O rácio entre a resistência das vigas obtida numericamente e analiticamente, seguindo o procedimento apresentado na secção 4.1 deste trabalho, é apresentado nas Figuras 11 e 12 para temperatura normal e altas temperaturas, respetivamente. À temperatura normal todas as vigas são classificadas como pertencentes à zona 1, enquanto que a temperaturas elevadas o momento fletor ganha maior relevância registando-se algumas vigas nas zonas 2 e 3 do diagrama de interação esforço transversal-momento fletor. A partir da Figura 11, verifica-se que à temperatura normal 18,5% dos resultados não estão do lado da segurança, maioritariamente para $\bar{\lambda}_w < 1.0$. Para $\bar{\lambda}_w \geq 1.0$, observa-se que as formulações do EC3 estão do lado da segurança. A média do coeficiente de utilização UEC3 é 1.11. Em situação de incêndio, 32,3% das vigas analisadas apresentam resultados que não estão do lado da segurança, envolvendo uma gama maior de $\bar{\lambda}_{w,\theta}$, conforme é perceptível na Figura 12. Contudo, o coeficiente médio de utilização mantém-se do lado da segurança sendo igual a 1.08.

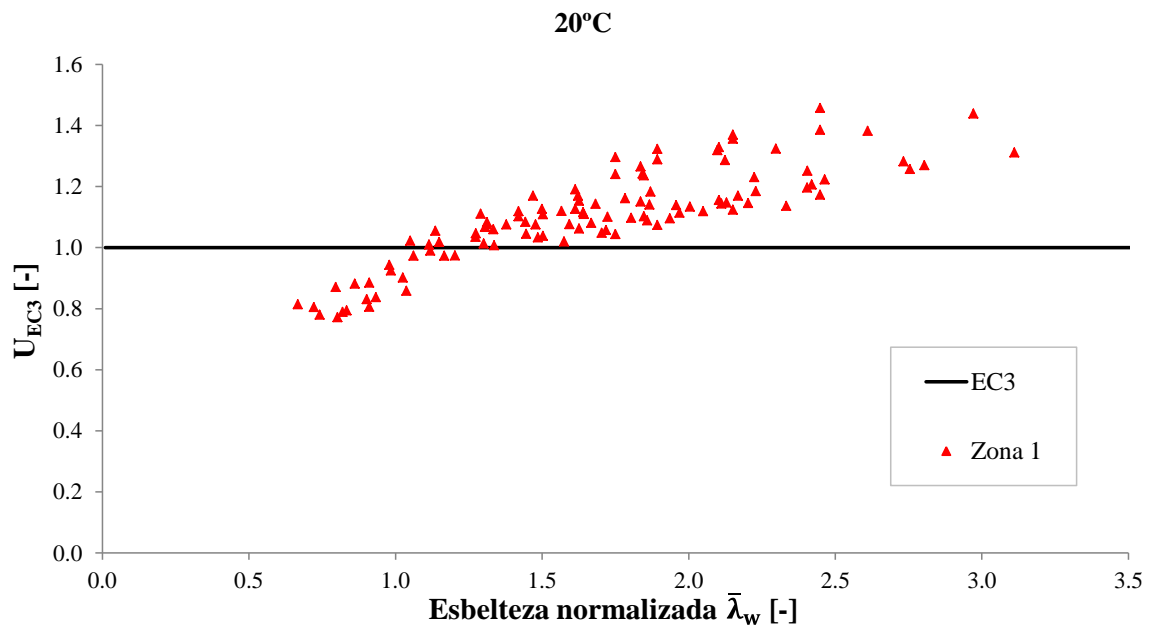


Figura 11. Coeficiente de utilização (resistência numérica/resistência analítica) à temperatura normal.

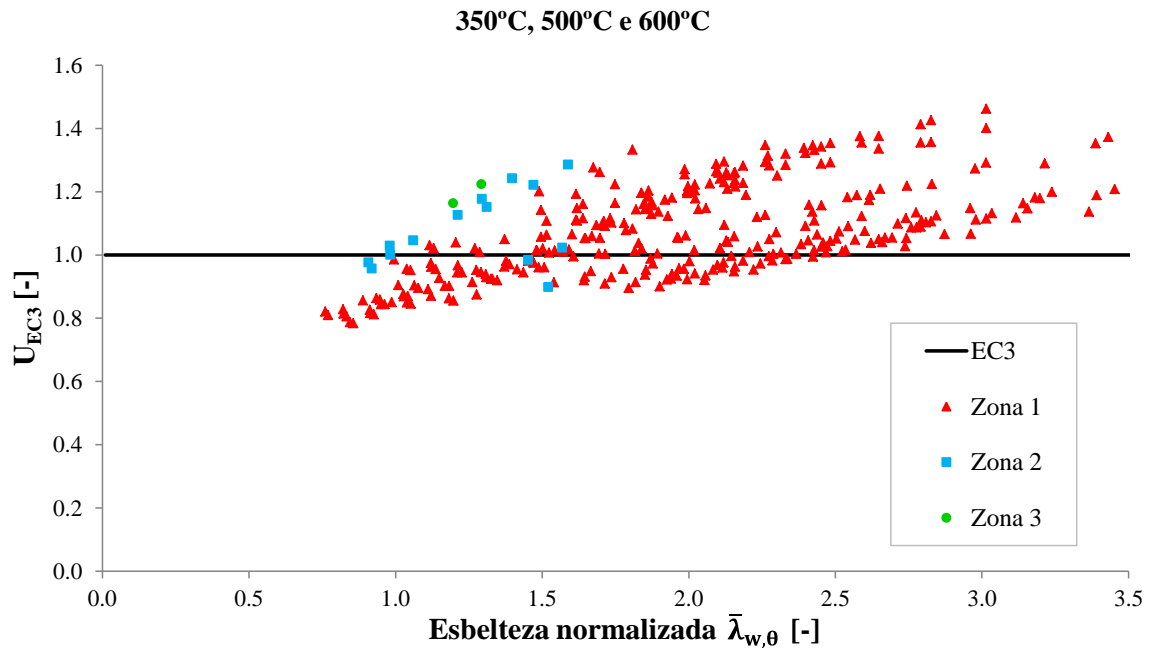


Figura 12. Coeficiente de utilização (resistência numérica/resistência analítica) a temperaturas elevadas.

Os resultados numéricos foram também usados para avaliar as expressões do EC3 para o cálculo da resistência da alma à encurvadura por esforço transversal. Foram considerados apenas os resultados pertencentes à zona 1, uma vez que nos restantes a resistência última das vigas ao esforço transversal pode não ser atingida devido à influência do momento fletor na rotura. A contribuição dos banzos foi deduzida à resistência última das vigas obtida numericamente, de acordo com a Eq. (9). Na curva de dimensionamento para a encurvadura por esforço transversal foi utilizado $\eta=1.0$, em vez do valor $\eta=1.2$ recomendado no EC3, uma vez que o modelo numérico não tem em consideração o aumento de 20% da tensão de cedência devido ao endurecimento do aço [16,17]. Na Figura 13 apresenta-se a comparação entre os resultados numéricos e as prescrições do EC3 para a determinação da resistência da alma à encurvadura por esforço transversal à temperatura normal, onde se pode observar que os resultados numéricos se encontram maioritariamente do lado da segurança, com exceção das vigas com esbelteza da alma inferior a 1.0, à semelhança do que se pode observar em [1]. Na Figura 14 apresenta-se a mesma análise para os resultados numéricos das vigas submetidas a temperaturas elevadas, sendo perceptível que quanto menor for a esbelteza da alma a temperaturas elevadas, mais do lado da insegurança se encontram os resultados numéricos. Por fim, apresenta-se na Figura 15 a resistência da alma à encurvadura por esforço transversal para os vários coeficientes de forma (a/h_w) das vigas analisadas. Embora as vigas com $a/h_w=0.33$ apresentem resultados que não estão do lado da segurança, é importante realçar que não é comum o uso de vigas com coeficientes de forma tão baixos.

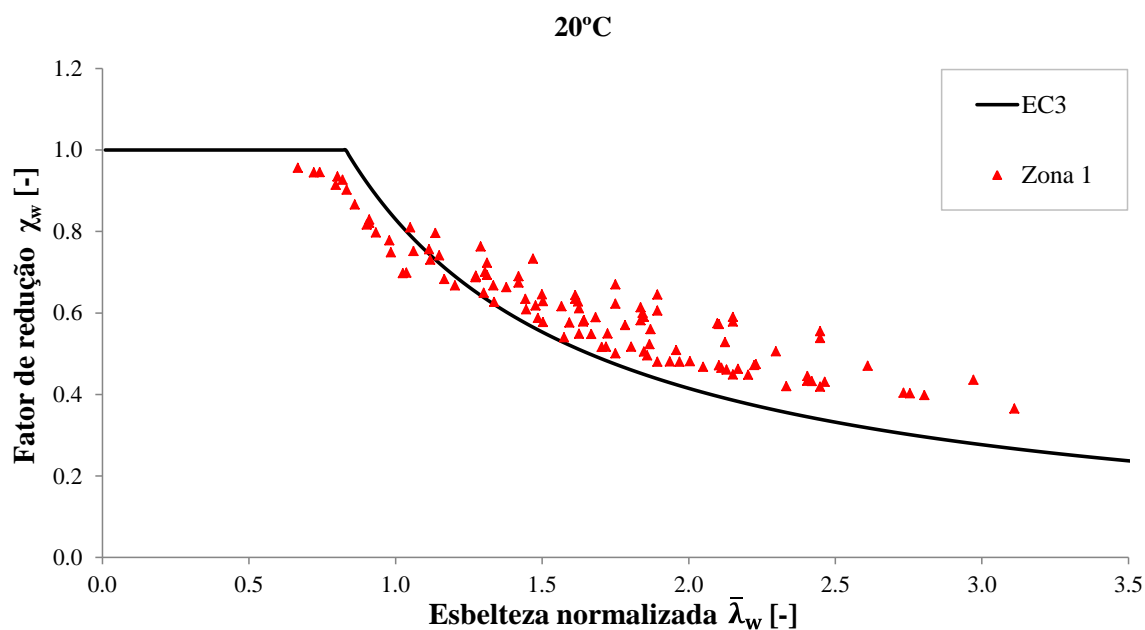


Figura 13. Contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal à temperatura normal.

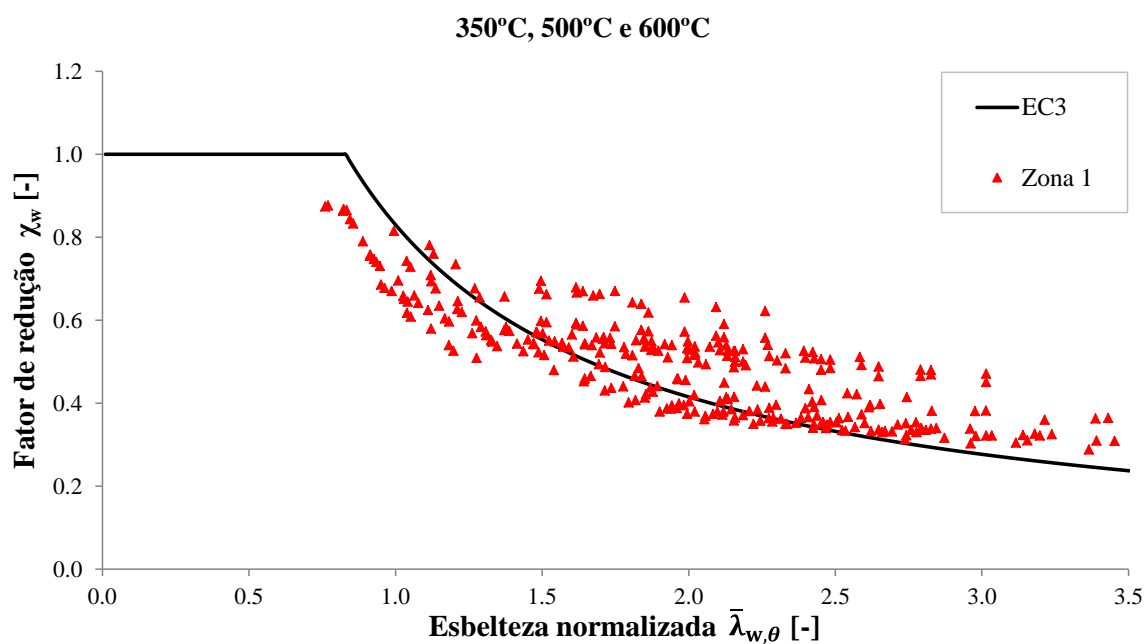


Figura 14. Contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal a temperaturas elevadas.

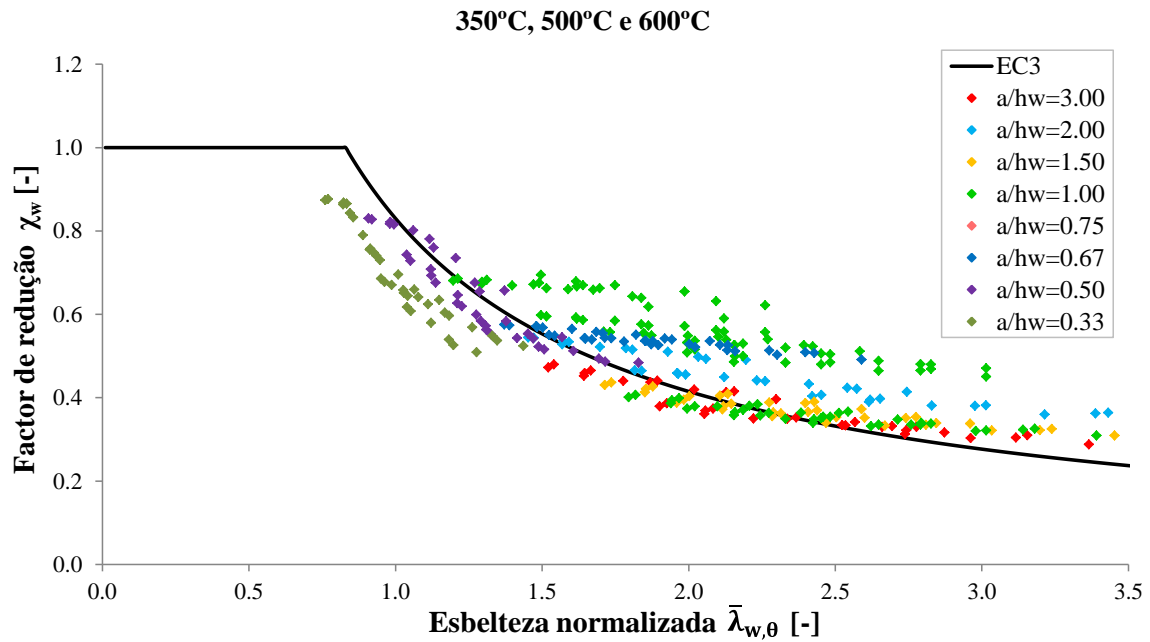


Figura 15. Contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal a temperaturas elevadas para diferentes coeficientes de forma a/h_w .

Na Figura 16 apresenta-se a deformada no instante da rotura de uma viga submetida a 500°C para diferentes distâncias entre reforços transversais. A encurvadura da alma é claramente observada em ambas as vigas.

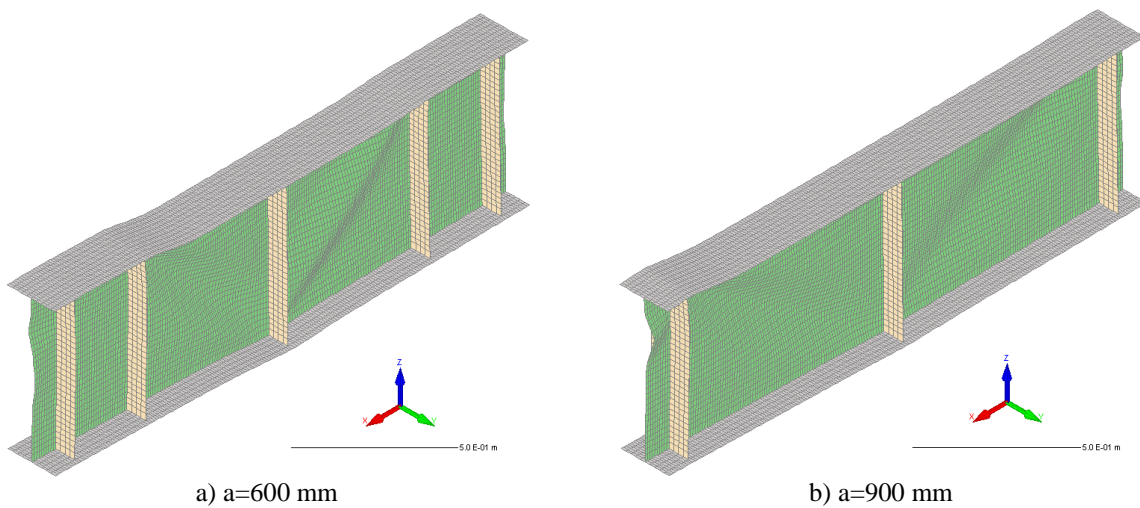


Figura 16. Deformada no momento da rotura da viga I-600x3.5+200x12.0_S355_500°C.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas transversalmente reforçadas, com apoios de extremidade não rígidos, submetidas a temperaturas elevadas. Foi realizado um estudo numérico paramétrico onde se consideraram diferentes dimensões das secções transversais das vigas, três distâncias entre reforços transversais e quatro classes de aço. Foram efetuadas comparações entre os resultados numéricos e as formulações da Parte 1-5 do EC3. Uma vez que não são dadas, na Parte 1-2 do EC3, regras específicas para a verificação da capacidade resistente ao esforço transversal em situação de incêndio, foi usada uma metodologia baseada nas regras de dimensionamento à temperatura normal, adaptadas para o dimensionamento em caso de incêndio através da aplicação direta dos fatores de redução para a relação tensão-extensão do aço a temperaturas elevadas, que se encontram na Parte 1-2 do EC3.

As vigas analisadas foram classificadas em três zonas diferentes, consoante o modo de rotura que apresentam e a posição do ponto numérico (M_{SAFIR}, V_{SAFIR}) no diagrama de interação esforço transversal-momento fletor. As expressões do EC3 para o cálculo da resistência da alma à encurvadura por esforço transversal são avaliadas usando apenas as vigas pertencentes à zona 1 do diagrama de interação, enquanto que as vigas cujos pontos numéricos se situam na zona 2 são utilizadas para avaliar a expressão de interação esforço transversal-momento fletor. A avaliação da segurança é efetuada com base no rácio pelo qual cada ponto numérico excede ou fica aquém do diagrama de interação esforço transversal-momento fletor da viga em análise.

Para as vigas analisadas, verificou-se que as expressões do EC3 para a verificação da resistência ao esforço transversal à temperatura normal estão do lado da segurança, com exceção de vigas com esbelteza da alma inferior a 1.0. Quanto à resistência à encurvadura por esforço transversal em situação de incêndio, verificou-se que a aplicação dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço a temperaturas elevadas é insuficiente, existindo bastantes resultados que não estão do lado da segurança, principalmente para vigas com esbelteza da alma a altas temperaturas inferior a 2.0. Observou-se ainda que quanto menor for a esbelteza da alma a temperaturas elevadas, mais do lado da insegurança se encontram os resultados numéricos. Finalmente, no que diz respeito à interação esforço transversal-momento fletor, apenas quinze vigas apresentaram um modo de rotura causado pela combinação destes dois esforços, sendo que para essas foi possível observar que os resultados numéricos estão do lado da segurança. Desta forma, considera-se que a aplicação dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço à fórmula de interação esforço transversal-momento fletor é suficiente para efetuar o dimensionamento de vigas sujeitas a este problema em situação de incêndio.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Estado Português através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) no âmbito da bolsa de doutoramento SFRH/BD/85563/2012 (financiamento POPH/FSE) atribuída ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Höglund, “Shear buckling resistance of steel and aluminium plate girders”, *Thin-Walled Structures*. Vol. 29, n. 1-4, pp. 13-30 (1997).
- [2] CEN, EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements, Brussels (2006).
- [3] CEN, NP EN 1993-1-2, Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço – Parte 1-2: Regras gerais para a verificação da resistência ao fogo (2010).
- [4] J.M. Franssen, “SAFIR A Thermal/structural program modelling structures under fire”, *Engineering Journal*. Vol. 42, n. 3, pp. 143-158 (2005).
- [5] J.M. Franssen, “User’s manual for SAFIR - A computer program for analysis of structures subjected to fire: Department ArGEnCO”, *University of Liège* (2011).
- [6] A. Reis, N. Lopes e P. Vila Real, “Modelação numérica da resistência de vigas metálicas sujeitas a encurvadura por esforço transversal à temperatura normal e ao fogo”, *IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável*, pp. 705-716 (2013).
- [7] C.M.M. Gomes, P.J.S. Cruz e L. Simões da Silva, “Avaliação experimental do comportamento ao corte de vigas de aço esbeltas”, *Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho*, n. 7 (2000).
- [8] CEN, NP EN 1993-1-1, Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (2010).
- [9] J.M. Franssen e P. Vila Real, “Fire Design of Steel Structures”, *ECCS Eurocode Design Manuals*, Ernst & Sohn A Wiley Company, 1st Edition (2010).
- [10] CEN, EN 1090-2:2008+A1, Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures (2011).
- [11] CAST3M, CAST3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission (2012). <http://www-cast3m.cea.fr/>
- [12] C. Couto, P. Vila Real e N. Lopes, RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using CAST3M, University of Aveiro (2013).
- [13] ECCS, “Manual on stability of steel structures”, *European Convention for Constructional Steelwork, Technical Committee 8 - Structural Stability*, Publicação n. 22 (1976).
- [14] ECCS, “Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints”, *European Convention for Constructional Steelwork, Technical Committee 8 - Structural Stability*, Publicação n. 33 (1984).
- [15] N. Saliba, E. Real e L. Gardner, “Shear design recommendations for stainless steel plate girders”, *Engineering Structures*, Vol. 59, pp. 220-228 (2014).
- [16] D. Beg, U. Kuhlmann, L. Davaine e B. Braun, “Design of Plated Structures – Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Design of Plated Structures”, *ECCS Eurocode Design Manuals*, Ernst & Sohn A Wiley Company, 1st Edition (2010).
- [17] B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, C. Muller e D. Beg, “Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-5: Plated Structural Elements”, *JRC Scientific and Technical Reports* (2007).