

INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS A TEMPERATURAS ELEVADAS – DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA CRÍTICA

Paulo A. G. Piloto^{1*}, Luís M. R. Mesquita¹, Mário A. P. Vaz², Paulo J. M. M. Vila Real³

1: Departamento Mecânica Aplicada
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Campus Santa Apolónia, ap. 1134, 5301-857 Bragança – Portugal
e-mail: {ppiloto,lmesquita}@ipb.pt, web: {www.ipb.pt/~ppiloto,www.ipb.pt/~lmesquita}

2: Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto – Portugal
e-mail: gmavaz@fe.up.pt , web: www.fe.up.pt

3: Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Campus Santiago, 3810-193 Aveiro – Portugal
e-mail: pvreal@civil.ua.pt

Palavras-chave: Encurvadura lateral, Vigas em aço, Temperatura crítica, Resistência ao fogo, Testes experimentais, Análise numérica de grandes deslocamentos.

Resumo. *A resistência dos elementos de uma estrutura, quando submetidos a temperaturas elevadas, pode ser verificada no domínio da temperatura, definindo-se um valor crítico para a temperatura máxima quando o efeito das acções iguala o valor da resistência do elemento. Em elementos de viga não restringidos lateralmente, a temperatura crítica pode ser determinada em função do tipo de carregamento e grau de utilização, para uma situação de instabilidade por encurvadura lateral.*

Neste artigo serão apresentados resultados experimentais de ensaios realizados em perfis metálicos IPE100, resultados de simulações numéricas efectuadas com o elemento SHELL181 do programa ANSYS e resultados propostos pelo Eurocódigo 3, parte 1.2.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento das estruturas metálicas deve resultar da verificação da segurança dos respectivos elementos, quando estes são submetidos ao conjunto de acções previstas pelos regulamentos. Este tipo de estruturas é muito sensível ao efeito das acções térmicas, especialmente ao efeito de temperaturas elevadas como as que podem resultar de um acidente tipo fogo. A resistência ao fogo de um elemento estrutural pode ser definida como o intervalo de tempo transcorrido desde o início do incêndio até ao momento em que o elemento atinja a respectiva temperatura crítica, ou seja, a temperatura a partir da qual o elemento deixa de satisfazer as funções de suporte de carga para as quais foi projectado. Esta temperatura crítica depende do nível de carregamento do elemento [1].

Neste artigo será apresentado o estudo de elementos de viga IPE100 com apoios de forquilha, submetidos a um carregamento mecânico, distribuído q e a uma carga concentrada Q localizada a meio vão. O efeito da temperatura será reproduzido com uma taxa de aquecimento correspondente a 800 [°C/h], conforme representado na Figura 1.

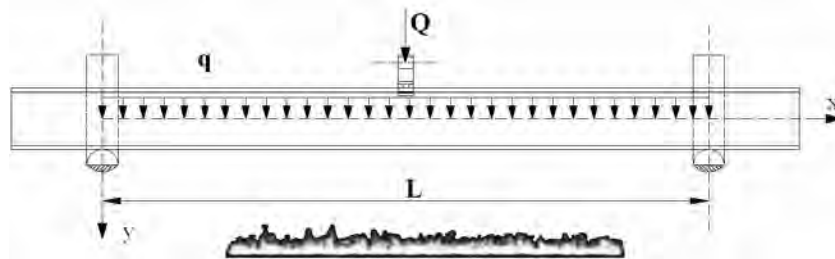


Figura 1. Modelo de carregamento de um elemento de viga.

O grau de utilização imposto e a contínua degradação das propriedades mecânicas do material, podem levar este elemento a atingir o estado limite último de instabilidade por encurvadura lateral torsional. Este efeito é caracterizado por um grande deslocamento lateral e por uma rotação da secção, conforme se representa na Figura 2. A temperatura crítica corresponderá ao estado representado.

Este trabalho permitiu determinar experimentalmente o valor das temperaturas críticas para vários comprimentos de viga e para um grau de utilização específico de 60%, comparando os resultados com as simulações numéricas efectuadas e com os valores preconizados no Eurocódigo [2]. Para além destes resultados serão ainda apresentados resultados numéricos e analíticos da temperatura crítica para diferentes valores de graus de utilização, a variar entre 10% e os 90%, para o mesmo tipo de carregamento, admitindo a carga distribuída constante, fazendo variar o valor da carga concentrada.

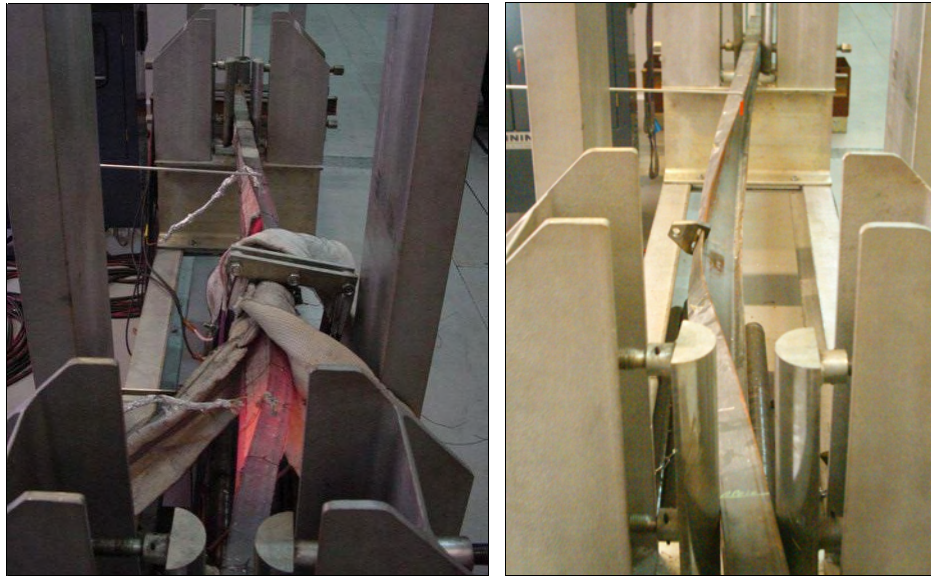


Figura 2. Modo de colapso do elemento de viga.

2. RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL – EUROCÓDIGO 3

A verificação da resistência de um elemento estrutural pode ser efectuada no domínio da temperatura, utilizando o método de análise simplificado, conforme preconizado em [2]. O valor da temperatura crítica é estabelecida para um determinado nível de carregamento. O limite de segurança, é estabelecido pela Equação 1.

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

em que $E_{fi,d}$ representa o valor de projecto do efeito das acções exercidas sobre o elemento, que no caso presente deve ser determinado em função da combinação acidental, enquanto que $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo da capacidade resistente do elemento, ver Figura 3.

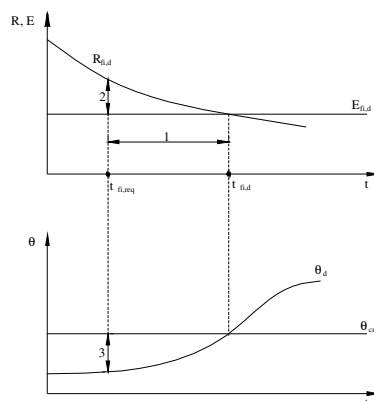


Figura 3. Domínios de verificação da resistência ao fogo.

Quando a resistência for directamente proporcional à tensão de cedência do material $f_{y,\theta}$, o grau de utilização iguala o valor do coeficiente de redução desta, $k_{y,\theta}$, sendo a temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ determinada pela Equação 2.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (2)$$

O grau de utilização μ_0 é definido pelas acções e pela capacidade resistente no instante $t = 0$, isto é, à temperatura ambiente, mas com o valor das propriedades do material calculado para o instante t , ver Equação 3.

$$\mu_0 = \frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}} \quad (3)$$

No caso concreto em que se espera atingir o colapso do elemento por instabilidade, o método para determinação da temperatura crítica deverá obedecer a um processo iterativo.

3. RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A implementação de um estudo experimental sobre o comportamento de elementos de viga submetidos a temperaturas elevadas é de difícil execução, devido aos custos inerentes e limitações na dimensão das fornalhas. Assim, os ensaios realizados deverão representar os casos mais comuns.

O projecto de vigas sem estrangimentos laterais assume especial importância no caso elementos com grande esbelteza, como são exemplo os elementos metálicos em habitações e em pavilhões industriais.

Existem pouco ensaios experimentais realizados em vigas a temperaturas elevadas, salientando-se o trabalho desenvolvido no domínio da resistência (120 ensaios) por Piloto *et al* [3] e o mais recente estudo no domínio da temperatura (15 ensaios) realizado por Mesquita *et al* [4].

Neste trabalho serão apresentados os resultados dos 15 ensaios efectuados em vigas da série Europeia IPE100, com comprimentos a variar entre 1.5 e 4.5 [m]. Para cada comprimento de viga foram efectuados três ensaios, apresentando resultados sem grande dispersão.

3.1. Procedimento experimental

Nos ensaios experimentais foi utilizado um pórtico de reacção (1) e um conjunto de pesos (2) (varões em aço) para facilitar o efeito da acção mecânica e um potente centro de aquecimento com 70 [kVA] para facilitar o efeito da acção térmica, ver Figura 4. Sistemas auxiliares de isolamento (8) foram aplicados na envolvente da viga (9) para aumentar a eficiência energética do processo. Os elementos de viga foram aquecidos por intermédio de resistências electro-cerâmicas (7) ligadas ao centro de aquecimento.

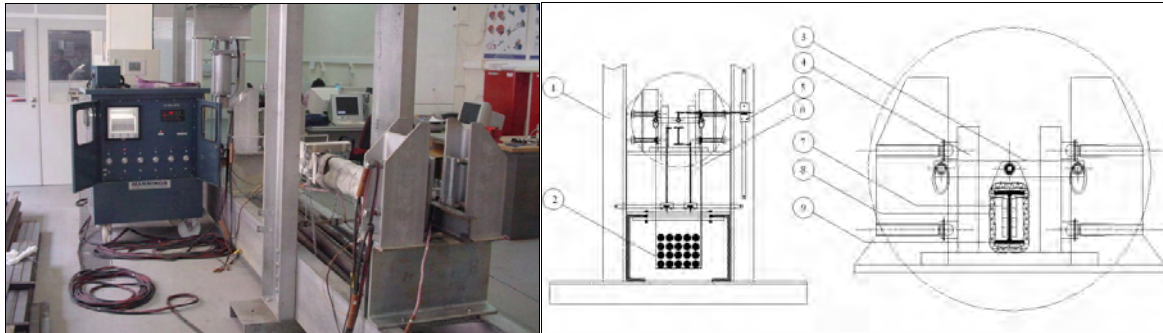


Figura 4. Sistemas para aplicação do efeito térmico e mecânico.

O “set-up” experimental foi idealizado para registar a leitura de deslocamentos (5,6) a meio vão e as temperaturas ao longo do comprimento da viga, simplesmente apoiada nos apoios (4).

A carga mecânica, correspondente ao grau de utilização desejado, foi mantida constante durante todos os ensaios efectuados, mantendo sempre a direcção vertical, por intermédio de um balancé (3) colocado na interface entre o banzo superior da viga e os pesos.

Todos os elementos de viga foram inspeccionados e a respectiva imperfeição geométrica inicial foi medida pelo método do feixe laser.

Para caracterização do material, foram efectuados 11 ensaios normalizados de resistência, de amostras extraídas da alma dos perfis, originando uma tensão de cedência $f_y = 293 [MPa]$ e um módulo de elasticidade igual a $E = 210 [GPa]$, ambos determinados à temperatura ambiente.

O carregamento mecânico em análise provoca um diagrama de momento flector, predominantemente triangular, apresentando-se na Tabela 1 os valores da cálculo do carregamento aplicado em cada elemento de viga, assim como os valores da temperatura crítica, calculada de acordo com o procedimento iterativo enunciado no secção 2.

Comprimento viga [m]	$q [N/m]$	$Q [N]$	$E_{f_i,d} = \frac{QL}{4} + \frac{qL^2}{8}$	EC3-1.2 [2]		Vila Real et al [5]	
				$\mu_0 = \frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}}$	$\theta_{a,cr} [^\circ C]$	$\mu_0 = \frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}}$	$\theta_{a,cr} [^\circ C]$
1,5	134,38	6086,12	2320,09	56 %	565,15	50 %	583,56
2,0	123,00	4315,52	2219,26	63 %	546,31	56 %	565,01
2,5	116,18	3043,06	1992,68	64 %	543,64	57 %	562,36
3,5	118,14	1521,53	1512,24	59 %	556,85	53 %	575,37
4,5	111,64	772,54	1151,69	53 %	575,48	47 %	593,86

Tabela 1. Carregamento aplicado (grau de utilização) e valor de cálculo da temperatura crítica.

O procedimento de ensaio utilizado em cada viga obrigou à imposição do valor determinado para a carga distribuída q (função do número de resistências utilizadas) e a imposição do valor da carga concentrada Q (função do grau de utilização previsto $\mu_0 \approx 60\%$). Depois do carregamento mecânico estabilizado, foi introduzido o carregamento térmico, com uma taxa de aquecimento igual a $800 [^\circ C/h]$. Este carregamento foi controlado por intermédio

de termopares localizados ao longo do comprimento da viga, para verificação da hipótese inicialmente considerada, temperatura constante em cada instante de tempo do ensaio.

3.1. Resultados experimentais

Para cada comprimento de viga foram registados os valores três tipos de deslocamentos a meio vão: deslocamento vertical (DV), deslocamento lateral do banzo superior (DLT) e deslocamento lateral do banzo inferior (DLB). A variação típica deste tipo de deslocamentos encontra-se representada na Figura 5.

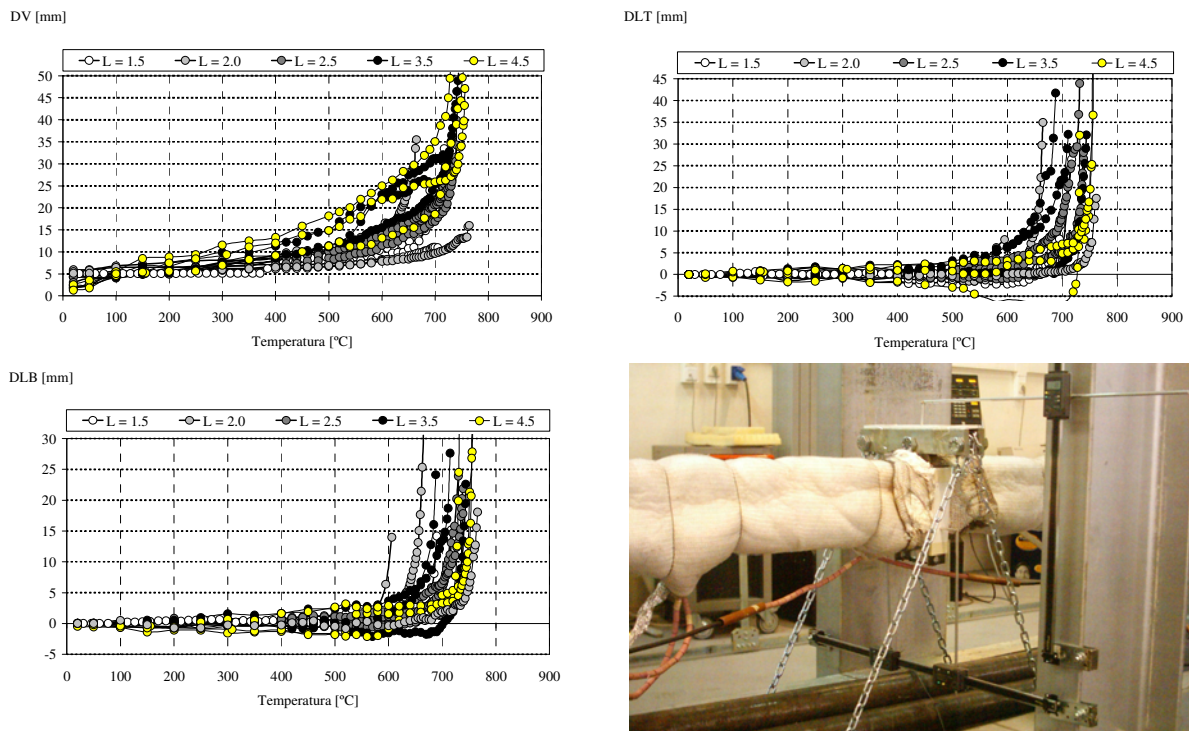


Figura 5. Resultados experimentais para determinação da temperatura crítica.

As medições dos deslocamentos foram efectuadas com régua digital, com uma precisão de 0.01 [mm]. O carregamento mecânico foi previamente aferido com uma balança de precisão igual a 1 [N].

Os ensaios foram continuados até não ser possível efectuar mais medições, devido às dimensões laterais do pórtico de reacção. Os valores de deslocamento máximo vertical para o último instante registado são inferiores aos valores de referência baseados no rácio de deslocamento $L/20$, no entanto, todos os ensaios evidenciam que o último instante registado se aproxima do estado limite último de instabilidade.

4. RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

A análise numérica que se apresenta foi baseada na teoria de grandes deslocamentos e nos modelos de comportamento material não linear, utilizando o programa de elementos finitos ANSYS. Os elementos de viga foram criados com elementos de casca, sendo a respectiva secção modelada a partir da superfície média do perfil.

4.1. Modelo numérico

O elemento escolhido, SHELL 181, possui seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações, sendo adequado para simular estruturas planas, empenadas, finas ou moderadamente espessas. As funções de forma são lineares no plano da casca, apresentando dois pontos de integração em cada direcção e cinco pontos na espessura do elemento para cada coordenada local.

A relação tensão deformação elasto-elíptico-plástico teve em consideração o valor da tensão de cedência medido experimentalmente e as expressões apresentadas em [2], ver Figura 6.

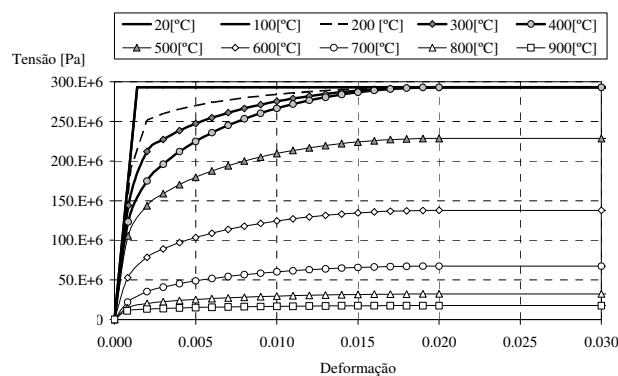


Figura 6. Modelo da relação tensão-deformação para o aço S235.

O módulo de elasticidade varia com a temperatura de acordo com as relações previstas no Eurocódigo 3 [2].

Todos os elementos estruturais apresentam imperfeições geométricas e materiais devido ao processo de fabrico, transporte e armazenamento. Tanto as imperfeições geométricas como as tensões residuais foram consideradas, de acordo com os respectivos valores e distribuições. Os valores utilizados para a imperfeição lateral corresponderam a uma variação sinusoidal de amplitude máxima igual a $L/1000$. Foi assumida uma distribuição bi-triangular para as tensões residuais, assumindo um valor máximo de 30% relativamente à tensão de cedência, de acordo com o modelo representado na Figura 7.

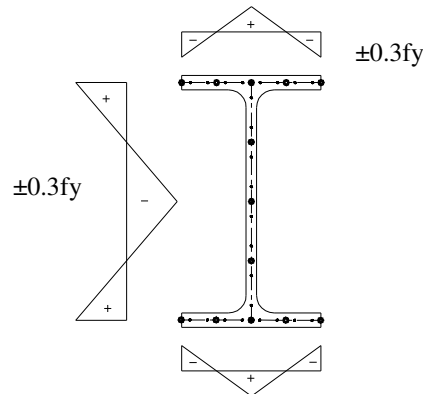


Figura 7. Modelo de tensões residuais utilizado para o aço S235.

O modelo geométrico foi discretizado com quatro elementos nos banzos e outros tantos na alma do perfil. Os apoios de forquilha foram modelados com deslocamentos laterais e verticais nulos, permitindo o empenamento da secção do elemento.

A carga concentrada foi aplicada a uma distância do banzo superior igual a 0.105 [m]. Este afastamento está relacionado com o efeito do balancé utilizado nos ensaios experimentais. Para tal, foi utilizado um elemento de viga com elevada rigidez (Beam188).

Um procedimento numérico de temperatura incremental e iterativo foi aplicado nos nós do modelo, com uma taxa de aquecimento equivalente a 800 [°C/h]. A distribuição de temperatura foi assumida constante ao longo de todo o comprimento da viga e da secção transversal.

4.2. Resultados numéricos

A temperatura crítica foi determinada para cada simulação através do último incremento de temperatura, para o qual foi possível manter o equilíbrio do elemento estrutural. Os resultados numéricos estão representados nos gráficos da Figura 8.

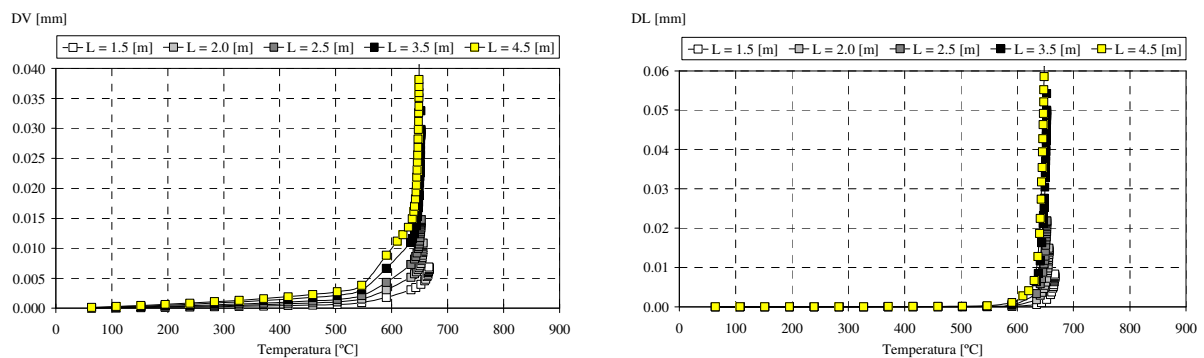


Figura 8. Resultados numéricos para determinação da temperatura crítica.

Tanto o deslocamento vertical como o deslocamento lateral foram extraídos dos resultados nodais, correspondentes ao centróide da secção recta, posicionado a meio vão da viga.

4.3. Influência do grau de utilização na determinação da temperatura crítica

Com o objectivo de verificar o comportamento dos elementos de viga em função do nível de carregamento, foram efectuadas várias simulações para o mesmo tipo de carregamento, fazendo variar o valor da carga concentrada Q , posicionada directamente no banzo superior. No gráfico da Figura 9 estão representados os resultados das temperaturas críticas obtidas em função do grau de utilização.

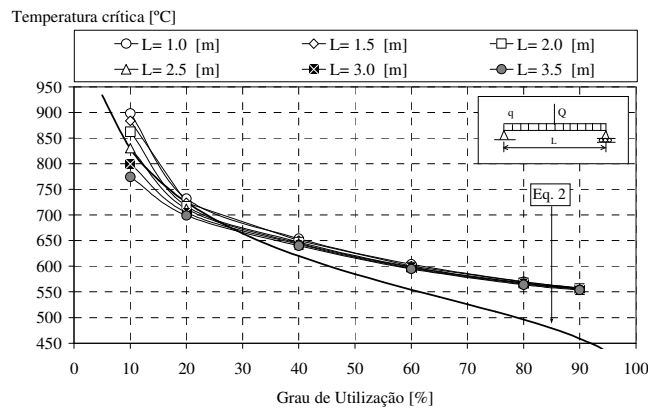


Figura 9. Influência do grau de utilização na temperatura crítica. Resultados numéricos.

Para baixos valores do grau de utilização, alguns resultados numéricos posicionam-se abaixo da curva correspondente à Equação 2 da referência [2]. Para valores do grau de utilização acima dos 30%, a temperatura crítica obtida pelos resultados numéricos é sempre superior a esta última, nunca atingindo valores inferiores a 550 [°C].

Para baixos valores do grau de utilização, a temperatura crítica obtida numericamente, varia com o comprimento de viga. Este efeito diminui para valores elevados do grau de utilização, embora se tenha sempre obtido valores de temperatura crítica superiores para comprimentos de viga mais pequenos.

5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Com o objectivo de comparar os valores da temperatura crítica, apresentam-se, no gráfico da Figura 10, os resultados numéricos e experimentais da variação desta com o comprimento do elemento de viga. É ainda apresentado o valor da temperatura crítica obtida pelo método simplificado do Eurocódigo na formulação da referência [1] e da referência [5].

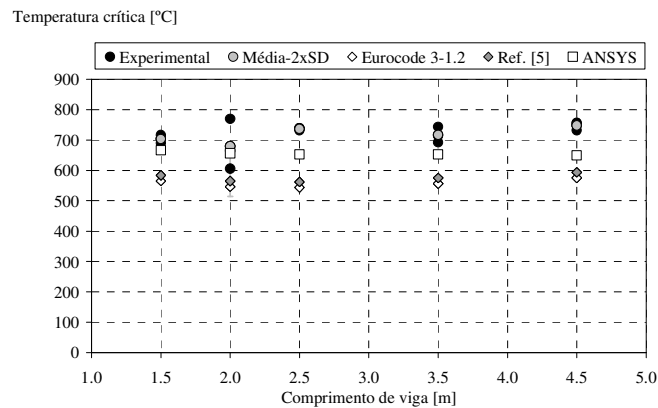


Figura 10. Comparação dos valores determinados para a temperatura crítica.

Conforme se pode observar, os resultados numéricos posicionam-se entre os valores determinados experimentalmente e os obtidos pelo método simplificado. Em relação a este último, é de salientar o facto de que para o tipo de carregamento utilizado, que origina um diagrama de momentos flectores predominantemente triangular, deverá ser utilizada a formulação da referência [5].

Os resultados experimentais da temperatura crítica são superiores a todos os outros. Esta diferença poderá ser explicada pelo eventual deficiente isolamento aplicado na viga, junto dos apoios e de algum constrangimento adicional nos mesmos, não previsto no modelo numérico.

6. CONCLUSÕES

A temperatura crítica foi determinada para vários comprimentos de viga, tanto experimentalmente como numericamente. Os elementos de viga foram ensaiados com um carregamento mecânico constante e posteriormente submetidos a um aumento de temperatura, que se aproxima de uma acção típica de acidente tipo fogo.

Para cada conjunto de ensaios experimentais, os resultados apresentam pouca dispersão. Ambos os resultados numéricos e experimentais proporcionam valores superiores de temperatura crítica, quando comparados com as formulações simplificadas [2] e [5].

Foram apresentadas justificações para os resultados mais elevados da temperatura crítica dos ensaios experimentais, relacionadas com as condições dos apoios e do aquecimento dos elementos de viga.

REFERÊNCIAS

- [1] Vila Real, P.M.M.; *Incêndio em estruturas metálicas*, Edições Orion, ISBN972-8620-04-7, Novembro 2003.
- [2] CEN prEN 1993-1-2; *Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*; April, 2003, stage 49 draft.
- [3] Piloto, P.A.G., Vila Real, P.M.M, *Lateral torsional buckling of steel I-beams in case of fire – experimental evaluation*, Proceedings of the first international workshop on structures in fire, Copenhagen, Denmark, p.99-105, 2000.

- [4] Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.J.M.M.; *Experimental and numerical research on the critical temperature of laterally unrestrained steel I beams*, artigo aceite para publicação na revista Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, 2005.
- [5] Vila Real, P. M. M.; Lopes, N.; Silva, L. S.; Franssen, J.-M.; *Lateral torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal*; Computer & Structures, vol. 82, pp. 1737, 1744; 2004.