

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ENCURVADURA LATERAL TORSIONAL DE VIGAS COM REFORÇOS TRANSVERSAIS

Paulo Piloto, CENUME-IDMEC, Instituto Politécnico de Bragança (ppiloto@ipb.pt)

Luís M. Ribeiro Mesquita, Instituto Politécnico de Bragança (imesquita@ipb.pt)

Paulo J. M. M. Vila Real, CENUME-IDMEC, Universidade de Aveiro (pyreal@civil.ua.pt)

Mário A. P. Vaz, LOME, Faculdade de Engenharia da U. Porto (gnavaz@fe.up.pt)

RESUMO

O fenómeno de instabilidade estrutural associado a elementos de estrutura tipo viga, pode ocorrer no domínio elástico e plástico do material. Normalmente associado a grandes deslocamentos da estrutura, este fenómeno pode ser controlado através da divisão da alma do perfil em painéis com reforços transversais, aumentando a resistência à encurvadura lateral. Embora represente um custo acrescido de mão de obra, estes reforços aumentam a rigidez à torção e à flexão. Na prática, o efeito relativo do reforço no momento de segunda ordem é desprezável, sendo significativo o efeito relativo no valor da constante de torção. A posição dos reforços condiciona a resistência à instabilidade deste tipo de elementos, sendo tanto mais efectiva, quanto mais próximo o reforço se encontrar das extremidades do apoio do elemento estrutural.

Serão apresentados resultados experimentais dos ensaios efectuados à escala real sobre perfis comerciais do tipo IPE100, aço S275 JR, submetidos a estados de flexão pura no plano da alma, com vários reforços espaçados ao longo do vão do elemento.

1 – INTRODUÇÃO

A utilização de reforços transversais em elementos de viga aumenta a resistência à encurvadura lateral torsional, como consequência do aumento da rigidez à torção e à flexão. Este efeito depende do número, da posição e das características geométricas dos reforços, tornando-se mais efectivo, quanto mais próximo dos apoios se colocarem.

Os reforços utilizados nos ensaios foram maquinados a partir de perfis do mesmo tipo de material, com duas espessuras diferentes, em função dos dois locais de extracção do reforço, alma e banzo. Estes elementos auxiliares foram soldados dos dois lados, na alma e banzos de cada perfil, através de um processo MAG.

Os ensaios experimentais de elementos de viga reforçados foram efectuados num pórtico de reacção, com duas cargas concentradas e dois apoios de forquilha, conforme se representa na figura 1.

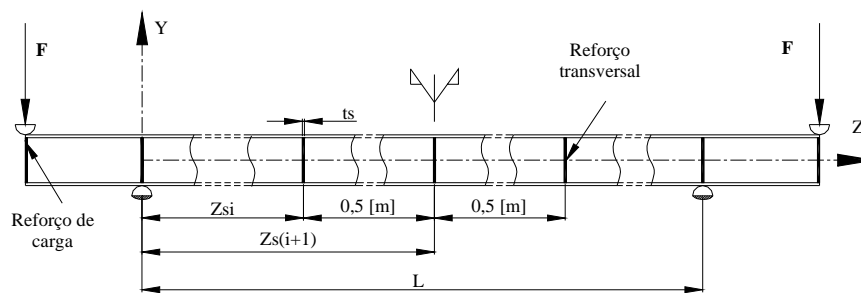


Figura 1 – Modelo do ensaio realizado nas vigas reforçadas.

O método experimental utilizado recorre a um processo de carregamento hidráulico, incremental, com medição dos deslocamentos da secção recta a meio vão. Foi efectuada a medição da imperfeição geométrica da viga pelo método do feixe laser, e caracterizadas as tensões residuais instaladas nos perfis.

O material foi caracterizado mecanicamente, tendo sido efectuados vários ensaios de resistência num equipamento electro-mecânico, de acordo com a norma Portuguesa NP EN 10002-1.

Este trabalho complementa um estudo numérico não linear geométrico e material, (Piloto *et al*, 2003), realizado com elementos finitos de casca. Os resultados apresentam uma concordância evolutiva para os casos com reforços de carga e para os casos com “i” reforços a meio vão, “C0” e “Ci” respectivamente.

2 - INSTABILIDADE LATERAL DOS PERFIS – ESTUDO ANALÍTICO

O fenómeno de instabilidade lateral em vigas pode ocorrer quando este tipo de elemento estrutural não possui qualquer tipo de restrição ao movimento lateral u , nem apresenta constrangimento para a rotação da secção ϕ . Devido à menor rigidez de torção e flexão em relação ao eixo menos resistente, a viga pode apresentar um comportamento semelhante ao representado na figura 2.

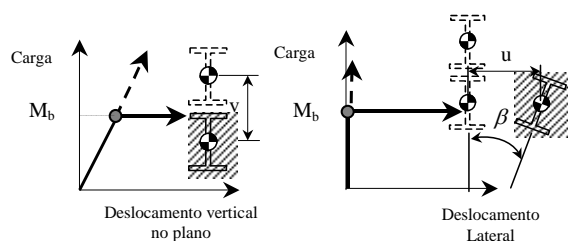


Figura 2 - Flexão no plano da alma, seguida por movimento lateral torsional.

A encurvadura lateral torsional (ELT) deverá ser um estado limite último a considerar no projecto de estruturas metálicas, uma vez que poderá diminuir a capacidade de carga prevista para o elemento em causa. Este fenómeno poderá ser minimizado com a utilização de elementos de reforço transversal e longitudinal, elementos auxiliares de apoio intermédio ou elementos estruturais de maiores dimensões que contribuam para um aumento da rigidez à flexão e torção, permitindo incrementar a capacidade de carga para este estado limite, evitando o colapso prematuro, Galambos (1998), Kollár (1999) e Bazant *et al* (1991).

O elemento estrutural apresentado e o respectivo carregamento, deverão obedecer à lei da conservação da energia, enquanto este elemento se deforma, desde a posição inicial de equilíbrio neutro para a nova posição de equilíbrio, encurvada.

Como este tipo de elementos estruturais se deformam de uma forma quase estática, o aumento da energia de deformação armazenada no elemento é também acompanhada por uma diminuição de energia potencial originada pelo carregamento.

A substituição de uma solução harmónica na expressão da energia, que verifique as condições limites e as equações diferenciais de equilíbrio, origina um sistema homogéneo, que deverá ser resolvido pelos processos habituais, produzindo uma solução para o valor do momento crítico, CEN ENV (1992), que resulta:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{y1}}{(kL)^2} \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_{y1}} + \frac{(kL)^2 GJ_1}{\pi^2 EI_{y1}}} \quad (1)$$

Nesta expressão, k representa o valor do factor de comprimento efectivo, enquanto k_w representa o valor do factor de empenamento nas extremidades da viga.

Os reforços transversais utilizados nos perfis, apresentam uma configuração semelhante à representação esquemática apresentada na figura 3.

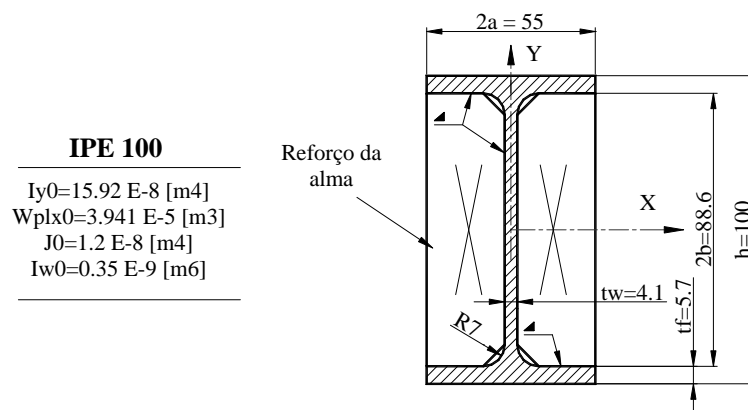


Figura 3 – Modelo de reforço utilizado na alma.

Os valores a adoptar para o momentos de segunda ordem e para o valor da constante de torção, deverão ser determinados pelas expressões propostas por Takabatake (1988), que resultam da substituição da função Dirac por expansão em séries de potência. Segundo o mesmo autor, trata-se de uma série de convergência rápida, sendo apenas necessário a utilização do primeiro termo, para o nível de precisão necessária dos casos práticos.

$$I_{y1} = I_{y0} + \frac{2}{L} \sum_{i=1}^s I_{ys} t_s \text{Sin}^2\left(\frac{\pi z_{si}}{L}\right) \quad (2)$$

$$J_1 = J_0 + \frac{2}{L} \sum_{i=1}^s J_s t_s \text{Cos}^2\left(\frac{\pi z_{si}}{L}\right) \quad (3)$$

As últimas parcelas representam o efeito dos reforços na alma. No caso do efeito destes reforços ser desprezado, o valor do momento de segunda ordem e da constante de torção tendem para os valores iniciais do perfil. O efeito destes reforços na constante de torção é mais significativo do que o efeito produzido no momento de segunda ordem, sendo o fenómeno de instabilidade governado pelo valor da função $\text{cos}^2(\pi z/L)$ apresentado na equação 3. O posicionamento destes elementos próximo dos apoios faz aumentar o valor da resistência

à encurvadura, devido ao aumento local do constrangimento à rotação das extremidades dos perfis, como se pode verificar pela evolução da função na figura 4.

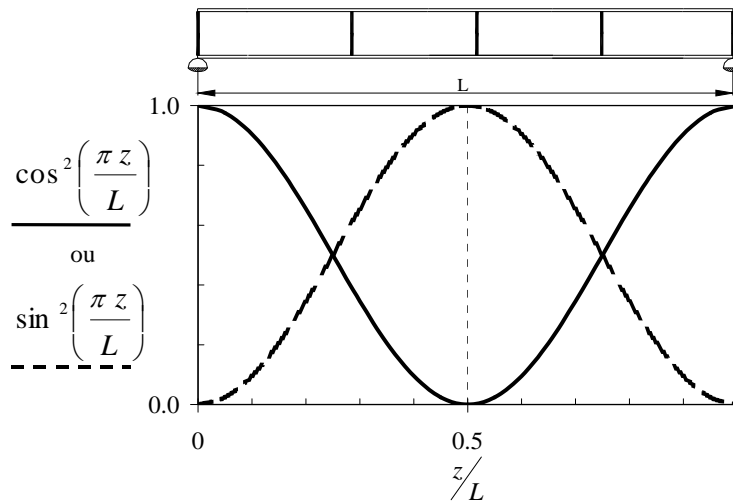


Figura 4 – Valores de $\cos^2(\pi z/L)$ e $\sin^2(\pi z/L)$.

Os valores calculados das constantes físicas dos perfis reforçados, utilizados em cada um dos ensaios, encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 – Valores das constantes físicas dos perfis com reforços.

Espessura reforço [mm]	L [m]			I_1/I_0	J_1/J_0
	1.5	2.5	3.5		
4.1	C0			1.00	1.00
5.7				1.00	1.00
4.1	C3	C5	C7	1.06	3.48
5.7				1.09	4.45

De acordo com as expressões apresentadas, verifica-se um aumento pouco significativo na valor do momento de segunda ordem, em contraste com o aumento do valor da constante de torção. O aumento da espessura do reforço incrementa o valor das constantes em causa.

3 – CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO INICIAL DOS PERFIS

Os perfis IPE 100 em material S275 JR foram seccionados nos laboratórios do Instituto Politécnico de Bragança e caracterizados em função da respectiva imperfeição inicial, tensões residuais e do valor da sua resistência. Todas as características enunciadas foram medidas antes de se efectuar o processo de ligação dos reforços, com a excepção das imperfeições iniciais.

3.1 - Imperfeições iniciais

As vigas em ensaio apresentam diferentes esbeltezas adimensionais, tendo sido geometricamente verificadas por forma a determinar a variação da curvatura do perfil. As

vigas com dimensões de menor comprimento foram controladas em três locais diferentes, enquanto que para vigas de dimensões superiores, foram feitos cinco pontos de controlo.

A curvatura longitudinal que os perfis apresentam, resultam normalmente, do processo de fabrico, manuseamento e transporte. Os resultados das medições efectuadas permitem concluir que as imperfeições iniciais possam ser caracterizadas com uma função harmónica, (Camotim, 2002). Os resultados destas medições foram obtidos com uma precisão de 0.5 [mm].

$$u(z) = \frac{L}{1000} \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{L}\right) \quad (4)$$

Para verificar a amplitude da imperfeição, foi utilizado um sistema baseado num feixe laser de 1 mW – classe 2 (DIN EN60825-1), conforme se representa na figura 5.



a) Posicionamento do laser.



b) Medição com graduação de uma braço magnético.

Figura 5 – Colocação do feixe laser no pórtico e desvio do perfil em relação ao feixe.

Este conjunto de equipamento recorre a um braço magnético, com uma régua na extremidade, que deverá ser colocado nos pontos de controlo, registando o desvio relativo ao feixe. O laser foi colocado no alinhamento do perfil.

3.2 – Tensões residuais

A amplitude e a distribuição das tensões residuais na secção recta dos perfis pode variar com a geometria e com os processos de fabrico a que estão submetidos. A distribuição idealizada encontra-se representada na figura 6 e será utilizada como referência para medições pontuais na secção recta.



Figure 6 – Tensões residuais – Distribuição teórica e origem (ESDEP, 1999).

As tensões residuais introduzidas no elemento estrutural podem resultar do processo de fabrico, transporte e de outras condições de processamento. Como resultado de um processo de arrefecimento não uniforme, o local de intersecção da alma com os banzos, contrairá depois das outras zonas da secção, ocorrendo um escoamento plástico induzido.

Um dos processos utilizados na determinação destas tensões é o método do furo (ASTM, 2002). A utilização de rosetas de extensómetros especiais, ver figura 7, é necessária para este processo, assim como a utilização de uma ferramenta para efectuar uma interferência mecânica. O furo de 1.5 [mm] a efectuar deverá ser aplicado progressivamente, mantendo o distúrbio tão pequeno quanto possível. Este processo pode ser considerado uma técnica não destrutiva (Hoffman, 1989) ou semi-destrutiva, uma vez que o dano causado é muito localizado e em muitos casos não afecta a utilização da zona de amostragem do perfil em serviço, (ASTM, 2002).

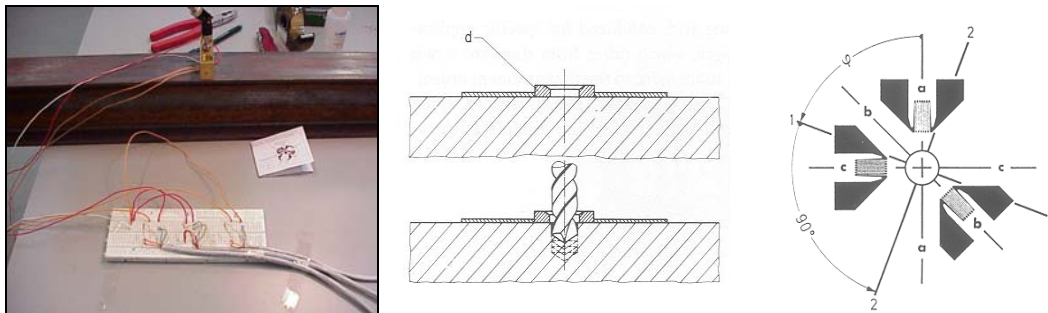


Figura 7 - Equipamento para medição de tensões residuais com rosetas HBM RY61.

Foram efectuadas duas medições na zona de intersecção da alma com o banzo do perfil. As tensões residuais foram determinadas a partir da medição experimental das deformações $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$ e $\Delta\epsilon_c$, bem como da utilização de expressões derivadas da teoria da elasticidade, para o local previsto de valor máximo de tensão. Foram utilizadas rosetas tipo A, de acordo com a norma (ASTM, 2002), com as seguintes características: $a = 0.75$ [mm], $r_i = 1.8$ [mm], $r_a = 3.3$ [mm]. As tensões principais e as direcções principais de tensão, “1” e “2”, podem ser calculadas através das expressões 5, utilizando os resultados das medições efectuadas.

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2\Delta\epsilon_b}{\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a}\right); \sigma_{1,2} = -\frac{E}{4A}(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c) \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2\Delta\epsilon_b)^2 + (\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a)^2} \quad (5)$$

Os resultados determinados, ver tabela 2, demonstram que as direcções principais de tensão, no ponto considerado, estão alinhadas com a direcção do perfil, como esperado.

Tabela 2: Tensões residuais e direcções principais.

Amostra	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	φ	σ_C [MPa]
Teste 1	165,0	96,7	100	162,9
Teste 2	191,0	121,0	109	183,6

A tensão σ_c , representa o estado de tensão no ponto médio do banzo, no alinhamento do perfil. Tensões de sinal contrário deverão ser encontradas nas extremidades dos banzos, de acordo com a distribuição apresentada.

A presença destas tensões afecta o valor da resistência do elemento à encurvadura lateral, especialmente devido à presença de tensões de compressão, (Vila Real *et al*, 2002). Os

resultados numéricos obtidos por processos de análise não linear geométrica e material confirmam a menor resistência deste tipo de elementos à encurvadura lateral.

3.3 – Caracterização mecânica do material

O processo utilizado para determinação da tensões características do material esteve de acordo com a norma Portuguesa NP EN 10002-1, (CT12, 1990). As amostras foram retiradas aleatoriamente da alma dos perfis maquinados, tendo em consideração a geometria apropriada. As amostras foram ensaiadas numa máquina de ensaios universal INSTRON 4885, com um sistema de aquisição de dados GPIB. Os resultados das tensões medidas encontram-se resumidos na tabela 3, onde R_m representa a tensão de rutura, enquanto que R_{eH} e R_{eL} se referem ao valor máximo e mínimo da tensão de cedência.

Tabela 3: Ensaio de tracção à temperatura ambiente.

Teste	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_t [%]
1	492	499	575	492	34.5
2	511	493	592	507	33.5
3	507	498	580	505	35.0
4	525	508	597	518	28.9
Média ± D.P.	509± 14	500± 6	586± 10	506± 11	33.0± 2.8

4 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados em 12 perfis IPE 100 com comprimentos variáveis de 1.5 [m], 2.5 [m], 3.5 [m] e com duas espessuras de reforços diferentes: 4.1 [mm] e 5.7 [mm]. Na tabela 4, N.R. representa o número de reforços entre apoios.

Tabela 4: Características dos ensaios.

Espessura reforço [mm]	L=1.5 [m]		L=2.5 [m]		L=3.5 [m]	
	N.R.	Caso	N.R.	Caso	N.R.	Caso
4.1	0	C0-TH41-L15	0	C0-TH41-L25	0	C0-TH41-L35
5.7	0	C0-TH57-L15	0	C0-TH57-L25	0	C0-TH57-L35
4.1	3	C3-TH41-L15	5	C5-TH41-L25	7	C7-TH41-L35
5.7	3	C3-TH57-L15	5	C5-TH57-L25	7	C7-TH57-L35

Os ensaios foram efectuados de acordo com o modelo apresentado na figura 1, utilizando apoios de forquilha e dois cilindros hidráulicos, representativos do efeito de carga nas extremidades, produzindo uma distribuição de momento flector uniforme entre apoios, ver figura 8.



Caso C7-L35-TH57.



Caso C0-L35-TH57.

Figura 8 – Comportamento de vigas com e sem reforços entre apoios.

4.1 – Preparação dos ensaios

Os perfis reforçados foram preparados com chapas do mesmo tipo de material, S275 JR, retirados, por maquinagem, da alma e dos banzos dos perfis. Estas duas origens determinaram os dois tipos de espessuras consideradas.

O processo de reforço foi efectuado por soldadura MAG das chapas nos banzos e nas almas dos perfis, conforme se representa na figura 9.



Figura 9 – Processo de ligação do reforço.

As chapas foram maquinadas com um chanfro a 45° na zona de ligação da alma com o banzo, minimizando a concentração de tensões induzidas pelo processo.

A carga incremental foi aplicada na extremidade através de uma interface mecânica, tornando o carregamento aplicado sobre uma linha do banzo superior, localizada a 0.23 [m] dos apoios.

4.1 – Medições experimentais

As medições dos deslocamentos efectuadas a meio vão, permitiram determinar o comportamento da secção e dos perfis, no processo de instabilidade criado, através do registo

incremental da carga, medido por duas células interpostas entre os cilindros e os perfis. A medição dos deslocamentos foi efectuada em três locais com comparadores de relógio, conforme se representa na figura 10.

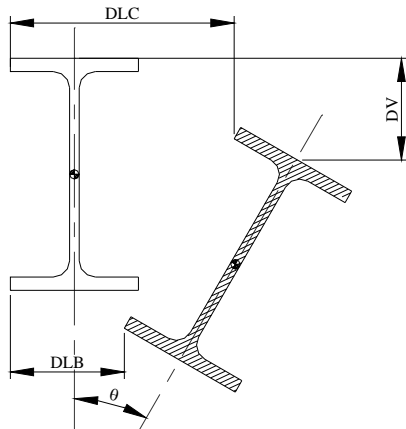
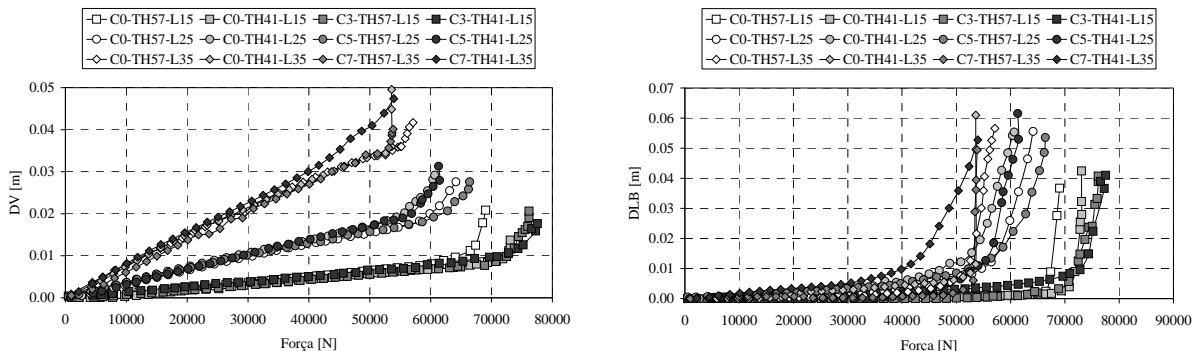


Figura 10 – Medição dos deslocamentos a meio vão.

A força foi incrementada com valores constantes de 2000 [N], permitindo obter o registo dos deslocamentos em função do incremento do momento de flexão criado, conforme se representa na figura seguinte. O último incremento de carga foi utilizado para determinar o momento resistente à encurvadura lateral.



a) Deslocamento vertical (DV) a meio vão.

b) Deslocamento lateral no banzo inferior (DLB) a meio vão.

Figura 11 – Valores de deslocamentos medidos a meio vão nas vigas ensaiadas.

Os resultados obtidos experimentalmente demonstram um comportamento semelhante ao previsto na figura 2 e ainda que o momento resistente à encurvadura das vigas reforçadas aumenta com o número de reforços e com a espessura dos mesmos.

4.3 - Resultados experimentais

Os resultados experimentais foram comparados com a solução proposta no Eurocódigo 3, (CEN ENV, 1992), tendo-se verificado que o momento resistente à encurvadura aumenta significativamente com os reforços utilizados.

Na figura 12 está representada a curva de projecto de resistência à encurvadura lateral torsional, o valor do momento resistente obtido no domínio elástico e os valores obtidos experimentalmente em função da esbelteza adimensional.

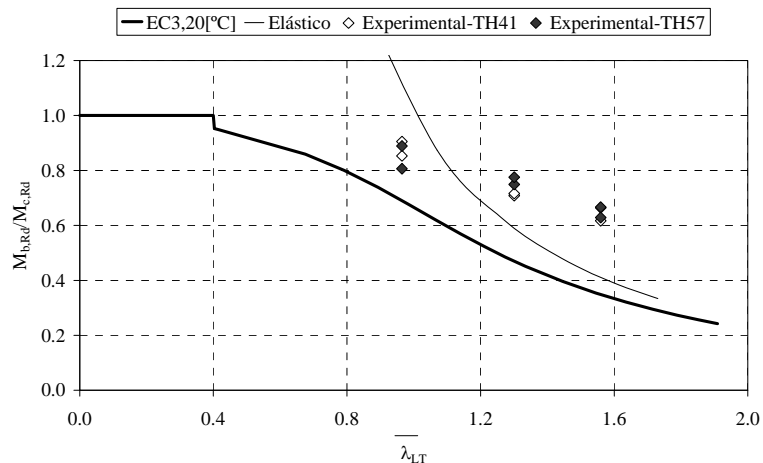


Figura 11 – Momento resistente à encurvadura lateral e função da esbelteza adimensional.

Para cada comprimento de viga ensaiado, foram identificados os valores experimentais obtidos com espessuras diferentes, TH41 (4.1 [mm]) e TH57 (5.7 [mm]) e representado o valor do quociente entre o momento resistente à encurvadura e o valor do momento plástico da secção.

Os ensaios das vigas menos esbeltas demonstraram a existência de deformações plásticas permanentes, confirmando o respectivo posicionamento no gráfico.

5 - CONCLUSÕES

A encurvadura lateral de vigas reforçadas transversalmente com placas de aço soldadas nos banzos e na alma foi apresentada analiticamente através de uma função de Dirac com o objectivo de caracterizar o efeito do reforço nas constantes geométricas da viga.

A expressão do momento crítico para vigas com reforços proposta, apresenta a mesma forma da expressão original sem reforços, verificando-se uma alteração na constante de torção e no momento de segunda ordem. Foi demonstrado que o efeito dos reforços no momento de segunda ordem pode ser desprezado, embora o efeito produzido pelo aumento da constante de torção faça diminuir significativamente a rotação da secção do perfil.

A resistência à encurvadura lateral das vigas reforçadas transversalmente aumenta com o número de reforços, à semelhança dos resultados numéricos, devendo este efeito ser ampliado no caso da utilização de perfis de gama superior ou de banzos mais largos.

A localização dos reforços condiciona o valor do momento resistente, sendo de prever um aumento significativo aquando da utilização destes elementos de reforço na proximidade dos apoios e dos locais de aplicação de esforços.

Deverão ser efectuados mais ensaios com reforços noutras posições e para gamas de perfis de outras dimensões.

8 - REFERÊNCIAS

ASTM – Committee E28.13; “Standard Test Method for determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method”; E837-01; USA; January 2002.

Bazant, Zdenek P.; Luigi Dedolin; “Stability of structures –Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage theories”; 1991.

Camotim, Dinar; Reis António; “Estabilidade estrutural”; McGraw-Hill; Portugal; Outubro, 2000.

CEN ENV 1993-1-1; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”; April 1992.

CT12 – Instituto Português da Qualidade; Norma Portuguesa NP EN 10002-1 – Materiais metálicos – Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio (à temperatura ambiente); Novembro 1990.

ESDEP Society; “European Steel Design Education Programme”; UK; CD-Rom version; 1999.

Galambos T.V.; “ Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures”; 5th edition; John Wiley & Sons; USA; 1998.

Hoffman Karl; “An introduction to measurements using strain gages”; HBM publisher; Germany; 1989.

Kollár, Lajos; “Structural Stability in Engineering Practice”; E&FN SPON; New York; 1999.

Piloto, P.A.G.; Mesquita, L.M.R.; Ribeiro, P.J.; Vaz, M.A.P.; Vila Real, P.J.M.M.; “Estudo Numérico e Experimental da Encurvadura Lateral Torsional de Perfis IPE com e sem Reforços Transversais na Alma”; artigo a apresentar no VII Congresso de Mecânica Aplicada; APMTAC; Évora, 14 a 16 de Abril, 2003.

Takabatake, Hideo; “Lateral Buckling of I beams with web stiffeners and batten plates”; Int. Journal Solids Structures, vol. 24, nº 10, pp. 1003-1019; Pergamon Press; 1988.

Vila Real, P.M.M.; Cazeli, Ronisi; Silva L.; Santiago, A.; Piloto, P.A.G.; “The effect of residual stresses in lateral-torsional buckling of steel beams at elevated temperatures”; proceedings of the third European Conference on Steel Structures - EUROSTEEL, Volume II, pp. 1437-1448, ISBN 972-98376-3-5; 19-20 September 2002, Coimbra, Portugal.