

VI Congresso



Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional

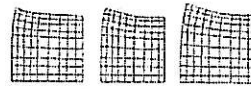
Volume 2

Paulo M. M. Vila Real
José J. Grácio



UNIVERSIDADE de AVEIRO

VI Congresso



Nacional de Mecânica Aplicada
e Computacional

Aveiro,
17 a 19 de Abril de 2000

UNIVERSIDADE de AVEIRO



Secção Autónoma de Engenharia Civil
Secção Autónoma de Engenharia Mecânica
Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional

VI Congresso
Nacional de Mecânica Aplicada
e Computacional Aveiro,
17 a 19 de Abril de 2000

Programa

UNIVERSIDADE de AVEIRO



Ficha Técnica • Technical Information

Título

VI MECÂNICA APLICADA E COMPUTACIONAL — I

Coordenadores Científicos • Editors

PAULO M. M. VILA REAL

JOSÉ J. GRÁCIO

Concepção Gráfica da Capa



078/2000

Impressão

TIPAVE, INDÚSTRIAS GRÁFICAS DE AVEIRO

Edição • Published by

UNIVERSIDADE DE AVEIRO

CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SANTIAGO

3810-193 AVEIRO

1.ª Edição

ABRIL DE 2000

Depósito Legal • Legal Deposit n.º 150522/00

ISBN

972-8021-61-5 — Universidade de Aveiro

Secretariado

c/o Prof. Paulo Vila Real
Universidade de Aveiro
Secção Autónoma de Engenharia Civil
3810 AVEIRO
tel: 234 37 00 49 fax: 234 370094 email: pvreal@civil.ua.pt

Áreas

Mecânica dos Sólidos
Mecânica dos Fluidos
Matemática Aplicada à Mecânica

Conferencistas Convidados

Prof. Robert Taylor (University of California, Berkeley, USA)
Prof. J. A. Teixeira de Freitas (Instituto Superior Técnico, Portugal)
Prof. Eugenio Oñate (Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha)
Prof. Nigel P. Weatherill (University of Wales, Swansea, UK)
Prof. Antonio Huerta (Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha)

Apoios

Universidade de Aveiro
FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FLAD – Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento
BPI – Banco Português do Investimento
Câmara Municipal de Aveiro

O VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional decorrerá na Universidade de Aveiro de 17 a 19 de Abril de 2000.

Este Congresso, que surge na sequência dos anteriores Encontros Nacionais de Mecânica Computacional e dentro da periodicidade habitual, veio alargar, como o próprio nome sugere, o leque de temas admitidos para apresentação. Por outro lado, o êxito crescente obtido nas sucessivas edições, assim como a melhoria da qualidade e a variedade dos trabalhos apresentados, para além de constituir uma mostra importante do grau de maturidade que a comunidade científica portuguesa atingiu, fez com que a Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional passasse a adoptar, a partir desta edição, a designação de Congresso em vez de Encontro. Entrou-se assim numa nova fase que estamos certos, a comunidade científica nacional e internacional saberá corresponder com o seu contributo, o seu interesse e seu acolhimento, como as presentes actas testemunham.

Na tradição das edições anteriores, o principal objectivo deste VI Congresso foi promover a reunião de grupos de investigação e outros técnicos que desenvolvem a sua actividade no âmbito da Mecânica, e divulgar a actividade científica e técnica nesta área.

O conteúdo das comunicações é amplo e reflecte a grande actividade que se desenvolve em Portugal no domínio teórico, experimental e numérico da Mecânica sendo de destacar a presença de especialistas de prestígio internacional, que participam nas conferências plenárias do Congresso.

Finalmente a organização agradece a todos os autores das comunicações o cuidado com que as elaboraram, bem como a sua contribuição para o êxito do Congresso.

Paulo M. M. Vila Real
José A. Grácio

Universidade de Aveiro, Abril de 2000

Comissão Organizadora

José A. Grácio (Presidente, UA)
Paulo M. M. Vila Real (Vice-Presidente, UA)
Carlos A. Pina (LNEC)
E. Oñate (UPC)
Filomena Dias d'Almeida (FEUP)
José César Sá (FEUP)
Paulo B. Lourenço (UM)
Raimundo Delgado (FEUP)

Comissão Científica

A. Cardoso (FEUP)	J. Barreiros Martins (UM)
A. Fortunato (LNEC)	J. Carlos Pereira (IST)
A. M. Sousa (UA)	J. Carlos Teixeira (UM)
A. Sarychev (UA)	J. Martins (IST)
A. Suleman (IST)	J. Teixeira de Freitas (IST)
A. Torres Marques (FEUP)	L. Adriano Oliveira (FCTUC)
C. A. Borrego (UA)	L. Braga Campos (IST)
C. A. Mota Soares (IST)	L. Cruz Simões (FCTUC)
C. Magalhães Oliveira (FEUP)	L. Ribeiro Sousa (LNEC)
C. Navarro (UCM)	L. Trabucho (FCUL)
E. Arantes e Oliveira (IST)	M. Azeredo (FEUP)
E. B. de Las Casas (UFMG)	M. Barata Marques (IST)
E. Vaz (UM)	M. Graça Carvalho (IST)
F. José Rodrigues (IST)	M. Matos Fernandes (FEUP)
F. Navarrina (ULC)	M. Seabra Pereira (IST)
F. Seabra Santos (FCTUC)	P. Martins (IST)
H. Pina (IST)	P. Oliveira (UBI)
I. Maria Figueiredo (FCTUC)	R. F. Martins (FEUP)
J. A. Figueiras (FEUP)	R. Leal (FCTUC)
J. A. Guemes (UPM)	R. M. Faria (FEUP)
	S. F. Teixeira (UM)
	V. H. Garcia (UPV)

Comissão Executiva

Paulo M. M. Vila Real (Coordenador, UA)
Alfredo B. Morais (UA)
Paulo B. Cachim (UA)

FCTUC: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, FCUL: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, FEUP: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, IST: Instituto Superior Técnico, LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, UA: Universidade de Aveiro, UBI: Universidade da Beira Interior, UCM: Universidad Carlos III de Madrid, UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais, ULC: Universidad de la Coruña, UM: Universidade do Minho, UPC: Universidad Politécnica de Cataluña, UPM: Universidad Politécnica de Madrid, UPV: Universidad Politécnica de Valencia

Local e Data

O Congresso decorrerá de 17 a 19 de Abril de 2000 no edifício das Secções Autónomas de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Secretariado

O secretariado do Congresso para registo dos participantes e informações estará localizado no hall do primeiro andar do edifício das Secções Autónomas de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica.

Formato do Congresso

O Congresso compreende cinco sessões plenárias, bem como, 9 sessões convidadas na área de Materiais Compósitos, Biomecânica, Conformação Plástica, Algoritmos Numéricos e Modelos de Análise de Estruturas de Betão e ainda 20 sessões de comunicações sendo catorze no domínio da Mecânica dos Sólidos, quatro no domínio da Mecânica dos Fluidos e duas no domínio da Matemática, num total de 166 comunicações. Haverá ainda um painel sobre a Utilização de Software Comercial no Ensino Universitário.

Preparação das Sessões

Os autores das comunicações terão à sua disposição uma divisão para preparar as suas apresentações. Os slides e/ou os ficheiros para PowerPoint deverão ser entregues ao responsável pela sala onde decorrerá a sessão na sessão anterior à mesma. As apresentações terão uma duração de 15 a 18 minutos, dependendo do número de comunicações em cada sessão.

VI Congresso

Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional

Aveiro,
17 a 19 de Abril de 2000

MODELAÇÃO PELO MEF DA ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS I METÁLICAS SUJEITAS A ELEVADAS TEMPERATURAS

Piloto, P. A. G.¹; Vila Real, P. M. M.²

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um elemento finito de viga 3D que permite a modelação do fenómeno de encurvadura lateral de vigas.

Calcula-se a resistência à encurvadura lateral de vigas I metálicas a elevadas temperaturas através da utilização de um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, especialmente desenvolvido para estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo. As imperfeições geométricas e as tensões residuais devidas ao processo de fabrico e ao armazenamento são avaliadas e tidas em conta nos cálculos efectuados.

Comparam-se os resultados numéricos obtidos para diferentes temperaturas com os valores que se obtêm tendo como base o modelo de cálculo simples apresentado na Parte 1-2 do Eurocódigo 3. Foi considerado um perfil IPE 220 em aço S235, um tipo de carregamento, e dez níveis de temperatura como solicitação térmica.

Este estudo permite mostrar que o Eurocódigo 3 dá resultados que não estão do lado segurança quando comparados com os resultados numéricos para uma gama alargada de esbeltezas adimensionais e para temperaturas superiores a 200 [°C].

1. INTRODUÇÃO

Embora o fenómeno da encurvadura lateral das vigas metálicas, à temperatura ambiente seja bem conhecido (Eurocode 3, 1989), o mesmo problema, quando as vigas estão sujeitas a temperaturas elevadas, encontra-se apresentado de uma forma indiferenciada relativamente às temperaturas máximas de solicitação.

Apresentam-se neste trabalho os primeiros resultados obtidos no âmbito de um projecto destinado a estudar o fenómeno da encurvadura lateral de vigas metálicas sujeitas às condições de incêndio.

Faz-se a comparação de resultados no cálculo da resistência à encurvadura lateral de vigas metálicas sujeitas a elevadas temperaturas, baseada em resultados numéricos obtidos

¹ Professor Adjunto, Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança

² Professor Associado, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

com o programa SAFIR (Jean-Marc Franssen, 1996), um código de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège, Bélgica, para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo e do qual se apresenta a descrição de um dos elementos finitos nele disponível. Trata-se do elemento finito de viga, tridimensional com 15 graus de liberdade.

A capacidade deste programa para simular a encurvadura lateral de vigas metálicas à temperatura ambiente foi demonstrada por Paulo Vila Real (1999), que comparou os resultados numéricos com os resultados obtidos com o Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1992).

Neste artigo é apresentado o estudo de uma viga simplesmente apoiada submetida a um momento flector constante. Os apoios de forquilha foram modelados por forma a satisfazer o constrangimento imposto e do qual a figura 1 é demonstrativa.

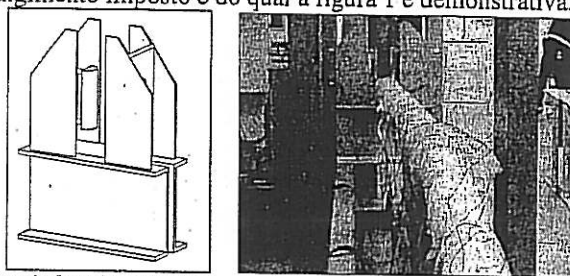


Fig. 1 – Apoios de forquilha nas vigas em estudo e carregamento em ensaio de perfis IPE100.

O procedimento a adoptar visa deixar estabilizar o efeito da temperatura na viga em teste, impondo a partir desse instante uma temperatura constante especificada. A partir desse momento é aplicada a solicitação mecânica até ao colapso da viga. São comparados os valores da resistência para cada temperatura com os obtidos com o Eurocódigo 3, parte 1-2 [5].

Considera-se ainda que a viga tem uma imperfeição geométrica inicial do tipo sinusoidal (D. Talamona et al, 1997, Jean-Marc Franssen, 1997-1998, Jean-Marc Franssen et al, 1995) e as tensões residuais são tomadas em consideração de acordo com a publicação do ECCS (1984) [13].

2. DESCRIÇÃO ANALÍTICA DO FENÓMENO DE ENCURVADURA LATERAL

De acordo com o Eurocódigo 3 parte 1-2 (1995), a temperatura da viga ao longo do tempo pode ser obtida através da equação de condução de calor simplificada. Conhecida a temperatura constante na secção, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t , $M_{b,fi,t,Rd}$, tendo em consideração a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ para valores superiores a 0.4 e para a temperatura máxima no banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t , deverá ser determinado a partir da equação seguinte:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} w_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

onde $\chi_{LT,fi}$ representa o factor de redução para a encurvadura lateral, em caso de situação de incêndio, $w_{pl,y}$ representa o módulo plástico da secção, $k_{y,\theta,com}$ traduz o efeito da variação da tensão de cedência à temperatura máxima da flange de compressão $\theta_{a,com}$ atingida no instante t (ver figura 2).

O factor de segurança parcial em caso de incêndio $\gamma_{M,fi}$ deverá ser igual a 1. A constante de 1.2 é um valor empírico utilizado como factor de correcção para representar um conjunto de efeitos.

O factor de redução para o caso da encurvadura lateral em situação de incêndio deverá ser determinado da mesma forma que à temperatura ambiente, ou seja:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (2)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2] \quad (3)$$

enquanto que a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$, agora calculada com o efeito da temperatura, $\theta_{a,com}$, deverá ser determinada pela expressão seguinte.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (4)$$

onde $\bar{\lambda}_{LT}$ representa a esbelteza adimensional à temperatura ambiente, $k_{E,\theta,com}$ o factor de redução do valor do módulo de elasticidade longitudinal (ver figura 2), à temperatura da flange de compressão $\theta_{a,com}$, atingida no instante t. O parâmetro α representa um factor de imperfeição, que no caso de secções obtidas por laminagem vale 0.21, ao contrário das secções soldadas que devem tomar um valor de 0.49. [1]

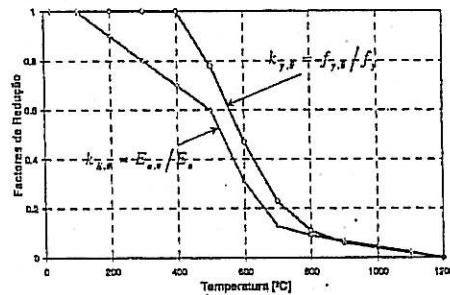


Fig. 2 – Factores de redução e sua dependência com a temperatura.

Os parâmetros a determinar em relação à temperatura ambiente, deverão ser determinados em função das seguintes expressões.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \quad (5)$$

com λ_{LT} a ser calculado através da expressão (6), ou seja

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\pi^2 \times E \times \frac{W_{pl,y}}{M_{cr}}} \quad (6)$$

em que momento elástico crítico, M_{cr} , para a encurvadura lateral deverá ser determinado de acordo com o anexo F do EC3 Part 1.1[1]. Este momento será determinado pela expressão (7), no caso da viga possuir secção uniforme, estar submetida a condições normais de constrangimento, carregada pelo seu centro de corte e sujeita a uma distribuição de momento uniforme, conforme figura 3.

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \times \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + L^2 \times \frac{GI_t}{\pi^2 EI_z}} \quad (7)$$

Nesta expressão, I_t representa uma constante de torção, I_w uma constante de empenamento e G o módulo de elasticidade transversal.

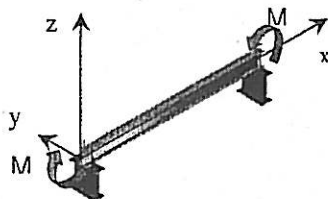


Fig.3 – Viga submetida a uma distribuição de momento uniforme.

Para determinar o valor de λ_1 , recorre-se à expressão (8), a qual é função do módulo de elasticidade longitudinal e da tensão de cedência do material.

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (8)$$

O factor $\sqrt{k_{y,0,com}/k_{E,0,com}}$ conduz a um comportamento particular da esbelteza adimensional, uma vez que aumenta com a temperatura até aos 700 [°C], passando a diminuir a partir deste valor, como se pode inferir da figura 2.

É possível representar graficamente a evolução da resistência à encurvadura, colocando em abcissa o valor da esbelteza adimensional e em ordenadas o quociente entre o valor do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t e o momento plástico resistente da viga para secções da classe 1 e 2 calculado para temperaturas uniformes.

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,0,Rd}} \quad (9)$$

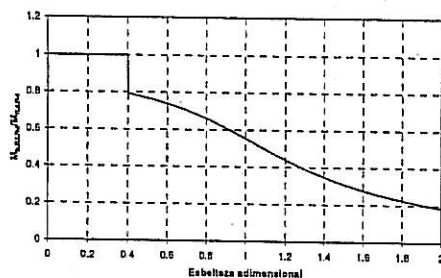


Fig. 4 – Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3, em situação de incêndio (EC3,fi)

Na figura 4 representa-se a curva de projecto à encurvadura lateral segundo o Eurocódigo 3, para qualquer temperatura superior a 20 [°C].

O valor do momento plástico resistente é determinado de acordo com as seguintes expressões:

$$M_{fi,0,Rd} = k_{y,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} M_{Rd} \quad (10)$$

onde M_{Rd} representa o momento plástico, o qual poderá ser calculado através da expressão (11). Os coeficientes de segurança parciais, γ_{M0} e $\gamma_{M,fi}$ devem ser tomados iguais à unidade.

$$M_{Rd} = \frac{w_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (11)$$

Como termo de comparação, determina-se o cociente da expressão (9), calculado através do programa SAFIR.

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{f, \theta, Rd}} \quad (12)$$

O valor do numerador será determinado por simulações numéricas sucessivas de vários comprimentos de viga e para diferentes casos de solicitação térmica. Foram simuladas dez temperaturas diferentes, desde os 20 [°C] até aos 900 [°C].

3. IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA E TENSÕES RESIDUAIS

Considerou-se que a viga apresentava uma imperfeição geométrica do tipo sinusoidal, seguindo uma curva dada pela expressão

$$y(x) = \frac{L}{1000} \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right) \quad (13)$$

em que L é o vão livre da viga.

Esta imperfeição pode resultar, como é sabido, do processo de fabrico e de eventuais estrangimentos na montagem dos elementos estruturais, entre outras causas.

Foram ainda consideradas tensões residuais impostas nos perfis, decorrente do processo de obtenção destes. As tensões longitudinais residuais são induzidas em perfis laminados a quente, durante o arrefecimento depois da operação de passagem em rolos e eventualmente como resultado de qualquer processo mecânico de alinhamento do perfil. Numericamente foi considerada uma distribuição de tensões conforme se mostra na figura 5 [13], devendo os valores aí representados ser multiplicados pela tensão de cedência do aço S235.

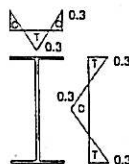


Fig. 5 – Tensões residuais. C – compressão; T – tracção.

A geometria considerada foi adaptada do catálogo da empresa ARBED, sendo o momento de inércia de torção I_t , calculado internamente pelo programa SAFIR.

4. DESCRIÇÃO NUMÉRICA DA ENCURVADURA

Neste processo será introduzido um campo de temperaturas uniforme, na secção do perfil em análise, em função do tempo previsto de exposição. Posteriormente será dado início ao efeito estrutural, incrementando o valor do momento, até ser atingido o valor relativo ao colapso do elemento estrutural, mantendo sempre a temperatura constante.

4.1. Elemento finito tridimensional

Para o caso do elemento que se apresenta, são consideradas as seguintes hipóteses:

Admite-se o pressuposto inicial de Bernoulli, ou seja, na ausência de torção, as tensões de corte são nulas, bem como numa situação de flexão. A secção recta permanece perpendicular ao eixo do elemento e a energia de deformação devida ao esforço de corte não é

considerada. O elemento de viga será considerado indeformável ao longo da altura deste, pelo que o empenamento local não será considerado. Outra das hipóteses a considerar tem a ver com as deformações axiais, consideradas muito pequenas relativamente à unidade.

Admite-se ainda que algumas rotações são moderadas, excepto no caso da que se verifica em torno do eixo do elemento estrutural, e ainda que no caso de torção pura, a secção sofre um empenamento cuja amplitude é proporcional ao aumento do ângulo de torção.

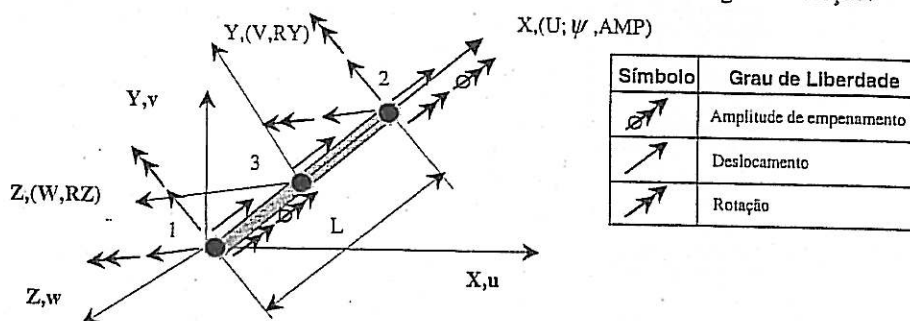


Fig. 6 - Elemento de viga tridimensional. Graus de liberdade.

O elemento finito representado na figura 6 possui dois nós (1 e 2) que definem a posição do eixo local "x", orientado do primeiro para o segundo, com origem a meia distância de ambos. O nó 3 introduz a possibilidade de uma distribuição ou variação do deslocamento axial não linear. Existe ainda um nó 4, fictício, que é utilizado para definir a posição do eixo local "y".

Admitindo então, que u, v, w representam os deslocamentos nas linhas dos nós e U, V e W os correspondentes num ponto qualquer da viga, e $\psi(x)$ a rotação em torno do eixo da viga, pode-se então admitir que:

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= u(x) - y[v'(x)] - z[w'(x)] - yw'(x)\psi(x) + zv'(x)\psi(x) - w(y, z)\psi'(x) \\ V(x, y, z) &= v(x) - z[\psi(x)] \\ W(x, y, z) &= w(x) + y[\psi(x)] \end{aligned} \quad (14)$$

Nestas expressões a primeira parcela do campo de deslocamentos axial representa o deslocamento axial das linhas dos nós, enquanto que a segunda e a terceira corresponde ao facto do aparecimento de um deslocamento provocado pela rotação da secção em volta dos eixos situados no plano desta. O termo de acoplamento da quarta e quinta parcela corresponde ao facto da secção ao ter rodado em torno de um eixo no plano, sofrer uma rotação adicional. Por fim, o último termo representa o efeito do empenamento da secção, criado pela torção.

As relações deformação-deslocamento não são lineares em problemas com grandes deslocamentos, podendo as componentes das deformações ser determinadas pelo tensor de Green Lagrange.

O modelo numérico permite efectuar cálculos termo-elastoplásticos, considerando grandes deformações e comportamento não linear dos materiais. Neste programa acresce ainda a possibilidade de se ter em consideração o empenamento das secções.

A discretização do campo de deslocamentos do elemento recorre a 15 variáveis nodais desconhecidas (graus de liberdade). Neste elemento, os nós extremos são referenciados por 1 e 2, contendo em cada um três deslocamentos, três rotações e uma amplitude de empenamento. No seu nó central 3, é introduzida a componente não linear do deslocamento axial U , capacitando-o com características não lineares axiais (grau de liberdade 15). A introdução deste grau de liberdade transforma o deslocamento axial numa função de segundo grau em x . O objectivo deste grau adicional introduzido por Boeraeve, determina que a deformação não seja constante sobre o elemento.

4.2. Análise térmica com o programa SAFIR

No caso da discretização da secção recta serão utilizados 108 elementos finitos planos bidimensionais isoparamétricos, conforme figura 7 e ainda dois pontos de integração de Gauss em cada direcção.

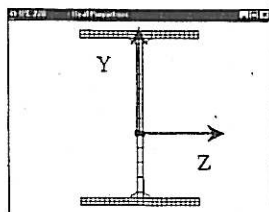


Fig.7 – Discretização da secção recta da viga.

O cálculo do campo da temperatura em regime transiente na secção recta do perfil metálico analisado, pode ser feito através do Método dos Elementos Finitos, no entanto a imposição de uma condição de trocas convectivas e radiactivas não originaria uma distribuição de temperatura uniforme na secção recta do perfil. Para simular as condições pretendidas de uniformização de temperatura, impôs-se em todos os nós da secção uma temperatura constante, situação equivalente à existente na equação de condução de calor simplificada do Eurocódigo 3.

4.3. Análise estrutural com o programa SAFIR

Foram utilizados 10 elementos finitos para discretizar longitudinalmente metade das vigas em estudo. Devido à simetria material e de carregamento existentes, será apenas estudada metade do comprimento da viga, impondo as respectivas condições de simetria e de apoio, ilustradas na figura 1.

Como se pode verificar na figura 8 a secção média da viga sofre um deslocamento lateral e vertical importante, acompanhado por uma rotação axial também significativa.

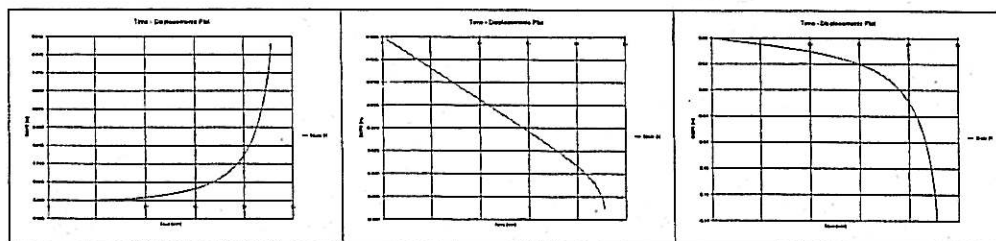


Fig. 8- Deslocamentos vertical, lateral e rotação axial da viga, determinada no nó 21 (unidades SI).

Os valores finais correspondem ao colapso da viga e permitem determinar a carga limite de resistência a que esta pode ser submetida.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

A Figura 9 compara a curva de encurvadura lateral correspondente ao Eurocódigo 3 em situação de incêndio com os valores obtidos com o programa SAFIR para todas as temperaturas analisadas.

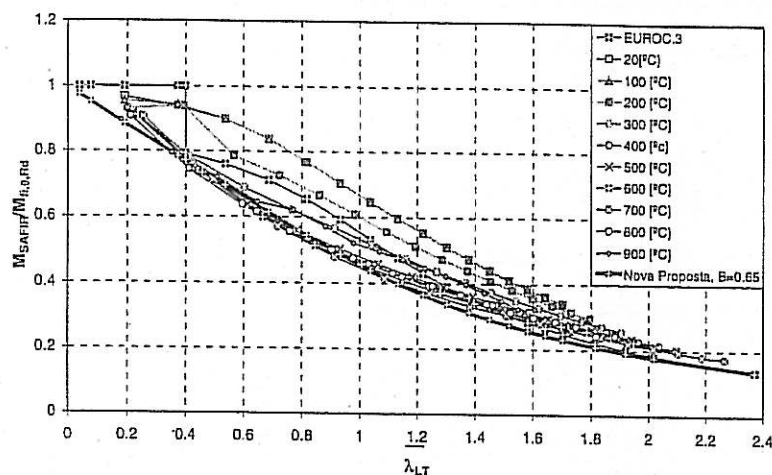


Fig.9. -Curvas de resistência à encurvadura para diferentes temperaturas e nova proposta.

Nesta figura, M_{SAFIR} representa o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral calculado com o programa SAFIR enquanto que $M_{fi, \theta, Rd}$ representa o valor de cálculo do momento resistente dado pela equação (10), avaliado para as várias temperaturas consideradas. Nesta figura está também representada a nova proposta de cálculo simples sugerida por Paulo Vila Real [10,12], verificando-se a sua validade, também no estudo que agora se apresenta.

6. NOVA PROPOSTA

Segundo Paulo Vila Real et al. [10] adoptando para a encurvadura lateral de vigas a mesma proposta que Franssen et al [6] apresentou para a encurvadura de colunas carregadas axialmente em situação de incêndio, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral de vigas em situação de incêndio deverá ser determinado por:

$$M_{b, fi, \theta, Rd} = \chi_{LT, fi} w_{pl, y} k_{y, \theta, com} f_y \frac{1}{\gamma_{M, fi}} \quad (15)$$

onde $\chi_{LT, fi}$, $\phi_{LT, \theta, com}$ e $\bar{\lambda}_{LT, \theta, com}$ deverão ser calculados pelas mesmas expressões, apresentadas em (2), (3) e (4) respectivamente. O parâmetro α na equação (3), que representa o factor de imperfeição será agora função de um factor de severidade β a ser escolhido por forma a garantir um nível de segurança apropriado:

$$\alpha = \beta \epsilon \quad (16)$$

O factor ϵ deverá ser calculado através da expressão seguinte, em função da tensão de cedência do aço

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (17)$$

A curva de encurvadura lateral varia agora com a tensão de cedência devido ao parâmetro ϵ que figura no factor de imperfeição.

Comparando a expressão (1) com a expressão (15) pode-se verificar que nesta nova proposta não se utiliza a constante empírica de 1.2, valor que é utilizado como factor de correcção no Eurocódigo 3.

As equações (2) e (3) são exactamente as mesmas que no Eurocódigo 3, Parte 1-1 define para temperatura ambiente, excepto que o limite de 0.2 para $\bar{\lambda}_{LT}$ não aparece na equação (3). Este facto altera a forma da curva de encurvadura lateral. Esta nova curva começa com um valor de $\chi_{LT} = 1.0$ para $\bar{\lambda}_{LT} = 0.0$ o qual vai progressivamente diminuindo, em vez da existência do patamar constante para esbeltezas adimensionais até ao valor de $\bar{\lambda}_{LT} = 0.4$ (ver figura 5).

Quando se confrontou este modelo simplificado de cálculo com resultados experimentais da resistência ao fogo de colunas carregadas axialmente, Franssen et al (1995) chegou a um valor do factor de severidade de 0.65, valor este que veio a ser adoptado nos documentos de aplicação nacionais, Francês e Belga, relativos ao Eurocódigo 3, Parte 1-2. Como o valor de severidade igual a 0.65 apresenta resultados seguros quando comparados com os resultados numéricos do programa SAFIR, foi este o valor adoptado nesta nova proposta.

Para que esta nova proposta que agora se apresenta possa vir a ser aceite necessita ainda de um estudo numérico mais alargado, em que se considerem outras dimensões para os perfis metálicos, outros casos de carregamento e obviamente deve ser validada através de resultados obtidos experimentalmente. Tudo isto está previsto ser feito no âmbito do projecto PRAXIS/P/ECM/14176/1998 em que se enquadra o trabalho que agora apresentamos.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram utilizadas as relações tensão deformação descritas no Eurocódigo 3, parte 1.2. O facto das propriedades mecânicas do aço dependerem da temperatura e da relação tensão - deformação a altas temperaturas não ser a mesma que à temperatura ambiente, altera a forma da curva de encurvadura lateral a elevadas temperaturas. O patamar que esta curva apresenta até à esbelteza adimensional de 0.4, válido a 20°C, desaparece no caso das solicitações apresentadas, como ficou demonstrado através dos resultados numéricos. O modelo de cálculo simples proposto no Eurocódigo 3, válido à temperatura ambiente, conduz a níveis de segurança que dependem da esbelteza da viga, não estando os resultados do lado da segurança para valores intermédios da esbelteza.

O fenómeno de fluência do material foi considerado implicitamente na relação tensão deformação, pelo que não foi tratado explicitamente.

Relativamente às propriedades térmicas, seguiu-se o Eurocódigo, pelo que foi também considerado o processo de transformação metalúrgica do aço entre os 750[°C] e os 860[°C].

Numericamente o trabalho apresentado recorre a uma modelação não linear material e geométrica, para além de apresentar um elemento finito que possibilita a caracterização do estado de torção em condições de instabilidade lateral da viga.

Resultados sobre a carga limite máxima à encurvadura tendem a demonstrar que os valores determinados não seguem com segurança os valores propostos pelo Eurocódigo. Estes resultados serão ainda alvo de tratamento experimental no âmbito do projecto citado.

Foram comparados os resultados numéricos com a nova proposta de Paulo Vila Real, demonstrando-se que esta apresenta bons níveis de segurança.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto PRAXIS/P/ECM/14176/1998 intitulado *Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo*. Os autores

agradecem os apoios da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia e da Firma J. Soares Correia.

8. REFERÊNCIAS

- [1] - Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-1, (1992). General rules and rules for buildings. Draft ENV 1993-1-1, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- [2] - D. Talamona, J. M. Franssen, J. B. Schleich, J. Kruppa, (1997) "Stability of Steel Columns in Case of Fire: Numerical Modelling", Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 6, pp. 713-720.
- [3] - Eurocode 1, Basis of design and actions on structures – Part 2-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire, (1995). Draft ENV 1991-2-2:1995, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- [4] - Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1 – General rules and rules for buildings. Background documentation, (1989). Cap. 5 document 5.03. Evolution of test results on beams with cross-sectional classes 1 – 3 in order to obtain strength functions and suitable model factors.
- [5] - Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2. General rules and rules for buildings. Structural fire design, (1995). Draft ENV 1993-1-2, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- [6] - Jean-Marc Franssen, Jean-Baptiste Schleich & Louis-Guy Cajot, (1995) "A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members According to Eurocode 3", Journal Construct. Steel Research, Vol. 35, pp. 49-69.
- [7] - Jean-Marc Franssen, PROGRAM SAFIR (1996), Ver. 1.3, User's Manual, Université de Liege, Institut du Génie Civil, Service "Ponts et Charpentes".
- [8] - Jean-Marc Franssen, Jean-Baptiste Schleich, Louis-Guy Cajot & Wenceslao Azpiazu, (1996) "A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members – Comparison with Experimental Results", Journal Construct. Steel Research, Vol. 37, pp. 175-204.
- [9] - Jean-Marc Franssen, (Année académique 1997-1998) "Contributions à la Modélisation des Incendies dans les Bâtiments et de Leurs Effects Sur les Structures", Thèse présentée en vue de l'obtention du grade d'Agrégé de l'Enseignement Supérieur, University of Liege, Belgium.
- [10] - Paulo M. M. Vila Real, Jean-Marc Franssen (1999) – "Lateral buckling of steel I beams at room temperature - Comparison between the EUROCODE 3 and the SAFIR code considering or not the residual stresses", internal report No. 99/01 , Institute of Civil Engineering – Service Ponts et Charpentes – of the University of Liege.
- [11] - Talamona Didier; "Flambement de poteaux métalliques sous charge excentrée, à haute température"; Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur d'Université; 1995.
- [12] - Paulo M. M. Vila Real, Paulo Piloto, Jean-Marc Franssen; "Modelação numérica da encurvadura lateral de vigas I metálicas sujeitas à acção do fogo; Actas do II encontro de construção metálica e Mista; Coimbra 1999.
- [13] - ECCS – EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK, Technical Committee 8 – Structural Stability, Technical Working Group 8.2 – System, "Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames With Rigid Joints", first edition, 1984.