

Construção Metálica e Mista 2

ANTÓNIO LAMAS LUÍS SIMÕES DA SILVA PAULO CRUZ

Construção
Metálica
e Mista 2

Construção Metálica e Mista 2

Actas do II Encontro Nacional
de Construção Metálica e Mista

Audatório Laginha Serafim - Coimbra, Portugal
18 e 19 de Novembro, 1999

António Lamas

Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Luís Simões da Silva

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Paulo Cruz

Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

Construção Metálica e Mista 2

Copyright © 1999 por António Lamas, Luís Simões da Silva e Paulo Cruz

Editora:

cmm - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Palácio de Vila Flor, Av. D. Afonso Henriques
4810-431 Guimarães, Portugal
Tel. +351 253 415142 – Fax +351 253 415389
Internet: <http://www.cmm.pt>
e-mail: geral@cmm.pt

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito Legal: 1288/99
ISBN: 972-98376-0-0

Novembro, 1999

Coordenação Editorial: Rui A. D. Simões
Composição, Paginação e Impressão: Multicomp, Lisboa

Nota da Editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução fotográfica dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

ÍNDICE

Comissões	ix
Exposição Técnica e Apoios	x
Patrocínios	xi
Prefácio	xv

SECÇÃO I Conferências

▪ A Construção Metálica em Portugal Luís Simões da Silva (Universidade de Coimbra, Portugal)	3
▪ Pontes Mistas Aço-Betão António J. Reis (Instituto Superior Técnico, Portugal)	11
▪ Design Aspects Affecting the Seismic Behaviour of Steel MRF Buildings: Analysis of Three Case Studies Antonello De Luca e Elena Mele (Università di Napoli, Italy)	23
▪ Prediction Model of Column Bases Using Component Method Frantisek Wald (Czech Technical University in Prague, Czech Republic)	33
▪ Steel Structures in Fire from the Material Level to the Calculation Methods Jean-Marc Franssen (University of Liege, Belgium)	47
▪ Light Gauge Steel Framing Systems for Low-Rise Construction J. Michael Davies (University of Manchester, United Kingdom)	59
▪ A Beam-to-Column Connection for Improved Seismic Performance Reidar Bjorhovde (The Bjorhovde Group, USA)	79
▪ New Design Rules for Plate Girders René Maquoi (University of Liege, Belgium)	95
▪ Considerações de Projecto e Fabricação de Estruturas Espaciais para Coberturas no Brasil Sebastião A. L. de Andrade (PUC-RIO e UERJ, Brasil), P. C. G. da S. Vellasco (UERJ, Brasil), J. G. S. da Silva (UERJ, Brasil) e A. V. D'Este (PUC-RIO, Brasil)	113

SECÇÃO II Comunicações

PONTES

• Síntese da Evolução de Pontes Mistas Aço-Betão Carlos M. M. Gomes, Paulo J. S. Cruz e Luís Simões da Silva	129
• Kao Ping Hsi Bridge in Taiwan Heinz Pircher	143
• Passadiço Metálico das Instalações Fabris da STORA-CELBI, na Figueira da Foz Helena Gervásio, Luís Simões da Silva, Rui Belchior e João Marques	151
• Nova Ponte de Xabregas. Ponte Silenciosa José Carlos Clemente e Luísa Gomes	159
• Passagem Superior em Estrutura Mista Aço-Betão de Execução Acelerada José C. Calixto da Silva	165

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

- Modelo Analítico de Análise Não Linear de Secções de Elementos Estruturais de Aço
António M. Baptista, Jean-Pierre Muzeau e Dinar Camotim 357
- Influência da Modelação da Lei Constitutiva dos Aços na Análise Elasto-Plástica de Estruturas Metálicas
António M. Baptista, Dinar Camotim e Jean-Pierre Muzeau 367
- Avaliação Experimental do Comportamento ao Corte de Vigas de Aço Esbeltas
Carlos M. M. Gomes, Paulo J. S. Cruz e Luís Simões da Silva 377
- Estabilidade de Estruturas de Betão, Aço e Mistas. Análise Comparativa das Disposições dos Eurocódigos 2, 3 e 4
Dinar Camotim, João Vinagre e Nuno Silvestre 389
- Encurvadura Local de Colunas de Aço Enformadas a Frio com Secção em "RACK"
Eduardo de M. Batista, Dinar Camotim, Luis Carlos Prola, E. G. Vazquez 401
- Análise dos Efeitos da Deformabilidade da Conexão em Vigas Mistas
Francisco Virtuoso e Ricardo Vieira 413
- Influência da Deformabilidade Lateral na Verificação da Segurança de Pórticos Segundo o Eurocódigo 3
João Rocha de Almeida e José Pinheiro Soares 423
- Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas Planas com Nós Semi-Rígidos
Luis Costa Neves e Luís Simões Silva 433
- Análise Teórica e Experimental de Treliças Metálicas Espaciais Constituídas por Barras Tubulares com Extremidades Estampadas
Maximiliano Malite, Roberto M. Gonçalves, Carlos H. Maiola e Alex Sander C. de Souza 447
- Influência do Comportamento Real das Ligações em Pórticos Metálicos de Travessas Inclinadas
Pedro Nogueiro, Luís Simões da Silva, Dinar Camotim e Nuno Silvestre 457
- Análise Não Linear de Pórticos Metálicos Planos Segundo o EC3 - Parte 1: Método das Imperfeições Equivalentes
Pedro Simão e Paulo Providência e Costa 467
- Análise Não Linear de Pórticos Metálicos Planos Segundo o EC3 - Parte 2: Método da Análise Refinada e Exemplificação
Pedro Simão e Paulo Providência e Costa 479
- Contabilização do Efeito das Imperfeições "Locais" no Dimensionamento de Estruturas Metálicas
Rodrigo Gonçalves e Dinar Camotim 493
- Dimensionamento Plástico de Pórticos Metálicos de Acordo com o Eurocódigo 3
Vitor Barreto, Nuno Silvestre e Dinar Camotim 505

LIGAÇÕES ESTRUTURAS

- Avaliação Analítica do Comportamento de Ligações Metálicas
Ana M. Girão Coelho e Luís Simões da Silva 519
- Influência da Rigidez das Ligações no Comportamento Estrutural
Fernando C. Teixeira Gomes 531
- Análise de Fiabilidade de Ligações Metálicas
Luís A. C. Neves, Paulo J. S. Cruz e A. Abel R. Henriques 541
- Damage Accumulation Design of Steel Beam-to-Column Connections
Luís Calado, Carlo A. Castiglioni, Elena Mele e Carlos Ferreira 551

- Ponte Rodoferroviária sobre o Rio Paraná – Brasil: Auscultação da Estrutura Metálica Durante o Lançamento e Prova de Carga 181
Maximiliano Malite, Roberto Martins Gonçalves, José Jairo de Sáles e Toshiaki Takeya
- Reforço Total da Ponte do Côura. Linha do Minho – Km 100,941 191
Miguel Machado Guimarães, Alberto Teixeira e José A. Mota Freitas
- Passagem Superior de Peões em Geria, na Auto-Estrada A1 201
Tiago Abecasis
- Pontes Metálicas de Abrantes e Chamusca Sobre o Rio Tejo. Inspecção e Elaboração do Estudo de Reabilitação das Obras de Arte 209
Tiago Mendonça, Vitor Brito e Manuel Almeida

EDIFÍCIOS

- Estruturas Mistas de Aço-Betão como Solução Complementar em Estruturas de Betão Armado 223
Celestino Flório Quaresma
 - Estruturas Metálicas na Amazônia: Implantação do Sistema de Vigilância SIVAM 229
Eduardo de M. Batista e Luiz Roberto M. de Miranda
 - Tubular Architecture and New Shapes of Tubes Used for Structural Applications 241
Gérard Nicaud
 - A Recuperação da Cobertura Sudoeste do Palácio Pancas-Palha, em Lisboa 245
Jorge de Novais Bastos
 - Conservatório de Música de Coimbra. Estrutura Mista Aço-Betão 255
Luís Calado e António Rui Baptista
 - Pavilhão de Depósito de Argila da SOLCER, em Oliveira do Bairro 273
Luís Simões da Silva, Helena Gervásio, Aurélio Grilo e Paulo Ribeiro
 - Project 281
Mário Carlos Sua Kay
 - Torres de Iluminação do Estádio Nacional 285
Tiago Abecasis
- ❖
- Economia de Soluções Mistas Aço-Betão com Perfis Tubulares e Ligações Semi-Rígidas em Edifícios de Escritórios 291
Adriano J. G. dos Santos, Luís Simões da Silva, Luís Costa Neves, Filipe Almeida e Nélio Jardim
 - Aços Estruturais de Alta Resistência. Utilização na Construção Soldada 305
Altino J. R. Loureiro
 - Galvanização por Imersão a Quente 321
António Carlos Brandão e Ricardo Canossa
 - Cost Based Engineering and Production of Steel Constructions 323
Harry Evers e Frank Maatje
 - Connect: Um Sistema Integrado para o Dimensionamento, Detalhamento e Orçamentação de Ligações Estruturais de Aço 331
L. F. da Silva, P. C. G. da S. Vellasco, S. A. L. de Andrade e Paulo J. S. Cruz
 - Dimensionamento Económico de Estruturas Tubulares 343
Paulo J. S. Cruz

• Test Results on Welded and Bolted Beam-to-Column Connections Luís Calado e Elena Mele	565
• Fracture Resistance Design of Bolted Joints Luís Calado, Raffaele Landolfo e Gianfranco De Matteis	577
• Resistance of End-Plate Connections Martina Eliasova, Fernando C. Teixeira Gomes, Zdenek Štokol e Frantisek Wald	589
• Comparação da Eficácia de Diferentes Modelações de um T-Stub Paulo J. S. Cruz, Paulo J. B. Lourenço e Luís A. C. Neves	597
• Análise Experimental de Ligações Mistas Viga-Pilar Rui A. D. Simões, Luís Simões da Silva e Paulo J. S. Cruz	607

COMPORTAMENTO AO FOGO

• Comportamento de Ligações Metálicas Sujeltas a Temperaturas Elevadas Aldina Santiago, Luís Simões da Silva e P. Vila Real	623
• A Influência do Comprimento de Encurvadura na Resistência ao Fogo de Pilares de Aço Joaquim C. Valente e I. Cabrita Neves	637
• Temperatura Crítica de Elementos de Aço Comprimidos com Dilatação Térmica Elasticamente Restringida João P. Correia Rodrigues e I. Cabrita Neves	647
• Modelação Numérica da Encurvadura Lateral de Vigas I Metálicas Sujeltas à Acção do Fogo Paulo M. M. Vila Real, P. A. G. Piloto e J. M. Franssen	657
• A Utilização de Métodos Avançados no Cálculo de uma Estrutura Metálica em Situação de Incêndio Paulo M. M. Vila Real e P. A. G. Piloto	667

Índice de autores	679
-------------------	-----

Comissão Organizadora

António Lamas (Presidente, IST)
Luís Simões da Silva (FCTUC)
Paulo Cruz (UM)
Carlos Martins (MARTIFER)
Tiago Abecasis (TAL PROJECTO)

Comissão Científica






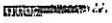












António Lamas (Presidente, IST)
Adão da Fonseca (FEUP)
António Reis (IST)
António Baptista (LNEC)
Dinar Camotim (IST)
E. Arantes e Oliveira (LNEC)
J. Andrade Gil (REFER)
J. Câncio Martins (FCTUC)
J. Mota Freitas (FEUP)
Luís Calado (IST)
Luís Cruz Simões (FCTUC)
Paulo Cruz (UM)
Paulo Vila Real (UA)
Ryszard Kowalczyk (UBI)

Comissão Executiva

Luís Simões da Silva (Coordenador, FCTUC)
Paulo Cruz (UM)
Rui Simões (FCTUC)

FCTUC	- Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
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
UM	- Universidade do Minho
MARTIFER	- Construções Metalomecânicas, S.A.
REFER	- Rede Ferroviária Nacional
TAL PROJECTO	- Projectos, Estudos e Serviços de Engenharia, Lda

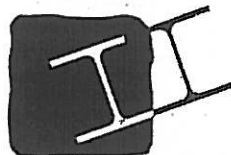
EXPOSIÇÃO TÉCNICA

-  APET - Associação Portuguesa de Engenheiros Técnicos
-  CMB - Construções Metálicas da Beira, Lda.
-  CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
-  DEC - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
-  FLORÊNCIO AUGUSTO CHAGAS, S.A.
-  GIPAC - Gabinete de Informática e Projecto Assistido por Computador, Lda.
-  GRID - Consultas, Estudos e Projectos de Engenharia, Lda.
-  IEP - Instituto das Estradas de Portugal
-  LASTRA-IBÉRICA S.A. - Cargas Pesadas
-  METALOCAR - Indústria de Metalomecânica, S.A.
-  MARTIFER - Construções Metalomecânicas, S.A.
-  ORDEM DOS ARQUITECTOS
-  ORDEM DOS ENGENHEIROS
-  RAMOS CATARINO, S.A.
-  REFER, E.P. - Rede Ferroviária Nacional
-  TINTAS HEMPEL (PORTUGAL), LDA.
-  TOP II - Informática, Lda.
-  VIDAL, PEREIRA & GOMES, LDA.

APOIOS



FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA



Encontro
Nacional de
Construção
Metálica
e Mista

COIMBRA, 18 e 19 de NOVEMBRO de 1999

MODELAÇÃO NUMÉRICA DA ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS I METÁLICAS SUJEITAS À ACÇÃO DO FOGO

Vila Real, P. M. M.¹; Piloto, P. A. G.²; Franssen, J.-M.³

RESUMO

Neste trabalho, calcula-se a resistência à encurvadura lateral de vigas I metálicas, em situação de incêndio, 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.

Comparam-se os resultados obtidos por esta via com os que se obtêm com base no modelo de cálculo simples apresentado na Parte 1-2 do Eurocódigo 3. Este modelo de cálculo simples conduz a níveis de segurança que dependem da esbelteza adimensional das vigas, não estando os resultados do lado da segurança para valores intermédios daquela esbelteza, quando comparados com os resultados numéricos.

Foram considerados dois tipos de aço, um perfil I da série europeia, um tipo de carregamento, imperfeição geométrica das vigas do tipo sinusoidal, tensões residuais e quatro períodos de exposição à curva de incêndio padrão ISO 834. Com base neste estudo foi possível obter uma nova proposta de modelo de cálculo simples, diferente do sugerido no Eurocódigo 3 e que garante resultados seguros quando comparados com os resultados numéricos.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do problema da encurvadura lateral das vigas metálicas, à temperatura ambiente ser actualmente bem conhecido (Eurocode 3, 1989), o mesmo problema, quando as vigas estão sujeitas a elevadas temperaturas não está ainda bem estudado.

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 à acção do fogo.

¹ Professor Auxiliar, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

² Professor Adjunto, Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança

³ Professor, Institut du Génie Civil - Service "Ponts et Charpentes", Université de Liège

Faz-se a proposta de um novo modelo de cálculo simples para cálculo da resistência à encurvadura lateral de vigas metálicas em situação de incêndio, baseada em resultados numéricos obtidos 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 especialmente para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo.

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).

Estudou-se uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma distribuição de momentos uniforme (Fig. 1). Trata-se de um perfil IPE 220 com apoios que impedem os deslocamentos laterais e a rotação, segundo o eixo longitudinal do perfil, das secções nas extremidades.

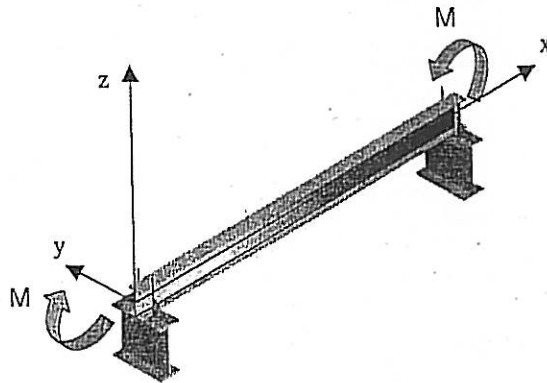


Fig. 1 – Viga tridimensional simplesmente apoiada, sujeita a momentos nas extremidades.

Admitiu-se que a viga estava sujeita, nos quatro lados, à curva de incêndio padrão ISO 834 (Eurocode 1, 1995), sendo os resultados numéricos comparados com os resultados obtidos através das fórmulas do Eurocódigo 3, Parte 1-2 (Eurocode 3, 1995), para tempos de exposição ao fogo de 10, 15, 20 e 30 minutos.

Considerou-se que a viga tinha 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 foram tidas em consideração de acordo com a publicação do ECCS (1984).

2. RESULTADOS NUMÉRICOS

2.1 Análise de acordo com o Eurocódigo 3

A temperatura da viga ao longo do tempo foi obtida através da equação de condução de calor simplificada do Eurocódigo 3, Parte 1-2 (1995). Conhecida a temperatura, a qual de acordo com as simplificações do Eurocódigo é uniforme na secção recta da viga, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t , $M_{b,fi,t,Rd}$, tendo em atenção que a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,enum}$, para a temperatura máxima no banzo comprimido, $\theta_{u,enum}$, atingida no instante t , seja superior a 0.4, calcula-se de acordo com:

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

onde:

- $\chi_{LT,fi}$ é o factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio;
- $w_{pl,y}$ é o módulo plástico da secção;
- $k_{y,\theta,cum}$ é o factor de redução relativo à tensão de cedência para a máxima temperatura no banzo comprimido, $\theta_{a,cum}$, atingida no instante t ;
- $\gamma_{M,fi}$ é o factor parcial de segurança em situação de incêndio (geralmente $\gamma_{M,fi} = 1$).

A constante 1.2 na eq. (1) é um valor empírico utilizado como factor de correcção.

O factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio, $\chi_{LT,fi}$, deve ser calculado como no caso de temperatura ambiente, com a diferença de que a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,cum}$ para a temperatura $\theta_{a,cum}$ é dada por

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,cum} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,cum}}{k_{E,\theta,cum}}} \quad (2)$$

onde

- $\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza adimensional à temperatura ambiente;
- $k_{E,\theta,cum}$ é o factor de redução do módulo de Young à temperatura máxima no banzo comprimido, $\theta_{a,cum}$, atingida no instante t .

A linha contínua da Figura 2 mostra a curva de encurvadura lateral dada pelo Eurocódigo3. Esta curva é única para temperaturas superiores a 20 °C e é designada na figura por EC3,fi. No eixo vertical está representada a relação

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,\theta,Rd}} \quad (3)$$

onde, $M_{b,fi,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t dado pela equação (1) e o valor de cálculo do momento resistente da viga $M_{fi,\theta,Rd}$ para secções da Classe 1 e 2 com temperaturas uniformes de θ_a é dado por:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} M_{Rd} \quad (4)$$

onde, $\gamma_{M0} = 1.0$, $\gamma_{M,fi} = 1.0$ e M_{Rd} é o momento plástico $M_{pl,Rd}$ à temperatura ambiente, dado por

$$M_{Rd} = \frac{w_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

onde $\gamma_{M0} = 1.0$.

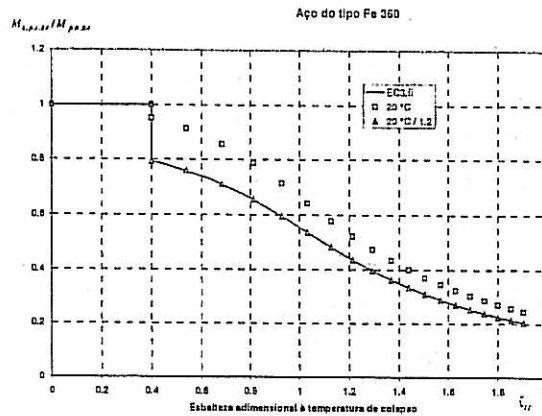


Fig. 2 – Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3, em situação de incêndio (EC3,fi) e à temperatura ambiente (20°C).

Nesta figura pode verificar-se que a curva de encurvadura lateral a 20 °C difere da mesma curva a temperaturas elevadas, para valores da esbelteza adimensional superiores a 0.4, devido ao factor empírico de 1.2. Esta figura mostra também que a curva a elevadas temperaturas, EC3,fi, se obtém da curva a 20 °C dividindo as suas ordenadas por 1.2. Assim, deve ser realçado que nas curvas de encurvadura lateral utilizadas ao longo deste trabalho, o cociente $M_{b,fi,t,Rd} / M_{fi,\theta,Rd}$ marcado no eixo das ordenadas, representa o factor de redução relativo à encurvadura lateral em situação de incêndio, $\chi_{LT,fi}$ dividido por 1.2, isto é:

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,\theta,Rd}} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2}, \text{ para os resultados do Eurocódigo 3, Parte 1-2} \quad (6)$$

ou

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{fi,\theta,Rd}}, \text{ para os resultados do programa SAFIR} \quad (7)$$

2.2 Análise com o programa SAFIR

O cálculo da evolução no tempo dos campos de temperatura na secção recta do perfil metálico analisado é feito através do Método dos Elementos Finitos, pelo que, estas distribuições não serão uniformes, como as que se obtém quando se utiliza a equação de condução de calor simplificada do Eurocódigo 3.

O incremento de carga utilizado foi de 100 [Nm] para as temperaturas correspondentes aos instantes 10, 15 e 20 minutos e de 50 [Nm] para as temperaturas obtidas ao fim de 30 minutos.

A simulação numérica foi realizada tendo em consideração que:

- Condições nos apoios: a viga é simplesmente apoiada e nas extremidades os deslocamentos laterais e a rotação em torno do eixo longitudinal são impedidos;
- Imperfeição lateral inicial: Sinusoidal, com um valor máximo a meio vão de $L/1000$;
- Tensões residuais: constantes ao longo da espessura da alma e dos banzos e com uma distribuição triangular como se mostra na figura 3, com um valor máximo de

0.3 x 235 [Mpa] (ECCS, 1984) para ambas as qualidades de aço consideradas, Fe 360 e Fe 510.

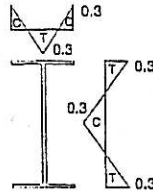
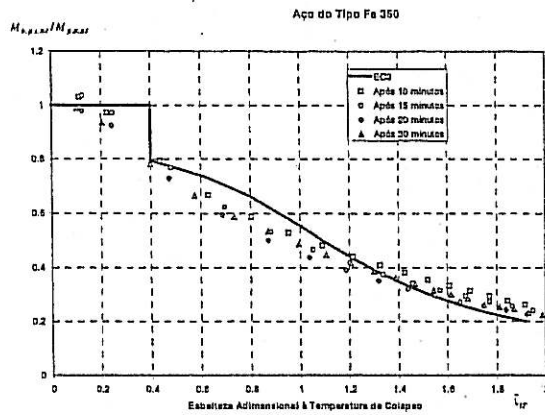
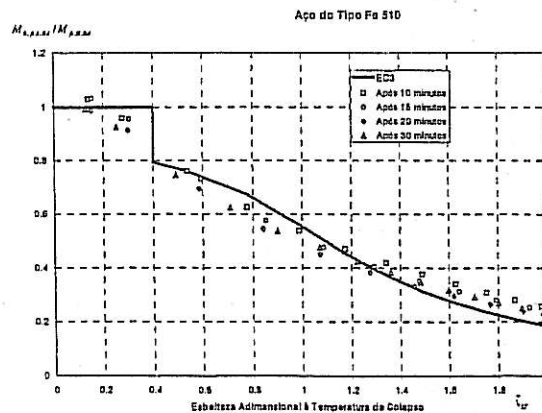


Fig.3 – Tensões residuais. C – compressão; T – tração.

A Figura 4 compara a curva de encurvadura lateral correspondente ao Eurocódigo 3 com os valores obtidos com o programa SAFIR para todos os instantes de tempo analisados (10, 15, 20 e 30 minutos).



a) Aço do tipo Fe 360



b) Aço do tipo Fe 510.

Fig. 4 – Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 e resultados do SAFIR.

Nesta figura, $M_{b,\beta,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t dado pela equação (1) ou calculado com o programa SAFIR e o valor de cálculo do momento resistente $M_{\beta,\theta,Rd}$ dado pela equação (4) é avaliado para as temperaturas obtidas com a equação simplificada do Eurocódigo 3, isto é, 554 °C, 680 °C, 733 °C e 827 °C para os instantes de tempo 10, 15, 20 e 30 minutos respectivamente. A esbelteza adimensional foi calculada para essas temperaturas de acordo com a equação (2).

Pode constatar-se na Figura 4 que os valores obtidos com o programa SAFIR quando se considera o aço do tipo Fe 510 são superiores aos valores obtidos quando se considera o aço do tipo Fe 360. De acordo com Jean-Marc Franssen et al (1995) "isto é devido ao facto das tensões residuais não dependerem da tensão de cedência do aço. A sua influência relativa é menor quando a tensão de cedência aumenta. Este fenómeno não é tido em conta no modelo simplificado do Eurocódigo 3, onde o coeficiente de encurvadura não varia com a tensões de cedência".

A razão pela qual na figura 4 o cociente $M_{SAFIR} / M_{\beta,\theta,Rd}$, para pequenos valores da esbelteza adimensional e para os instantes de tempo de 10 e 15 minutos, é maior do que 1 tem a ver com o facto do campo de temperaturas obtido com o programa SAFIR não ser uniforme, apresentando temperaturas nos banzos menores do que a temperatura dada pela equação simplificada do Eurocódigo 3 e aqui utilizada para calcular $M_{\beta,\theta,Rd}$. Este efeito, que é favorável relativamente à resistência da viga à encurvadura lateral, tende a desaparecer para tempos de exposição ao fogo superiores pois os gradientes térmicos na secção tendem também a diminuir.

2.3 Nova Proposta

Adoptando para a encurvadura lateral de vigas a mesma proposta de Franssen et al (1995) para a encurvadura de colunas em situação de incêndio carregadas axialmente, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio passa a ser dado, segundo a nova proposta por:

$$M_{b,\beta,t,Rd} = \chi_{LT,\beta} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,\beta}} \quad (8)$$

onde

$$\chi_{LT,\beta} = \frac{1}{\Phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\Phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (9)$$

$$\Phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (10)$$

e

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

onde $\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza adimensional à temperatura ambiente, e

$\alpha = \beta \epsilon$ o factor de imperfeição;

β o factor de severidade, a ser escolhido de modo a assegurar um nível de segurança apropriado;

$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$, f_y é a tensão de cedência em [MPa].

Comparando as equações (1) e (8) pode verificar-se que nesta nova proposta não se usa a constante empírica de 1.2 que é utilizada como factor de correcção no Eurocódigo 3.

As equações (9) e (10) são exactamente as mesmas que o Eurocódigo 3, Parte 1-1 define para temperatura ambiente, excepto que o limite de 0.2 para $\bar{\lambda}_{LT}$ não aparece na equação (10). 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 diminuindo mesmo para pequenos valores da esbelteza adimensional, em vez de ter um patamar até um valor de $\bar{\lambda}_{LT} = 0.4$ (ver Fig. 5).

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

Quando 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.

A Figura 5 mostra a influência do valor do factor de severidade na forma da curva de encurvadura lateral para o aço Fe 360, estando representadas as curvas correspondentes a valores desse factor iguais a 1.2, 0.9 e 0.65. Como o valor de 0.65 dá resultados seguros quando comparados com os resultados numéricos do programa SAFIR, foi este o valor adoptado nesta nova proposta, estando as novas curvas de encurvadura representadas na Figura 6 para os aços do tipo Fe 360 e Fe 510.

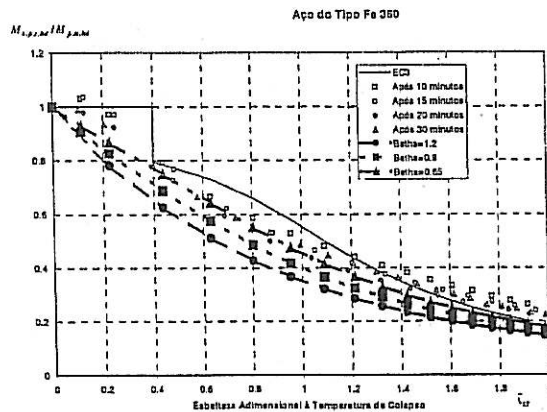
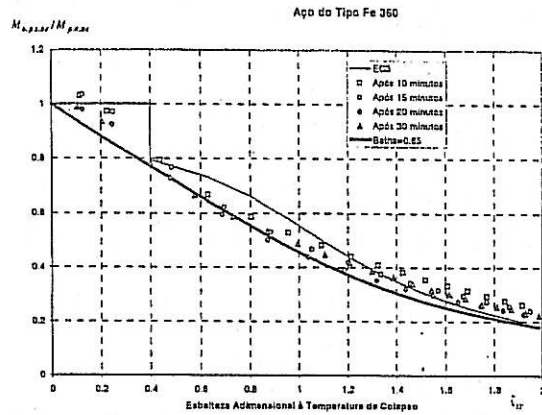
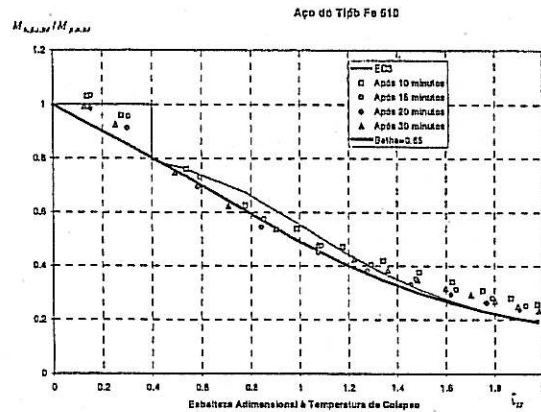


Fig. 5 - Curvas de encurvadura lateral obtidas com o Eurocódigo 3, o programa SAFIR (após 10, 15, 20 e 30 minutos) e com a nova proposta.

O facto de se adoptar para o caso da encurvadura lateral de vigas, o mesmo valor do coeficiente de severidade adoptado por Jean-Marc Franssen et al (1995) para o caso da encurvadura de colunas, conduz à mesma filosofia que o Eurocódigo 3 actualmente adopta, isto é, usar as mesmas fórmulas para o factor de redução χ , quer se trate de encurvadura de colunas ou de encurvadura lateral de vigas.



a) Aço do tipo Fe 360.



b) Aço do tipo Fe 510.

Fig. 6 – Curvas de encurvadura lateral obtidas com o Eurocódigo 3, o programa SAFIR (após 10, 15, 20 e 30 minutos) e com a nova proposta com $\beta = 0.65$.

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.

3. CONCLUSÕES

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 altas temperaturas. O patamar que esta curva apresenta até à esbelteza adimensional de 0.4, válido a 20°C, desaparece no caso de temperaturas elevadas, como ficou demonstrado através dos resultados numéricos. O modelo de cálculo simples proposto no Eurocódigo 3 e que é 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.

Apresentou-se uma nova proposta para a curva de encurvadura lateral de vigas metálicas I, sujeitas a fogo, baseada no modelo sugerido por Jean-Marc Franssen et al (1995) para colunas metálicas sujeitas a carga axial. Nesta proposta a curva de encurvadura lateral baseada no factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio e na esbelteza adimensional calculada à temperatura de colapso, depende do tipo de aço, contrariamente ao que acontece no Eurocódigo 3, Parte 1-2.

Encontrou-se o mesmo valor de $\beta = 0.65$, para factor de severidade que o utilizado por Jean-Marc Franssen et al (1996) no caso de colunas carregadas axialmente, o que nos conduz à mesma filosofia adoptada no Eurocódigo 3, isto é, usar as mesmas fórmulas para factor de redução, quer se trate de encurvadura de colunas ou de encurvadura lateral de vigas.

Deve realçar-se o facto do valor do factor de severidade β da proposta apresentada neste trabalho ter sido obtido analisando-se apenas o comportamento do perfil IPE 220, pelo que é desejável que se façam mais análises numéricas, considerando outros tipos de perfil.

Por outro lado é desejável também que os resultados numéricos sejam validados através de resultados experimentais.

4. AGRADECIMENTOS

Este trabalho de investigação e desenvolvimento 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 à FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro e à Firma J. Soares Correia a oferta dos perfis metálicos necessários à futura realização dos ensaios experimentais. O primeiro autor agradece também à Universidade de Liège as facilidades concedidas durante a sua licença sabática.

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- ECCS – EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK, (1984) Technical Committee 8 – Structural Stability, Technical Working Group 8.2 – System, "Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames With Rigid Joints", first edition.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2: Règles générales (1998) – Calcul de comportement au feu, DAN belge.

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier – Partie 1-2: Règles générales – Calcul de comportement au feu, Document D'Application Nationale française.

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.

Jean-Marc Franssen, PROGRAM SAFIR (1996), Ver. 1.3, User's Manual, Université de Liege, Institut du Génie Civil, Service "Ponts et Charpentes".

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.

Jean-Marc Franssen, (Année académique 1997-1998) "Contributions à la Modélisation des Incendies dans les Bâtiments et de Leurs Effets Sur les Structures", Thèse présentée en vue de l'obtention du grade d'Agrégé de l'Enseignement Supérieur, University of Liege, Belgium.

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.