



Verbatim®

DataLifePlus

CD-R

COMPACT
disc
Recordable

- Extra protection durability layer. • Compatible with the latest CD drives and disc printers.
- User writable area for individual referencing. • Lifetime warranty.

- Revêtement protecteur longue durée. • Compatibilité avec les lecteurs et les imprimantes de CD les plus récents. • Espace réservé pour l'écriture. • Garantie à vie.

- Spezielle kratz feste Oberfläche. • Kompatibel mit den neuesten CD Laufwerken und Disc-Druckern.
- Beschreibbar für individuelle Kennzeichnung.
- in Deutschland gelten die gesetzlichen Gewährleistungsvorschriften.

- Extra protezione sulla superficie per una maggiore durata. • Compatibile con tutti gli ultimi modelli di lettori e registratori per CD. • Zona Utilizzabile dall'utente per rienerneti personalizzate.
- Garanzia a vita.

- Superficie con protección de larga duración. • Compatible con las últimas unidades de CD e impresoras de discos. • Superficie disponible para su rotulación individual.
- Garantía de por vida.

- Camada de durabilidade de proteção extra. • Compatível com as unidades de CD e impressoras de disco mais recentes. • Área gravável pelo utilizador para referência individual.
- Garantia para toda a vida.

- Дополнительный защитный слой. • Совместим с новейшими приводами CD и устройствами для записи на CD. • Имеет участок для маркировки пользователем. • Пожизненная гарантия.

Reorder #38965



Made in Taiwan
Fabriqué en Taiwan
Hergestellt in Taiwan
Fabbricato in Taiwan
Fabricado en Taiwan
Fabricado em Taiwan
Сделано в Тайвань



Quality guaranteed by Mitsubishi Chemical Corporation.

Verbatim®

USA Verbatim Corp. Charlotte, NC
IRELAND Verbatim Ltd. Limerick
AUSTRALIA Verbatim Pty. Ltd. Melbourne
© Verbatim Corporation, 1997
www.verbatim-europe.com

A MITSUBISHI CHEMICAL COMPANY

III Conferencia Anual de Usuarios COSMOS/™ 2000



COSMOS M
España - Portugal

Presentaciones y Ponencias COSMOS/M

**Parque Tecnológico de Zamudio
29 de Septiembre de 2000
(SPAIN)**

Copyright © 2000 Tecnologías CAE Avanzadas, S.L.

-- <http://www.tecnocae.es> --

~~~~~  
All Rights Reserved.

[Trademark Information](#)

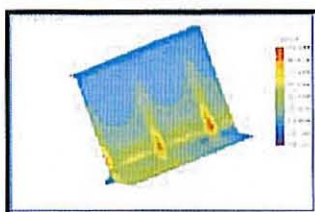
# Presentaciones y Ponencias COSMOS/M

## III Conferencia Anual de Usuarios COSMOS/™ 2000 P.T. Zamudio (SPAIN)

### INGENIERIA CIVIL Y ESTRUCTURAS

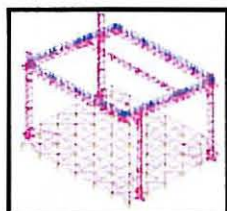


**"Modelos Lineales y No Lineales de Elementos Finitos en Ingeniería Civil",**  
Escuela de Caminos - Universidad de La Coruña (A CORUÑA)  
[Santiago Hernández](#), [Angel Sánchez de Dios](#)



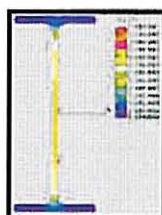
**"Aplicación del MEF al Diseño de Canales Elevados en Hormigón Prefabricado",**  
Universidad de Zaragoza, Dpto. Ingeniería Mecánica - EUITI (ZARAGOZA)

[Javier Oscar Abad Blasco](#), Luis Forcano Obón, Víctor Tabuenca Cintora --



**"Diseño y Cálculo de Escenario y Cubierta",**  
ULMA SyC, S.COOP (OÑATI)

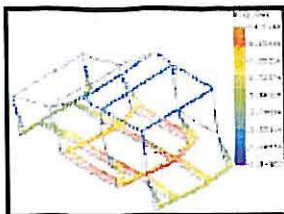
[Aitor Fabián](#)



**"Estudio mediante COSMOS/M y Mathematica de la Comprobación Elástica de Nudos Ortogonales",**  
[José L. González Fueyo](#), E.P.S. de Zamora - Universidad de Salamanca (ZAMORA)

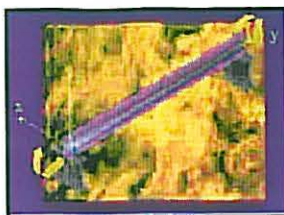


### INGENIERIA MECANICA



**"Análise Estrutural de um Veículo Motorizado para Deficiente Motor",  
ESTIG - Instituto Politécnico de Bragança (Portugal)**

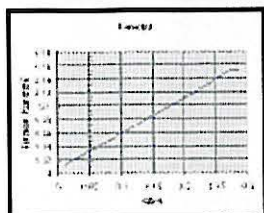
Luis Mesquita, Elza Fonseca, Gil Castro



**"Encurvadura Lateral de Vigas submetidas a Elevadas Temperaturas - Comparação Numérica",**

Paulo Piloto, Instituto Politécnico de Bragança (PORTUGAL)

Paulo Vilareal, Univ. de Aveiro (PORTUGAL)



**"Análisis No Lineal de Piezas de Caucho - Determinación Automática de las Ctes. de Mooney-Rivlin a partir de Datos de Ensayo (curve-fitting)"**

Blas Molero Hidalgo, TECNOCAE (Zamudio)

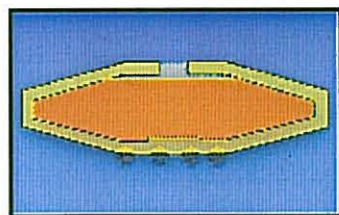


**"COSMOS/™ Family of FEA Products from Structural Research & Analysis Corporation - SRAC (USA) "**

Rob Coles, COSMOS Europe, LTd. (UK)



**INGENIERIA TERMICA**



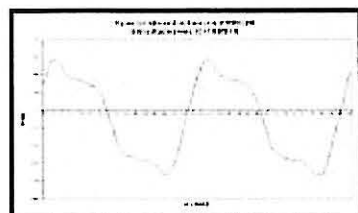
**"Torpedo para Transporte del Arrabio. Simulación Térmico-Mecánica",**

E.T.S. Ingenieros de Minas, Univ. Oviedo (OVIEDO)

Florina Barbés Fernández



**INGENIERIA ELECTRICA**



**"Modelización y Simulación de Máquinas Lineales Asíncronas y Síncronas de Imanes Permanentes",**

Gonzalo Martínez Díez, ETSII de San Sebastián - Universidad de Navarra (SAN SEBASTIAN)



**COSMOS/DESIGNSTAR** The Most Powerful Tool Available for CAD Designers.  
www.cosmosdesignstar.com DESIGN ANALYSIS MADE SIMPLE.

-- <http://www.tecnocae.es> --

-----  
All Rights Reserved.  
[Trademark Information](#)



III Conferencia Anual de Usuarios  
COSMOS/™ 2000



**COSMOS/™**  
Espanña - Portugal

Parque Tecnológico de Zamudio (SPAIN)  
29 de Septiembre de 2000

---

**Encurvadura Lateral de Vigas Submetidas a Elevadas Temperaturas -  
Comparação Numérica**

**Piloto, Paulo<sup>\*</sup>; Vila Real, Paulo<sup>\*\*</sup>**

**RESUMO**

*Embora o fenómeno de encurvadura lateral seja bem conhecido à temperatura ambiente, o mesmo não acontece para situações de temperaturas elevadas. Assim é necessário validar com resultados numéricos e/ou experimentais o estudo deste fenómeno para que seja possível utilizar modelos simplificados em normas, como é o caso do Eurocódigo.*

*Neste artigo será feita uma comparação numérica com vários programas de elementos finitos, nomeadamente o Cosmos/M, o ANSYS 5.5 e o SAFIR, este último desenvolvido na Universidade de Liège para análise de estruturas sujeitas à acção do fogo. Para tal será necessário recorrer a modelações de geometria e de material com comportamentos não lineares. Utilizaram-se vários comprimentos de encurvadura e um tipo de secção recta de perfil comercial, IPE100. Para cada simulação será determinado o carregamento que leva ao colapso do elemento estrutural em estudo.*

*Para cada simulação será imposto um carregamento térmico a temperatura constante e um posterior carregamento mecânico até que o elemento estrutural atinja o colapso. Serão comparados os deslocamentos a meio vão da viga obtidos com os três programas utilizados. Os momentos resistentes à encurvadura lateral obtidos com aqueles programas são também comparados com os resultados do eurocódigo 3 e a nova proposta de Paulo Vila Real.*

*Para cada programa de elementos finitos utilizado será apresentado um resumo da formulação dos elementos em utilização, tendo em consideração o número de graus de liberdade e o respectivo campo de soluções previsto.*

---

<sup>\*</sup> Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, Ap134 5301-857 – Portugal.  
Email: ppiloto@ipb.pt

<sup>\*\*</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810 Aveiro - Portugal.  
Email: pvreal@civil.ua.pt

## NOMENCLATURA

|                                 |                                                                                          |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $M_{b,\bar{f}_i,\theta,Rd}$     | - Momento resistente de cálculo à encurvadura, em situação de incêndio, à temp. $\theta$ |
| $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ | - Esbelteza adimensional à temperatura $\theta$ , no banzo comprimido                    |
| $\chi_{LT,\bar{f}_i}$           | - Coeficiente de redução em situação de incêndio                                         |
| $W_{pl,y}$                      | - Módulo plástico da secção                                                              |
| $k_{y,\theta,com}$              | - factor de redução da tensão de cedência                                                |
| $k_{E,\theta,com}$              | - Factor de redução do módulo de elasticidade                                            |
| $\gamma_{M,\bar{f}_i}$          | - Factor de segurança parcial, igual à unidade                                           |
| $\phi_{LT,\theta,com}$          | - factor intermédio para determinação do factor de redução                               |
| $\alpha$                        | - Coeficiente de imperfeição, em perfis laminados igual a 0.21                           |
| $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ | - Esbelteza adimensional à temperatura $\theta$ , no banzo comprimido                    |
| $\theta_{a,com}$                | - Temperatura do banzo comprimido                                                        |
| $\bar{\lambda}_{LT}$            | - Esbelteza adimensional à temperatura ambiente                                          |
| $u$                             | - Deslocamento lateral da viga ao longo do eixo da viga                                  |
| $v$                             | - Deslocamento vertical no plano de flexão ao longo do eixo da viga                      |
| $\phi$                          | - Rotação da secção recta ao longo do eixo da viga                                       |
| $\delta$                        | - Deslocamento lateral da secção a meio da viga                                          |
| $\theta$                        | - Rotação da secção recta a meio da viga                                                 |
| $E$                             | - Módulo de Young                                                                        |
| $G$                             | - Módulo de rigidez transversal = $E / 2(1 + \nu)$                                       |
| $I_y$                           | - Momento de 2ª ordem relativamente ao eixo yy da secção recta                           |
| $I_w$                           | - Momento à torção                                                                       |
| $J$                             | - Constante de torção                                                                    |
| $M_x$                           | - Momento no plano de flexão, segundo xx                                                 |
| $M_{CR}$                        | - Momento crítico de encurvadura                                                         |
| $M_{Rd}$                        | - Momento plástico da secção                                                             |
| $M_{\bar{f}_i,\theta,Rd}$       | - Momento plástico resistente, em situação de incêndio, à temperatura $\theta$           |
| $\gamma_{M0}$                   | - coeficiente de segurança parcial, igual à unidade                                      |
| $\gamma_{M,\bar{f}_i}$          | - coeficiente de segurança parcial, igual à unidade                                      |
| $k_{E,\theta}$                  | - Factor de redução do módulo de elasticidade, com a temperatura                         |
| $k_{y,\theta}$                  | - Factor de redução da tensão de cedência, com a temperatura                             |
| $F$                             | - Força exterior                                                                         |
| $f_y$                           | - Tensão de cedência                                                                     |
| $f_{y,\theta}$                  | - Tensão de cedência à temperatura $\theta$                                              |
| $E_a$                           | - Módulo de elasticidade do aço                                                          |
| $E_{a,\theta}$                  | - Módulo de elasticidade do aço à temperatura $\theta$                                   |

## 1- INTRODUÇÃO

Os acidentes em estruturas metálicas quando sujeitas a temperaturas elevadas são devidos fundamentalmente à diminuição da capacidade resistente dos seus elementos estruturais. A diminuição dos valores das propriedades mecânicas associadas a um processo de transformação metalúrgica com o acréscimo do processo de fluência, conduzem a comportamentos de instabilidade e de colapso.

A resistência à encurvadura lateral torsional de vigas à temperatura ambiente é bem conhecida e determinada, contudo a mesma situação de instabilidade a elevadas temperaturas aparece indiferenciada relativamente ao nível de temperatura em questão, apresentando-se em [1] uma expressão simplificada que, para certos valores de esbelteza adimensional, não proporciona valores de segurança. Os ensaios experimentais realizados em Portugal [2] permitem validar os resultados numéricos da nova proposta de Paulo Vila Real para este fenómeno [3].

## 2- ENCURVADURA LATERAL TORSIONAL DE VIGAS EM I

Quando uma viga é submetida a um estado de flexão relativamente ao eixo de maior rigidez, a sua secção pode rodar e deslocar-se lateralmente antes de atingir o estado limite de resistência. Este estado limite de instabilidade é normalmente conhecido com encurvadura lateral torsional. A rotação de uma secção recta da viga ocorrerá quando a flange em compressão se torna instável como resultado do nível de tensões axiais induzidas pela flexão. A situação de encurvadura lateral de vigas tem importância relevante quando a flange que está comprimida deste elemento estrutural se encontra lateralmente desprovida de qualquer apoio, como é o caso de vigas contínuas, pilares, vigas encastradas ou outro tipo de estrutura porticada.

O comportamento de instabilidade de uma viga I pode ser traduzido pelos gráficos de deslocamento vertical no plano de flexão “v” e deslocamentos laterais “u” no plano ortogonal, acompanhados por uma rotação da secção  $\phi$ , conforme se ilustra na figura 1.

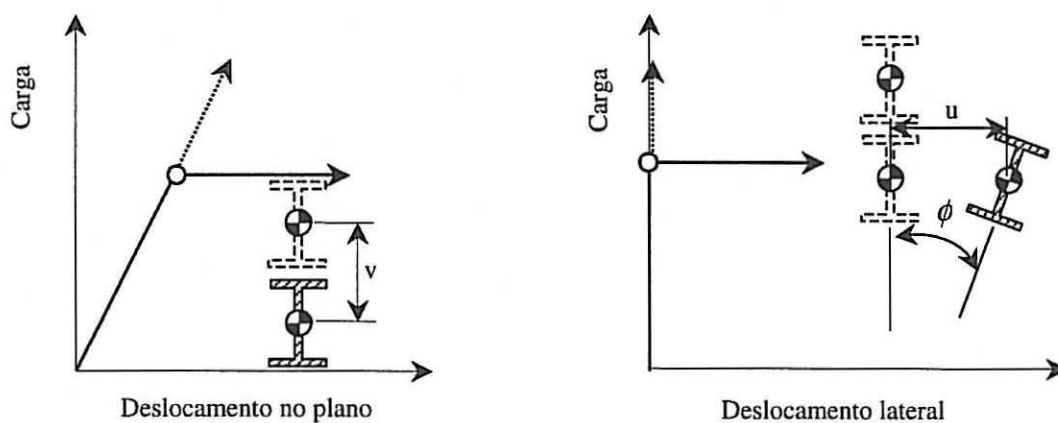


Fig.1- Representação gráfica do movimento da secção resta de uma viga.

Neste caso a rotação por torção faz com que o momento aplicado produza momentos fora do plano original de flexão enquanto que as rotações laterais  $du/dz$  proporcionam o aparecimento de componentes de binários à volta do eixo de rotação que passa pelo centro de corte.

Os métodos de projecto utilizados contra o aparecimento deste fenómeno são essencialmente dois. Primeiro o projectista deverá utilizar secções rectas de viga não susceptíveis de encurvar, como são exemplo as secções do tipo oco e numa segunda possibilidade, utilizar suportes laterais ao longo da viga, quer aumentando o número de apoios quer aumentando a eficiência destes.[4]

O comportamento à temperatura ambiente difere do comportamento à temperatura elevada de 600 [°C] especialmente nos valores máximos dos deslocamentos medidos nas duas direcções e atingidos no instante do colapso e ainda na rigidez, influenciada pela diminuição do valor das propriedades resistentes.

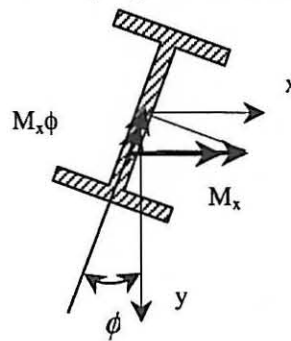


Fig. 2 – Justificação do aparecimento do momento fora do plano de flexão

O equilíbrio da estrutura em regime de encurvadura lateral torsional é determinado pelas equações (1) que representam respectivamente, a igualdade entre a resistência à flexão lateral  $(EI_y u''')$  e a acção de momento lateral presente por rotação da secção  $-(M_x \phi)''$ , enquanto que a segunda representa a igualdade entre a soma do empenamento interno com a resistência à torção  $[(EI_w \phi'') - (GJ \phi)']$  e o momento gerado pelo empenamento e rotação da viga.

$$\begin{aligned} (EI_y u''') + (M_x \phi)'' &= 0 \\ (EI_w \phi'') - (GJ \phi)' + (M_x u'') &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Estas equações diferenciais podem apresentar alguma dificuldade de resolução, principalmente quando os coeficientes de cada parcela não são constantes.

Admitindo que a distribuição de momento flector é constante, pode ser verificado que uma das soluções possíveis para solução das equações diferenciais pode ser a expressão (2) ou eventualmente uma solução polinomial de segundo grau.

$$\frac{u}{\delta} = \frac{\phi}{\theta} = \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad (2)$$

Esta expressão permitirá a determinação do momento crítico de encurvadura lateral.

## 2.1- Determinação analítica da carga crítica

Um dos métodos utilizado para determinar a carga crítica recorre à equação da energia e a consequente substituição da expressão (2), como solução para este tipo de comportamento.

$$\frac{1}{2} \int_0^L (EI_y u''^2 + EI_w \phi''^2 + GJ \phi'^2) dz + \frac{1}{2} \int_0^L 2M_x \phi u'' dz = 0 \quad (3)$$

Esta expressão aparece apenas com o efeito exterior de um carregamento uniforme de momento, não contabilizando qualquer efeito transversal de esforço. Depois da substituição da solução admitida na expressão (3) e da integração, admitindo que a solução homogénea não é única, conclui-se que o valor do momento ou da carga crítica em regime elástico será dada pela seguinte expressão

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \times \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + L^2 \times \frac{GI_t}{\pi^2 EI_z}} \quad (4)$$

A determinação deste momento crítico é importante para calcular o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral pelo Eurocódigo 3, de acordo com as expressões (5) à (10).

## 2.2- Momento resistente à encurvadura lateral pelo Eurocódigo 3

Segundo o Eurocódigo 3, o momento resistente de uma viga não restringida lateralmente, com uma secção recta da classe 1 ou 2 e em caso de incêndio é dada por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} w_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (5)$$

Sempre que a esbelteza adimensional  $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$  para a situação de temperatura máxima no banzo comprimido de  $\theta_{a,com}$ , atingida no instante t, que seja inferior a 0.4 não há necessidade de verificação à encurvadura lateral torsional. Para casos de esbelteza adimensional superiores a 0.4, o valor de momento resistente à encurvadura deverá ser determinado de acordo com a expressão (5). Nesta expressão  $\chi_{LT,fi}$  representa o coeficiente de redução,  $w_{pl,y}$  o valor do módulo plástico da secção da viga,  $k_{y,\theta,com}$  o factor de redução da tensão de cedência que traduz o efeito desta propriedade à temperatura máxima do banzo comprimido  $\theta_{a,com}$  atingida no instante t. 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:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (6)$$

com

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} [1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} - 0.2) + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2] \quad (7)$$

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.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (8)$$

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 à temperatura do banzo comprimido  $\theta_{a,com}$ , atingida no instante t. O parâmetro  $\alpha$  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]

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

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \quad (9)$$

com  $\lambda_{LT}$  a ser calculado através da expressão seguinte

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\pi^2 \times E \times \frac{W_{pl,y}}{M_{cr}}} \quad (10)$$

Para temperaturas elevadas o momento resistente e à encurvadura lateral do elemento estrutural e o momento plástico está representado na figura 3. Nesta figura está representada também a nova proposta de Paulo Vila Real [3], podendo verificar-se a falta de segurança do eurocódigo 3 relativamente a esta última, para algumas esbeltezas adimensionais de vigas.

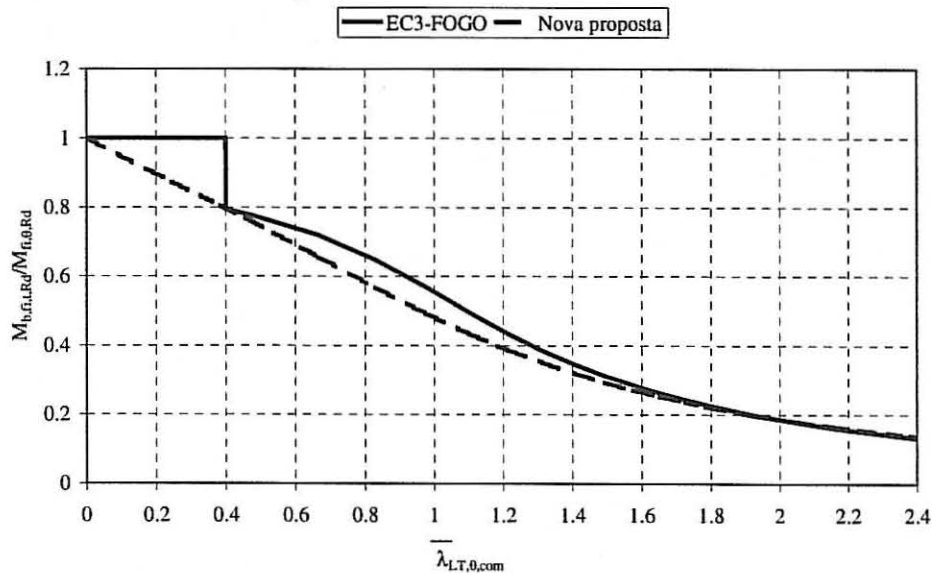


Fig.3- Curva de projecto à encurvadura segundo o Eurocódigo 3 e nova proposta.

A determinação do valor do momento resistente de cálculo à encurvadura, segundo o Eurocódigo é feita através da expressão (5), enquanto que o momento plástico da secção é determinado de acordo com a expressão

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} M_{Rd} \quad (11)$$

onde  $M_{Rd}$  representa o momento plástico, o qual poderá ser calculado através da seguinte expressão

$$M_{Rd} = \frac{w_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

Os coeficientes de segurança parciais,  $\gamma_{M0}$  e  $\gamma_{M,fi}$  devem ser tomados iguais à unidade.

## 2.2- Caso em estudo

Neste artigo serão estudados três casos particulares de comprimentos de viga com 1.5, 2.5 e 4.5 [m] de comprimento entre os dois apoios de forquilha, ver figura 4, carregada na extremidade por uma força que irá ser incrementada progressivamente até atingir o valor crítico.

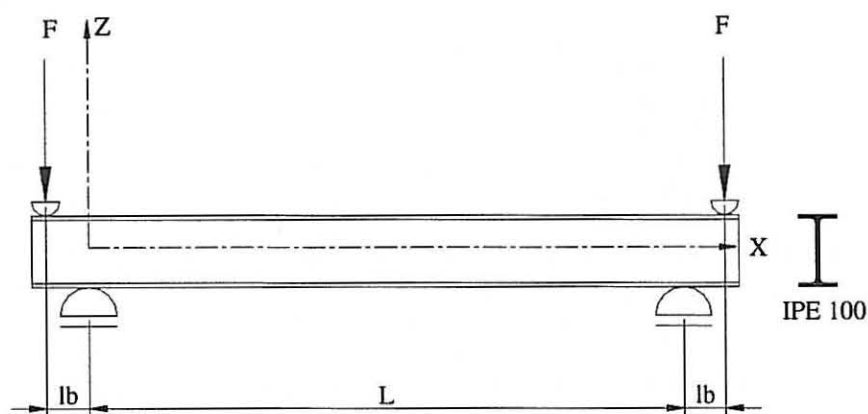


Fig.4 - Caso de estudo. Viga simplesmente apoiada, com  $lb=0.23[m]$ .

Admitir-se-á que a viga é primeiro aquecida até à temperatura de 600 °C sendo-lhe posteriormente aplicado o carregamento de acordo com a lei representada na figura 5.

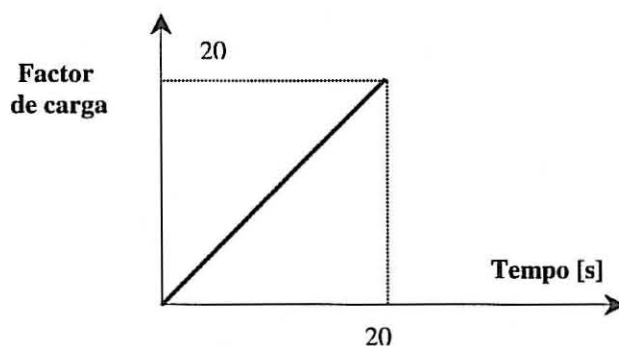


Fig. 5- Evolução do factor de carga F.

A integração no tempo será feita com incrementos da ordem de 0,001 [s], correspondentes a aumentos de 1 [N] em cada incremento de tempo, podendo eventualmente sujeitar-se a incrementos de tempo ajustados. A precisão de cálculo foi mantida nos 0.0001, enquanto que o método numérico utilizado para integração no tempo recorre ao Método de Newton Raphson.

### 3- PROPRIEDADES DO MATERIAL EM SITUAÇÃO DE TEMPERATURAS ELEVADAS

Na modelação numérica do acidente fogo, as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais e as suas leis constitutivas apresentam uma influência muito grande nos resultados. Assim, uma modelação mais ou menos refinada numericamente só será válida utilizando modelos e propriedades mais próximas da realidade possíveis.

As propriedades térmicas e mecânicas do aço são apresentadas no Eurocódigo 3 parte 1.2 e no Eurocódigo 3 parte 1.1, sendo consideradas como valores característicos.

#### 3.1- Propriedades mecânicas

Os primeiros modelos estabelecidos para representar o comportamento do aço numa situação de incêndio, utilizavam métodos simples de cálculo. Assim, os primeiros trabalhos sobre este assunto consistiam em extrapolar para as elevadas temperaturas o comportamento do aço observado à temperatura ambiente.

No modelo apresentado recorre-se aos valores tabelados para a relação tensão deformação em função dos níveis de temperatura esperados [1]. O modelo elíptico deverá ser considerado de acordo com a figura seguinte.

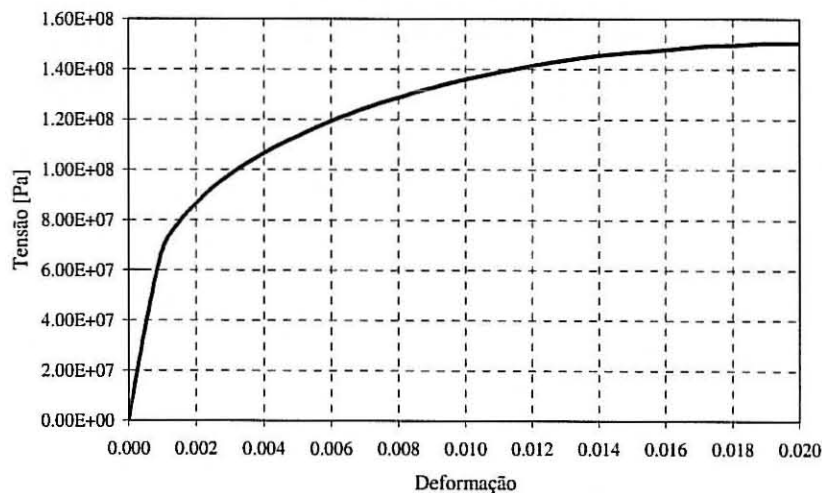


Fig.6 – Relação tensão deformação a 600 [°C].

O módulo de elasticidade do aço foi estudado por diversos investigadores, nomeadamente pelo autor da referência [5], sendo de realçar que decresce com o aumento da temperatura, e de uma forma mais acentuada que o limite de elasticidade. Também aqui foram utilizados os valores propostos no documento em referência, sendo de admitir o valor constante durante todo o processo de carregamento mecânico. Na figura 7 apresentam-se os valores destas propriedades relativamente ao valor determinado à temperatura ambiente, através dos respectivos factores de redução.

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad ; \quad k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (13)$$

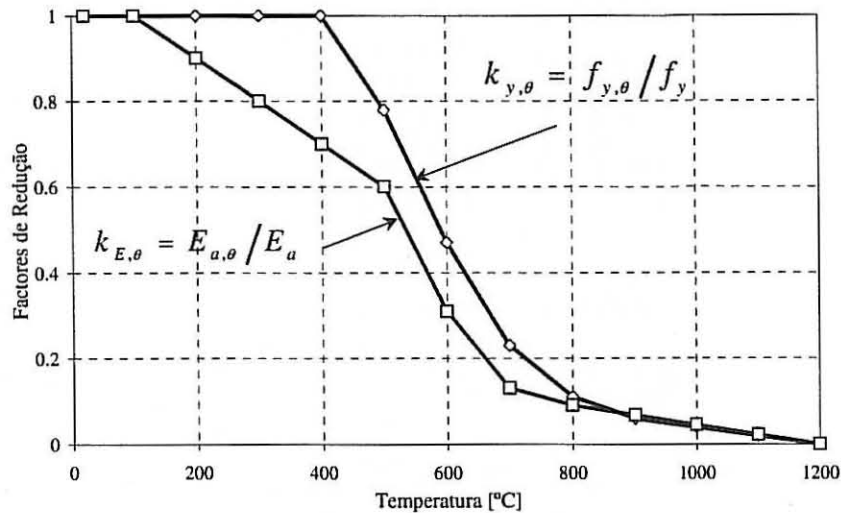


Fig. 7- Evolução dos factores de redução das propriedades mecânicas.

Conforme se poderá verificar, o módulo de elasticidade diminui substancialmente a partir dos 450 [°C], iniciando a tendência perto dos 200[°C]. O respectivo decréscimo é maior que a diminuição da tensão de cedência.

Rubert e Schaumann nos seus trabalhos [6] que serviram de base aos resultados apresentados nos Eurocódigos, estabeleceram um modelo de comportamento onde a fluência do material seria considerada de uma forma implícita. Os ensaios instacionários de flexão efectuados sobre vigas IPE80 e IPE120 submetidas a uma taxa de aquecimento variável entre 2.67 e 32 [°C/min] permitiram estabelecer uma expressão analítica do tipo elíptico que antecede a cedência do material.

Os valores utilizados na modelação numérica correspondem a temperaturas constantes, partindo do pressuposto que a viga se encontrará a uma temperatura uniforme de 600 [°C], depois de se ter possibilitado a sua expansão livre, antes do carregamento mecânico. Nestas condições o valor tabelado de E e de  $f_{y,\theta}$  correspondem à proposta de evolução elíptica apresentada na figura 6.

### 3.2- Propriedades térmicas

A equação empírica de Fourier que governa a condução do calor em corpos sólidos, faz intervir três propriedades dos materiais. A massa volúmica, o calor específico e a condutividade. Relativamente às propriedades térmicas e de acordo com os Eurocódigos, as propriedades relevantes para o aço com interesse para o tratamento térmico transiente são as duas primeiras, enquanto que para ambos os regimes será necessário utilizar a condutividade.

No intervalo de temperaturas em que se deverá contemplar a variação das propriedades térmicas, verifica-se um fenómeno predominante entre os 600 e 800 [°C], transformação alotrópica, responsável pela alteração de fase do material em estudo.

Considera-se constante e independente da temperatura o valor da massa volúmica em 7850 [kg/m<sup>3</sup>].

A variação das propriedades perto dos valores referidos é por demais evidente, tendo em consideração o aspecto visual que apresenta uma viga a 600[°C].

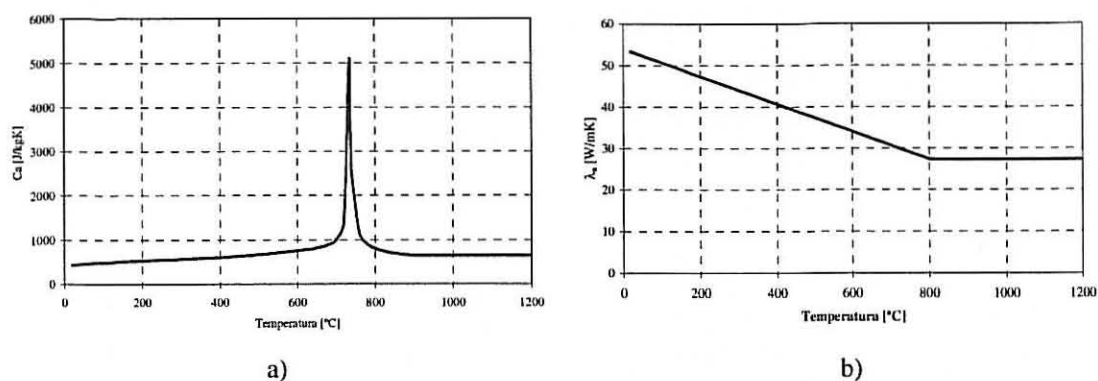


Fig. 8 – Variação das propriedades térmicas com a temperatura.

#### 4- MODELOS NUMÉRICOS

Em qualquer dos modelos apresentados procedeu-se a discretização do elemento estrutural em 11 elementos do tipo viga e recorrendo às características de simetria material e de carregamento, foi apenas modelada meia viga. Os apoios simulados impedem o deslocamento na direcção vertical, axial e lateral, para além de impedir a rotação da secção. Na outra extremidade do modelo foram aplicadas as condições de simetria, ou seja, rotações em  $zz$  e em  $y$  impedidas.

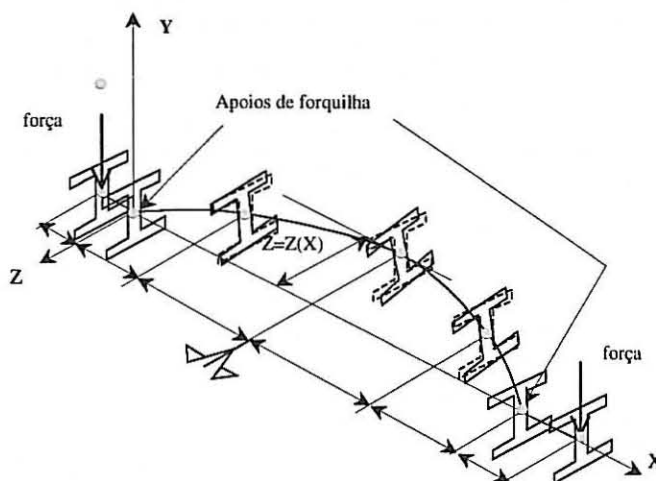


Fig. 9- Imperfeição geométrica introduzida. Modelo de viga completa.

Todas as simulações recorreram a uma pequena imperfeição geométrica inicial, facto que se poderá verificar em todos os perfis comerciais, devido ao seu processo de armazenamento, transporte e fabrico. Nos ensaios efectuados estes valores foram medidos e introduzidos nas várias simulações numéricas.[7] Neste estudo optou-se por utilizar uma variação sinusoidal do tipo da equação 14.

$$Z = Z(x) = \frac{L}{1000} \sin\left(\frac{\pi \times x}{L}\right) \quad (14)$$

em que  $L/1000$  representa o valor da máxima amplitude da imperfeição a meio vão da viga.

Não foram consideradas tensões residuais, ao contrário do que se poderá verificar na realidade. Estes constrangimentos decorrem do processo de fabrico, sobretudo devido ao processo de arrefecimento não uniforme (ver figura 10).

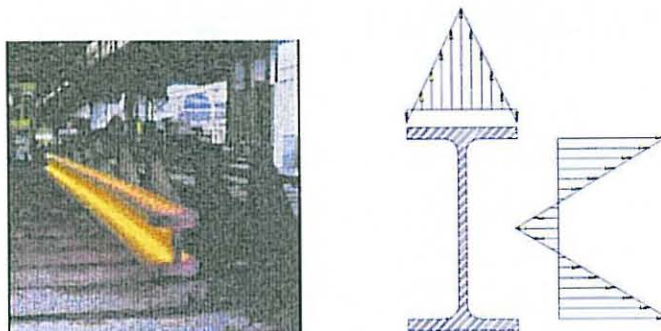


Fig. 10- Arrefecimento não uniforme das vigas metálicas laminadas a quente.

O efeito térmico foi previamente estabilizado, tendo-se utilizado o valor de todas as propriedades a 600[°C], durante todo o processo de carregamento.

#### **4.1- Formulação tridimensional com elementos de viga**

Os elementos finitos utilizados para resolução do fenómeno de encurvadura lateral de vigas apresentam características diferentes, pelo que será apresentado um pequeno resumo das suas características, capacidades e limitações.

##### **4.1.1- O elemento de viga do programa COSMOS/M**

O elemento de viga disponível em Cosmos/M possibilita o estudo elasto-plástico de uma estrutura ou elemento, apresentando dois nós para definir o eixo do elemento, mais um terceiro para definir a orientação da secção recta. Em cada um dos primeiros nós, existem seis graus de liberdade (três translações e três rotações). O elemento pode apresentar secções simétricas e não simétricas, possibilitando a introdução da posição do centro de corte relativamente ao centroíde. O elemento apresenta a possibilidade de formulação de grandes deslocamentos, para além de modelos de comportamento de material não linear.

A biblioteca de elementos possui ainda a possibilidade da definição de secções rectas em I, calculando internamente as constantes à torção.

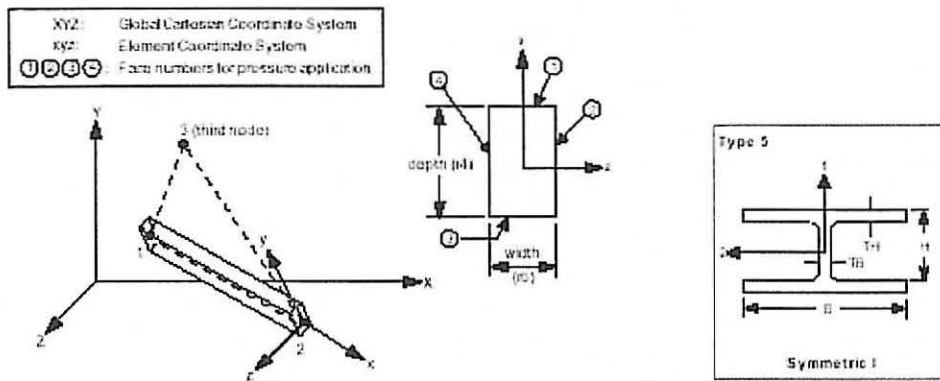


Fig. 11 – Elemento de viga tridimensional do programa CosmosM.

Este elemento não possui capacidades de cálculo de empenamento por torção, nem de termo-plasticidade, motivo pelo qual se efectuou a simulação com as propriedades a manterem-se constantes durante o processo de carregamento. Este facto não deverá afastar-se da realidade, com a excepção da verificação de fenómenos de fluência associados.

#### 4.1.2- O elemento de viga do programa SAFIR

O elemento de viga formulado em SAFIR apresenta 3 nós que definem a orientação do eixo da viga, mais um quarto nó para orientação da secção recta. No total são 15 graus de liberdade, conforme se apresenta na figura 12.

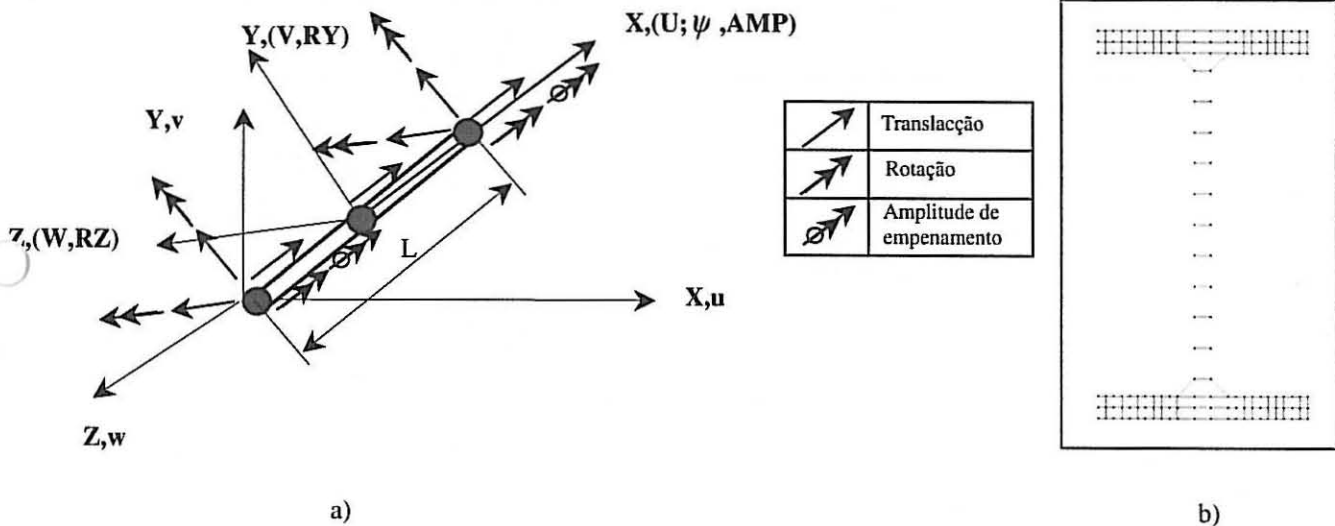


Fig. 12 – Elemento de viga tridimensional do programa SAFIR

No seu nó central, é introduzida uma componente do deslocamento axial U, afectando-o com capacidades não lineares (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 [8] determina que a deformação não seja constante sobre o elemento.

A secção recta de cada elemento de viga é discretizada conforme figura 12b, em que cada elemento bidimensional é tratado como uma fibra, com igual comportamento em toda a extensão do elemento. Esta discretização possibilita a introdução de estados de tensão diferentes em cada ponto do seu domínio, para além de possibilitar o tratamento térmico não uniforme e de ao mesmo tempo permitir a definição do fenómeno de torção com mais pormenor. Assim podem ser determinadas as constantes de torção bem como as funções de empenamento.

#### 4.1.3- O elemento de viga do programa ANSYS

O elemento uniaxial de secção recta arbitrária utilizado neste estudo apresenta capacidades de tracção, compressão, flexão e de torção pela teoria de St. Venant. O elemento possui igualmente seis graus de liberdade por cada nó (três translações e três rotações) e permite estudar o comportamento de plasticidade e fluência na direcção axial da viga.

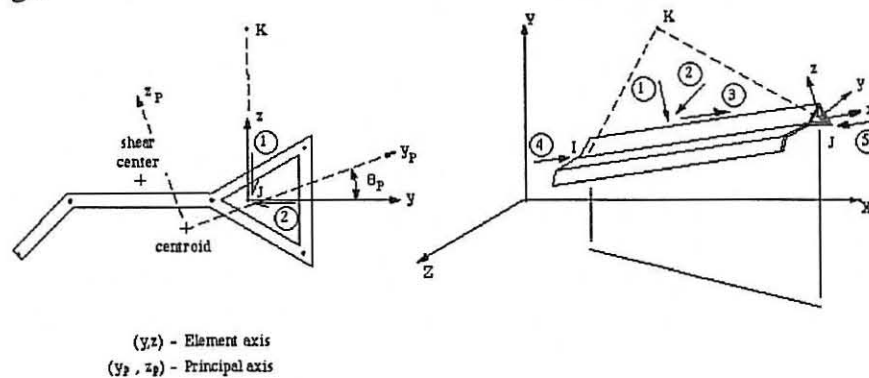


Fig. 13- O elemento de viga tridimensional do programa ANSYS.

O empenamento por torção é assumido como desprezável e o seu momento de inércia não é utilizado no cálculo da matriz rigidez.

#### 4.2- Comparação de resultados

Tendo em consideração as diferenças de formulação e o número de graus de liberdade que cada elemento apresenta, segue-se um estudo comparativo para a encurvadura lateral de vigas com três comprimentos diferentes 1.5, 2.5 e 4.5.

Os valores dos momentos resistentes à encurvadura lateral apresentados na tabela 1, demonstram a existência de pequenas diferenças entre os resultados numéricos obtidos e o valor analítico determinado pela referência [1].

| VIGAS[m] | COSMOS/Mv2.5 | Δ%   | ANSYS 5.5 | Δ%   | SAFIR 98 | Δ%   | EUROCÓDIGO | Δ% |
|----------|--------------|------|-----------|------|----------|------|------------|----|
| 1.5      | 2311.5       | -17  | 2389.9    | -15  | 2616.0   | -6.9 | 2811.3     | 0  |
| 2.5      | 1825.5       | +4.4 | 1815.2    | +3.8 | 1905.6   | +9.0 | 1747.9     | 0  |
| 4.5      | 1136.2       | +0.9 | 1123.5    | -0.2 | 1168.4   | +3.7 | 1125.9     | 0  |

Tabela 1- Comparação de valores dos momentos resistentes à encurvadura.

Os deslocamentos verticais, laterais e de rotação, a meio da viga, foram determinados e comparados em função da carga aplicada. Na figura 14a, 14b e 14c encontram-se representados os deslocamentos no plano do carregamento, para cada comprimento de viga, sendo evidenciada a curvatura na zona ascendente, instantes antes de se atingir o colapso.

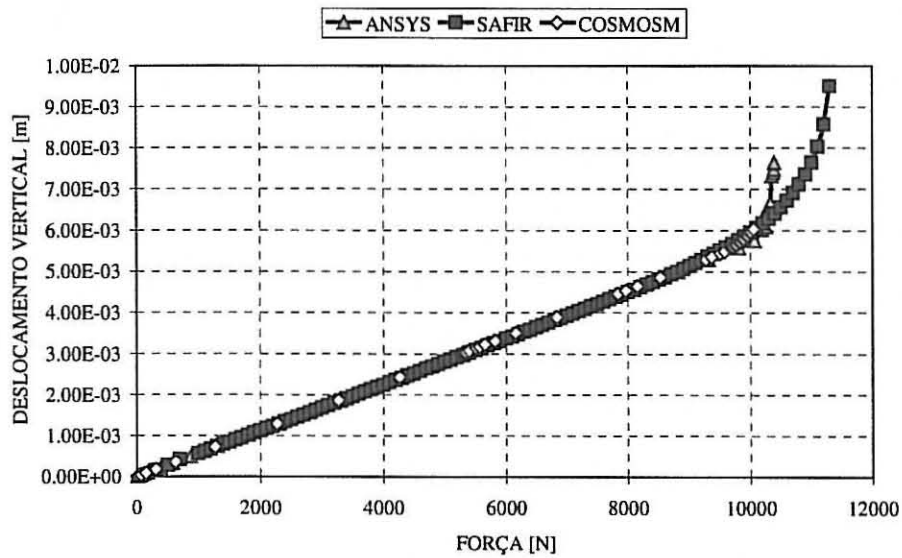


Fig 14a - Deslocamento vertical a meio vão para vigas de 1.5 [m].

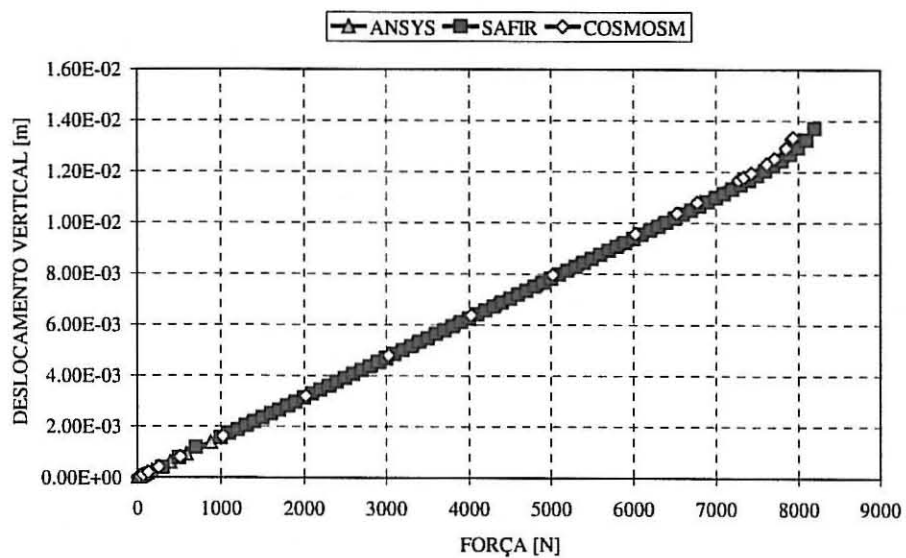


Fig 14b - Deslocamento vertical a meio vão para vigas de 2.5 [m].

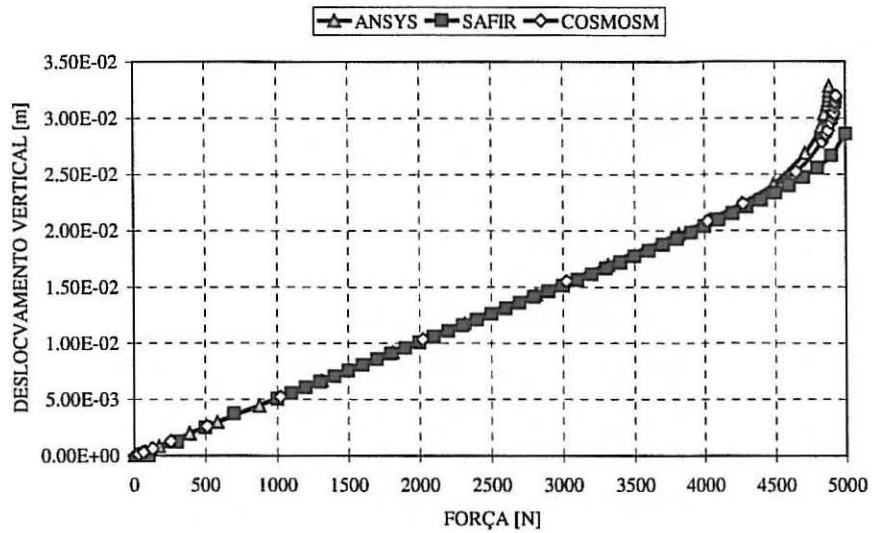


Fig 14c - Deslocamento vertical a meio vão para vigas de 4.5 [m].

Conforme se poderá verificar o valor da carga de colapso diminui com o aumento do comprimento da viga, embora o deslocamento máximo seja atingido para o caso de viga de maior comprimento.

Os deslocamentos laterais da secção a meio vão da viga em função da carga estão representados nas figuras 15a, 15b e 15c..

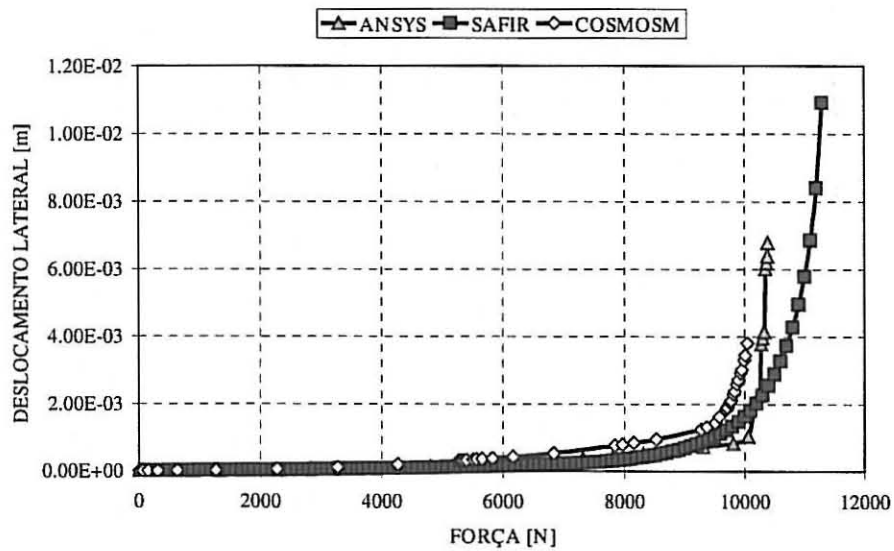


Fig 15a - Deslocamento lateral a meio vão para vigas de 1.5 [m].

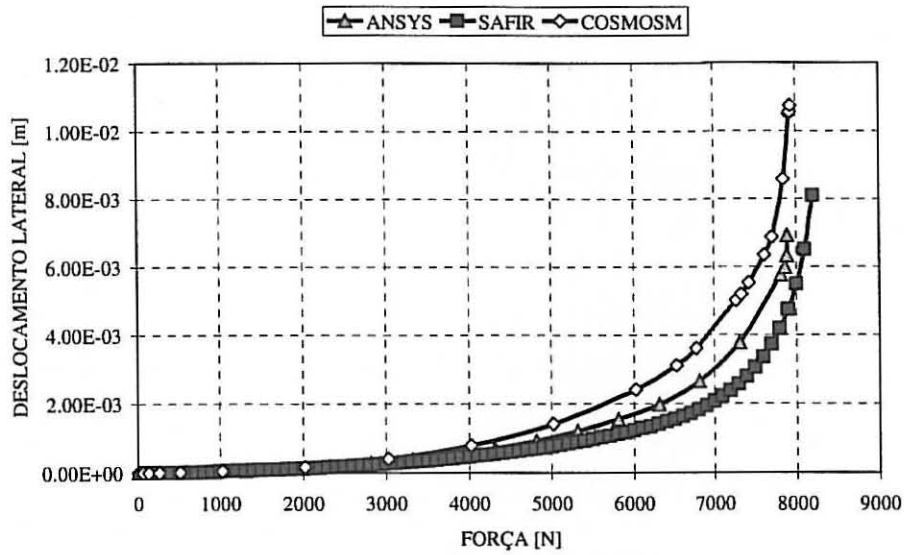


Fig 15b - Deslocamento lateral a meio vão para vigas de 2.5 [m].

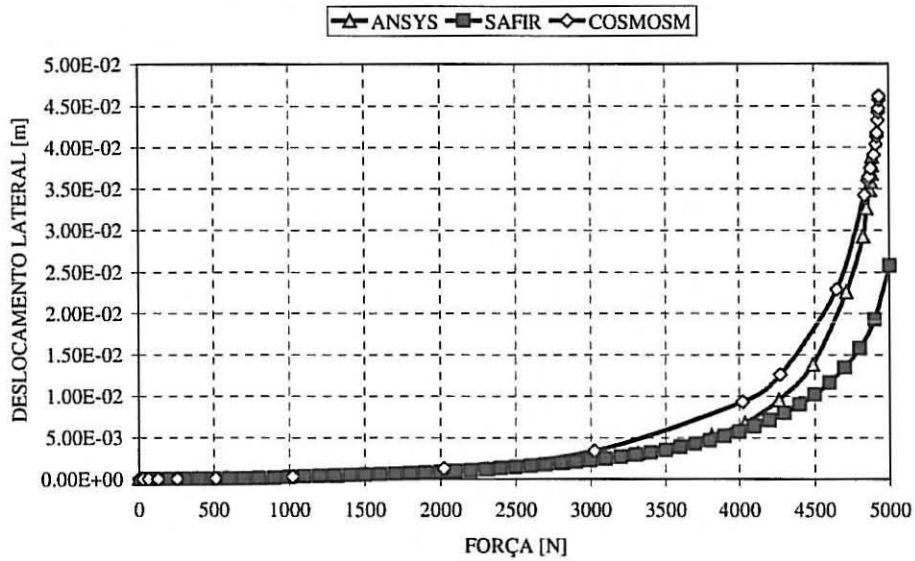


Fig 15c - Deslocamento lateral a meio vão para vigas de 4.5 [m].

Relativamente à rotação da secção, representada na figura 16, é notório uma maior resistência à torção na simulação do SAFIR que deve estar associada a discretização da secção e às respectivas propriedades de resistência à torção e ao empenamento.

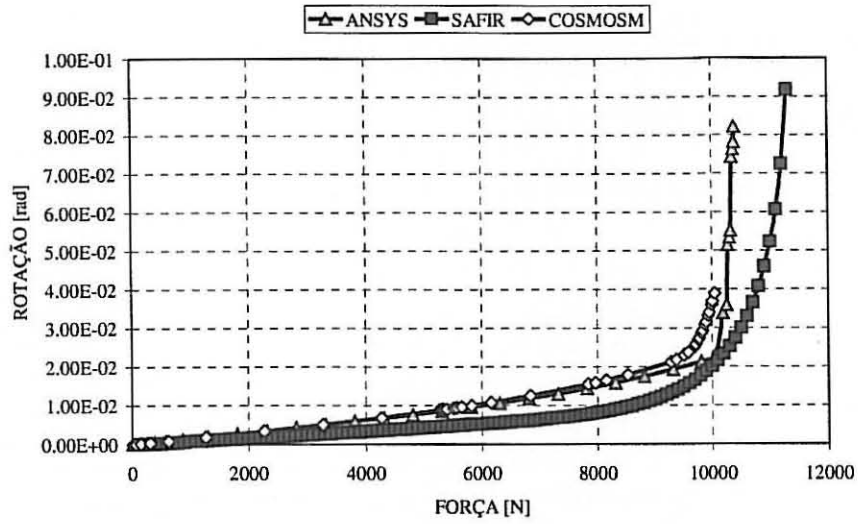


Fig 16a - Rotação a meio vão para vigas de 1.5 [m].

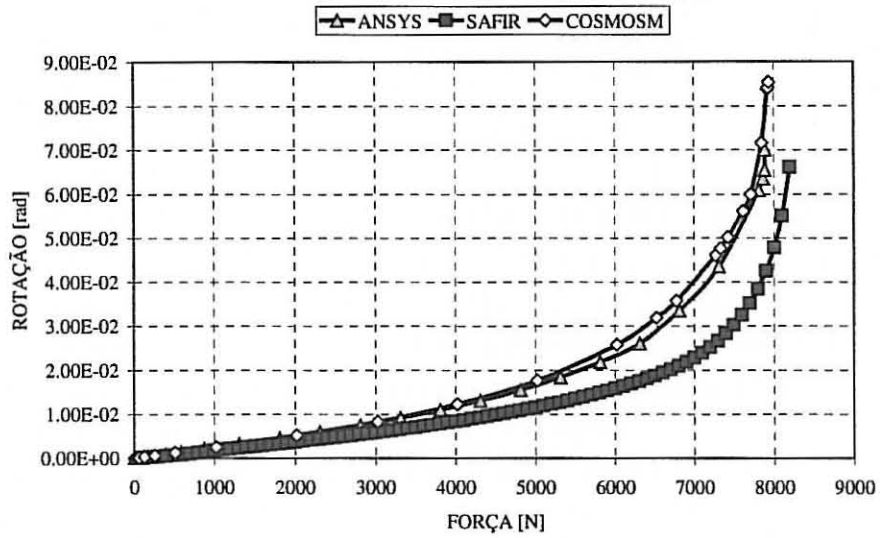


Fig 16b - Rotação a meio vão para vigas de 2.5 [m].

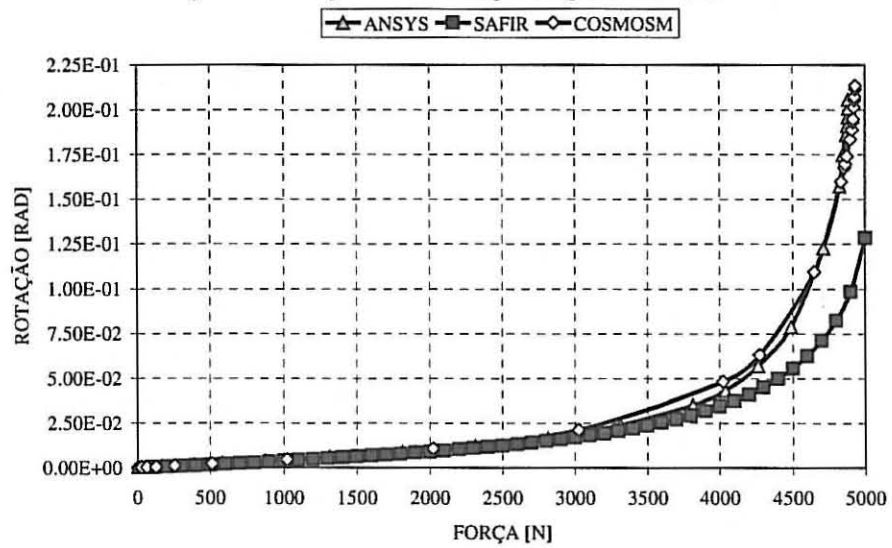


Fig 16c - Rotação a meio vão para vigas de 4.5 [m].

## 5- AJUSTAMENTO DOS RESULTADOS FACE À NOVA PROPOSTA

Os resultados obtidos com os três programas são comparados na figura 17 com as curvas de encurvadura do eurocódigo 3 e da nova proposta de Paulo Vila Real [3]. O valor de  $M_{fi,\theta,Rd}$  para este tipo de secção recta de perfil vale 6144 [Nm], tendo sido utilizada uma tensão de cedência de 320 [Mpa] à temperatura ambiente.

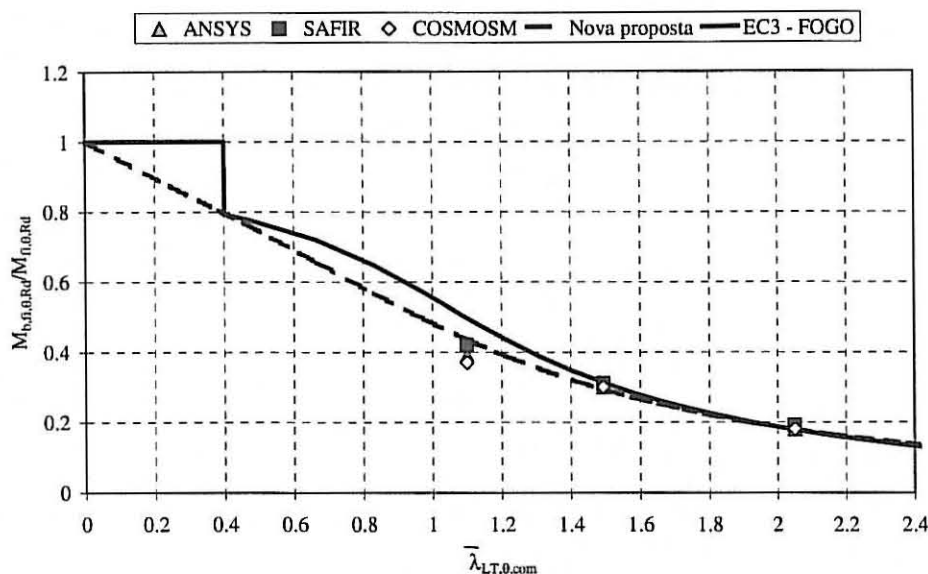


Fig. 17 - Comparação dos valores de momento resistente à encurvadura, utilizando vários programas.

Face às duas curvas em evidência é notória a falta de segurança para esbeltezas adimensionais da ordem de 0.9. Para as restantes esbeltezas ensaiadas, os resultados apresentam uma concordância com os documentos já citados.

## 6- CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitiram comparar o desempenho de três programas, dois dos quais comerciais, ao simular o fenómeno de encurvadura lateral em vigas, quando submetidas a temperaturas elevadas.

A degradação das propriedades mecânicas associadas ao fenómeno de instabilidade limitam a utilização de determinados perfis metálicos, devendo o projectista optar por soluções de perfis de maiores dimensões, eventualmente protegidos com placas ou tintas intumescentes, anulando o efeito negativo de um possível incêndio.

Com a utilização de diferentes programas de elementos finitos e diferentes formulações ficou demonstrada a falta de segurança da curva proposta pelo Eurocódigo. A proposta alternativa é função do material, ao contrário da referência anterior.

## 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]- ECS ENV 1993-1-2; “Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”; 1995.
- [2]- Piloto, P.A.G.; Vila Real, P.M.M.; “ A simple model for lateral torsional buckling resistance of steel I beams under fire condition – comparison with experimental results”; 3<sup>rd</sup> international conference in Mechanics and Materials in Design (M2D); Orlando, Florida, 29 a 31 de Maio de 2000.
- [3]- 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 Charpents – of the University of Liege.
- [4]- Trahair N.S. ; “Flexural Torsional Buckling of structures; E&FN SPON Chapman & Hall; London; 1993.
- [5]- Anderberg Y.; “Behaviour of steel at high temperatures”; Rilem-Committee 44-PHT; 1983.
- [6]- Rubert, A., Schaumann, P.; “Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften von baustahl brandbeanspruchung”; Stahlbau, 54, h.3, 1985.
- [7]- Piloto, P.A.G., “Modelação numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo”; tese apresentada para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica; Universidade do Porto; Setembro de 2000.
- [8]- Boerave, P.; “Contribution à l’analyse statique non linéaire des structures mixtes planes formées des poutres, avec prise en compte des effectes différés et des phases de construction”; thèse de doctorat; Univ. de Liège; 1991.