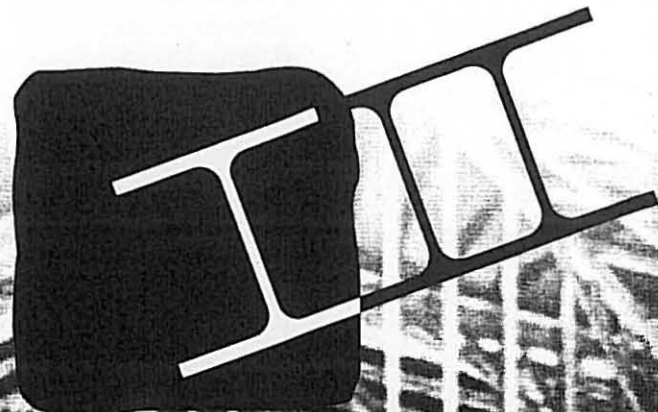


USA 10



Construção Metálica e Mista 3

ANTÓNIO LAMAS

PAULO VILA REAL

LUÍS SIMÕES DA SILVA

Construção Metálica e Mista 3

Actas do III Encontro de
Construção Metálica e Mista

Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
6 e 7 de Dezembro, 2001

António Lamas

Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Paulo Vila Real

Secção Autónoma de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

Luís Simões da Silva

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

**cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro**

Construção Metálica e Mista 3

Copyright © 2001 por António Lamas, Paulo Vila Real, Luís Simões da Silva

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

1ª Edição
Dezembro, 2001

Tiragem: 400 exemplares

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: 173320/01
ISBN: 972-98376-2-7

Coordenação Editorial: Paulo Vila Real
Concepção Gráfica da Capa: A. Rui J.
Paginação: Fundação João Jacinto de Magalhães
Impressão: Tipave, Indústrias Gráficas de Aveiro, Lda.

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.

Comissões
Exposição Técnica
Patrocínios
Prefácio

SECÇÃO I

- European Re
Concrete Stru
Plumier, André
- Nuevo Puente
Prieto, Pablo F
- Steelworks in
Mazzolani, Fe
- Fire Safe Des
Schleich, Jean
- A Construção
Mota Freitas,
- Presentation
Gendebien, G
- Construir co
Castanheira, C
- Estádios par
Reis, A. J.
- Promover o
Lamas, Antón
- Ponte Pedon
Fonseca, A. A
- Ponte Pedon
Graça, J. L. C

SECÇÃO II

- Experiment
Majowiecki,
- Cobertura e
Abecasis, Ti
- Coberturas
Silva, Antón

5dígitos”, Betão
pp. 305-318,

ação, Dec. Lei

abelecimentos
tra riscos de
8/99 de 18 de

os Locais e
os Públicos e
sse Público e
tros, nº 31/89

tros Urbanos

e Restauração

ministrativo,

s, Dec. Lei nº

o Hospitalar,

stacionamento

n structures –
ire”; February

t 1-2: General

geometrically
Civil; Service

s – Part 1-1:

eral Buckling
Eurocode 3”,
arch, Elsevier

a structures –

“Explanatory
ice of Steel

COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DE VIGAS COM RESTRIÇÃO À DEFORMAÇÃO AXIAL SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

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

RESUMO

O comportamento de estruturas metálicas a temperaturas elevadas tem sido conhecido pelo domínio dos efeitos de perda de resistência causada pela degradação térmica das propriedades, imposta nas acções de acidente tipo fogo. Para além desta constatação, a resposta de estruturas sob acção do fogo é largamente influenciada pelas forças e deslocamentos induzidos termicamente. Este artigo pretende apresentar alguns dos princípios mais importantes e fundamentais que governam o comportamento de elementos estruturais, ou seja, através da resposta de elementos estruturais simples sob combinação de acções térmicas e de condições fronteira, representativas das zonas envolventes de uma estrutura. São apresentados resultados de ensaios experimentais e numéricos, baseados em análises não lineares materiais e geométricas.

1- INTRODUÇÃO

O avanço na compreensão do comportamento de estruturas sob a acção do fogo, tem sido considerável ao longo destes últimos anos. Em teoria, estes avanços tornam possível que os projectistas de estruturas nestas condições tratem o projecto de uma forma integrada, conjuntamente com os outros tipos de carregamento, utilizando métodos de cálculo preconizados em vários códigos, como são o caso dos métodos avançados de cálculo do Eurocódigo. Estes são baseados em modelos numéricos de comportamento não linear material e geométrico. Os resultados numéricos apresentados são baseados num programa de elementos finitos especialmente desenvolvido para analisar o comportamento de estruturas sujeitas à acção do fogo, desenvolvido na Universidade de Liège. A utilização deste tipo de ferramentas, nem sempre disponível em gabinetes de projecto, podem ser substituídos por métodos de cálculo mais simples, baseados em expressões analíticas, validadas por via experimental e por via numérica.

¹ Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança, Dep. de Mecânica Aplicada; 5301-857 Bragança.

² Professor Associado, Universidade de Aveiro, Dep. de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental e numérico que teve por base o trabalho desenvolvido por Rotter e Usmani¹.

2 – FUNDAMENTOS

A relação fundamental que governa o comportamento de estruturas, quando submetidas ao efeito térmico é:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + \varepsilon_m \quad (1)$$

em que ε_t representa o valor da deformação total, ε_{th} representa a deformação térmica e ε_m o valor da deformação mecânica. A deformação total governa a forma deformada da estrutura, através de relações cinemáticas ou de considerações de relações de compatibilidade.

Quando as deformações térmicas são livres de se desenvolver sem qualquer restrição imposta pelas condições fronteiriças e quando não se verifica qualquer carregamento externo, a expansão ou o empenamento térmico resultam de um estado de deformação definido por:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} \quad (2)$$

Por outro lado, quando as deformações térmicas forem totalmente impedidas, mesmo sem carregamento externo, as tensões térmicas e as zonas plastificadas resultam de:

$$\varepsilon_{th} + \varepsilon_m = 0 \quad (3)$$

O factor mais importante que determina o comportamento da estrutura submetida a temperaturas elevadas é a maneira como responde às inevitáveis deformações térmicas induzidas nos elementos. Estas deformações tomam a forma de expansões térmicas produzindo um aumento de comprimento do elemento, por aquecimento uniforme da secção recta ou uma curvatura do mesmo, no caso de se verificar um gradiente na secção do elemento.

No caso do elemento estrutural possuir reduzida restrição ao deslocamento axial relativamente à expansão térmica, as deformações são traduzidas em deslocamentos axiais, produzindo uma resposta dominada pelos deslocamentos. Os gradientes térmicos que induzem o empenamento do elemento quando as extremidades do elemento são livres de rodar, produzem grandes deslocamentos, também.

Os elementos que possuem grandes restrições à deformação axial, produzem deformações mecânicas opostas às deformações por expansão térmica, conduzindo ao estabelecimento de um estado de tensão de compressão. Os elementos quando solicitados a gradientes térmicos e com restrição à rotação das suas extremidades, podem originar grandes momentos de flexão, sem que possam ocorrer grandes deslocamentos. O efeito de curvatura induzida em elementos cujas extremidades não possuem constrangimentos relativamente à rotação, mas possuem relativamente à translação, produz um estado de tensão de tracção.

Assim, para a mesma deformação num elemento estrutural, pode ocorrer uma grande variedade de situações relativamente ao estado de tensão, como por exemplo: grandes compressões quando o elemento se encontra constrangido axialmente, pequenas tensões quando a expansão e o empenamento se balançam um ao outro e nos casos em que o empenamento térmico é dominante, as tensões de tracção aparecem em elementos constrangidos axialmente e sem constrangimento relativo às rotações, enquanto que grandes momentos de flexão são originados essencialmente em elementos constrangidos por rotações na extremidade. Esta variedade de respostas pode existir em estruturas reais, tendo em

consideração os com uma eleva contraste com temperaturas ao

Um grau complexo de de mecânicas devi situação pode le da tensão de ced

Estas sit casos apresentac

3 – CASO EST

O caso experimental es distribuído uni aquecimento uti



Figura 1 –

Os desloc restrição aos de longitudinal da comprimento de por deslocamen

4- EFEITO TÉ

O aquec expressão:

em que α_{th} re aumento da tem

teve por base o

aturas, quando

(1)

térmica e ε_m o da da estrutura, dade.

alquer restrição iento externo, a finido por:

(2)

as, ϕ mo sem

(3)

ira submetida a iações térmicas nsões térmicas òrme da secção e na secção do

ocamento axial amentos axiais, s térmicos que o são livres de

xial, produzem conduzindo ao do solicitados a originar grandes ito ϕ urvatura relativamente à de tracção.

rrer uma grande emplo: grandes equenas tensões asos em que o em elementos nto que grandes dos por rotações reais, tendo em

consideração os diferentes estados de aquecimento a que pode estar submetida. Um acidente com uma elevada taxa de aquecimento pode produzir elevados gradientes térmicos, em contraste com um aquecimento mais lento, possibilitando a uniformização do campo de temperaturas ao longo e na secção do elemento estrutural.

Um grande número de situações de incêndio em estruturas reais, possui um estado complexo de deformações mecânicas originadas pelo carregamento mecânico e deformações mecânicas devidas ao estado de constrangimento axial originado pelo aquecimento. Esta situação pode levar à combinação de deformações mecânicas que por vezes excedem o valor da tensão de cedência do material, resultando num estado de deformação plástica.

Estas situações serão apresentadas e estudadas de uma forma mais formal para os casos apresentados nas secções seguintes.

3 – CASO ESTUDADO

O caso que se apresenta na figura 1 pretende representar o modelo numérico e experimental estudado. Corresponde a uma viga duplamente apoiada, com um carregamento distribuído uniforme, originado pelo peso próprio e pelo peso adicional do sistema de aquecimento utilizado

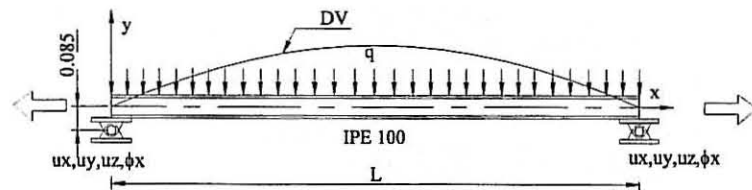


Figura 1 – Caso estudado: viga duplamente apoiada com restrição total aos deslocamentos axiais.

Os deslocamentos verticais, DV, ocorrem porque a viga encurva no plano, devido à restrição aos deslocamentos axiais imposta pelos apoios que se encontram afastados do eixo longitudinal da viga de uma distância correspondente a 85 [mm] e devido ao aumento de comprimento da viga provocado pelo acréscimo da temperatura, que só poderá ser acomodado por deslocamento transversal.

4- EFEITO TÉRMICO

O aquecimento induz deformações térmicas de expansão ε_{th} , calculadas pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \Delta T \quad (4)$$

em que α_{th} representa o coeficiente de dilatação térmica do material e ΔT representa o aumento da temperatura a que foi submetido o elemento.

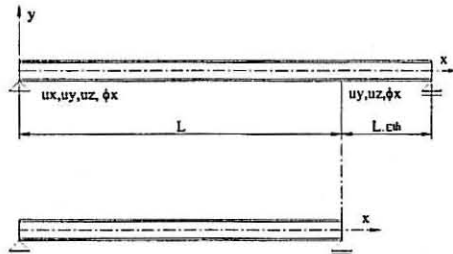


Figura 2 – Aquecimento uniforme da viga não restringida axialmente.

O coeficiente de dilatação térmica é considerado independente da qualidade do aço, variando de valor em função da temperatura. O Eurocódigo 3² propõe expressões para a variação da deformação térmica em função da temperatura.

Um elemento de viga como parte integrante de uma estrutura, geralmente não apresenta a capacidade de expansão como sugerido na figura 2. Portanto, no caso mais realista deverá ser considerado o aquecimento da viga, que originará uma força de compressão, conforme sugerido na figura 3.

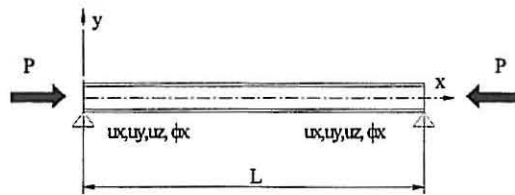


Figura 3 – Viga restringida axialmente, submetida a um aquecimento uniforme.

Neste caso, a deformação total ϵ , tem um valor nulo, pelo que não se verificam deslocamentos axiais. A expansão térmica é cancelada pela ação de uma força P , de tal forma que se instala na viga um estado de tensão igual a $\sigma = E\epsilon_m$.

Se o aumento da temperatura for incrementado indefinidamente, existirão dois tipos básicos de resposta do sistema, função da esbelteza da viga. No caso da viga ser pouco esbelta, a tensão axial instalada atingirá o valor de cedência do material, e possivelmente entrará no domínio plástico, aumentando a componente das deformações plásticas.

No caso da viga ser suficientemente esbelta, provavelmente entrará num estado de encurvadura antes de o material começar a ceder, ver figura 4.

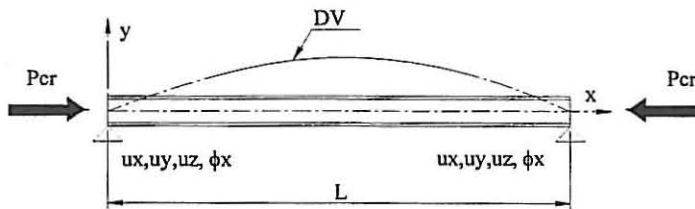


Figura 4 - Encurvadura de uma viga restringida axialmente.

Neste caso, se a temperatura continuara a aumentar, a força de restringimento permanecerá constante, assumindo comportamento elástico do material sem degradação das

propriedades e vertical DV, re
As dua
caso de vigas c
viga pode suce

5- RESULTAI

Os ense
com comprim
ligeiramente di
nos banzos da
para trabalhar e



Este sis
[kVA]. Para a
isolamento térm
estrutural.

No caso
sido caracteriz
determinada te
se pode observ

propriedades e as deformações térmicas por expansão são acomodadas pelo deslocamento vertical DV, representado na figura 4.

As duas respostas apresentadas representam dois comportamentos fundamentais no caso de vigas constrangidas em relação à expansão térmica. A cedência ou a encurvadura da viga pode suceder em função da esbelteza em causa.

5- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram efectuados para 7 vigas de perfil comercial IPE100, com comprimentos a variar entre 1 [m] e 3 [m], possuindo curvas de aquecimento ligeiramente diferentes. Estas curvas resultam da aplicação de elementos resistivos na alma e nos banzos da viga a aquecer, controlada por termopares tipo K, especialmente destinados para trabalhar a elevadas temperaturas, conforme figura 5.

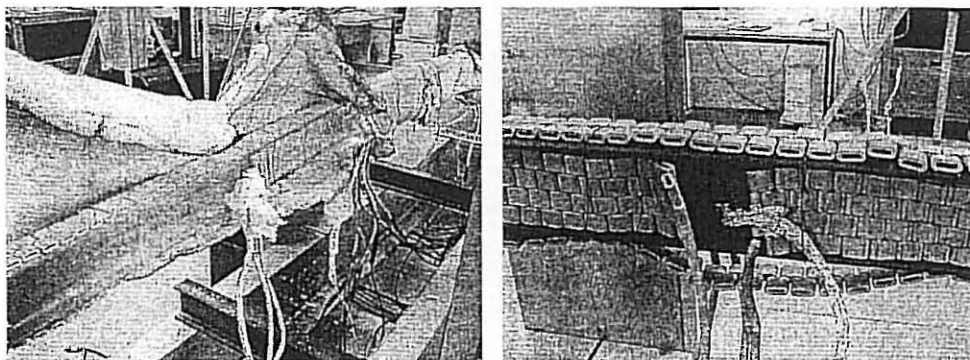


Figura 5- Processo de aquecimento utilizado nos ensaios experimentais.

Este sistema é solicitado a montante por um sistema de potência de aquecimento de 70 [kVA]. Para aumentar a eficiência térmica de todo o processo são utilizadas mantas de isolamento térmico que reduzem a perda de calor para o exterior da envolvente do elemento estrutural.

No caso das vigas com 1[m] de comprimento, foram efectuados dois ensaios, tendo sido caracterizados pelo mesmo tipo de comportamento, isto é, ao fim de se atingir determinada temperatura, o deslocamento mantém-se aproximadamente constante, conforme se pode observar na figura 6.

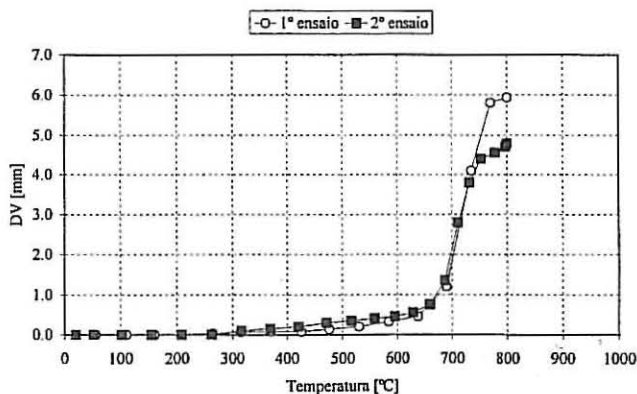


Figura 6 - Resultados experimentais para vigas com 1 [m].

alidade do aço,
ressões para a

eralmente não
so mais realista
le compressão,

ic.

io se verificam
órça P, de tal

tirão dois tipos
viga ser pouco
possivelmente
cas.

num estado de

or

onstrangimento
degradação das

No caso de vigas com 2 [m] de comprimento, o comportamento foi ligeiramente diferente. Os resultados apresentam apenas alguma concordância no valor do deslocamento máximo, conforme se poderá constatar no gráfico da figura 7. A diferença de comportamento poderá ser devida a um aquecimento não uniforme ou eventualmente a algum acomodamento de deslocamento axial, teoricamente não permitido nos ensaios.

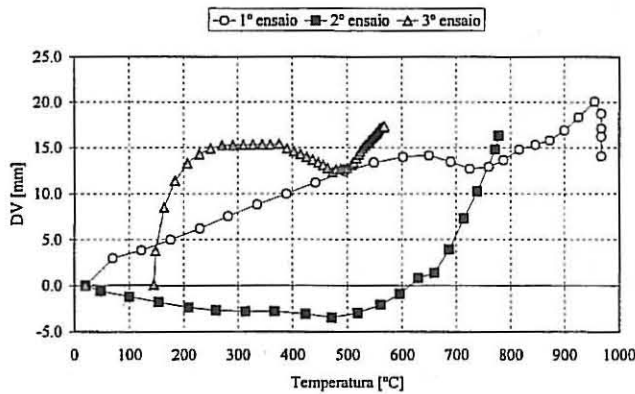


Figura 7 - Resultados experimentais para vigas com 2 [m].

No gráfico da figura 8, estão presentes os resultados para os ensaios de vigas com 3[m] de comprimento. Até aos 600 [°C] o comportamento dos dois ensaios foi semelhante, momento a partir do qual a viga correspondente ao segundo ensaio atingiu o estado limite de encurvadura lateral, conforme se poderá observar na figura 9.

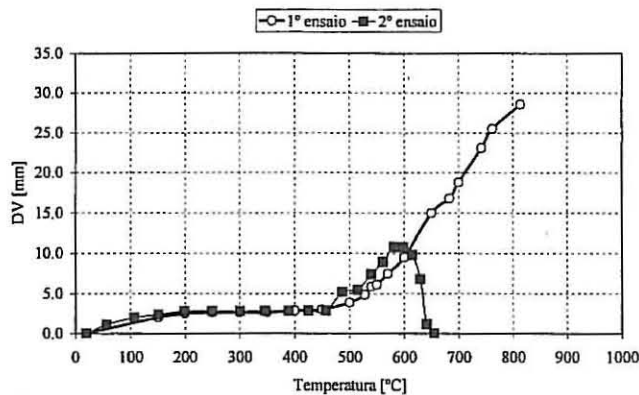


Figura 8 - Resultados experimentais para vigas com 3 [m].

Fi
Na fig
segundo ensaio

6- RESULTA

Para v
ensaios numé:
tridimensionai
linear geométr
estruturas sub:
térmica e mec:
do elemento e
baseado em el
e da geometria

O eler
o comportam
considerada n
torção, utiliza
A disc
sido modelad
comparativam
ao estado tér
representar o (

te diferente. Os
mento máximo,
amento poderá
modamento de

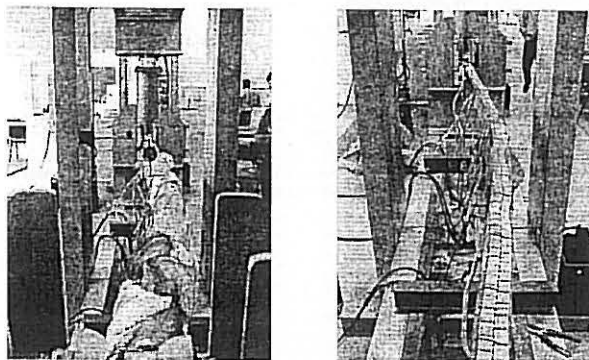


Figura 9 – Estado limite de encurvadura atingido no 2º ensaio com vigas de 3 [m].

Na figura 9 está representado o estado final do processo de instabilidade atingido no segundo ensaio da viga com 3 [m] de comprimento.

6- RESULTADOS NUMÉRICOS

Para validar o comportamento experimental, foi efectuado o mesmo número de ensaios numéricos, tendo em consideração a modelação com elementos finitos de viga tridimensionais, baseado no elemento de fibras de 15 graus de liberdade do programa não linear geométrico e material SAFIR, desenvolvido na Universidade de Liège, para o estudo de estruturas submetidas à acção do fogo³. Este código faz um desacoplamento entre a parte térmica e mecânica, significando que a deformação mecânica não influencia o estado térmico do elemento estrutural. Este elemento de viga recorre a uma discretização da secção recta, baseado em elementos bidimensionais lineares, que descrevem o comportamento do material e da geometria do perfil em estudo, conforme se mostra na figura 10.

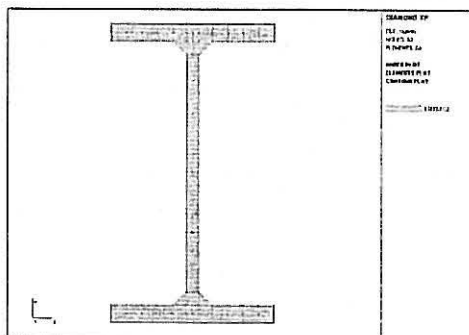


Figura 10 – Discretização da secção recta do elemento estrutural em análise.

O elemento de viga associado às fibras representadas possui a capacidade de modelar o comportamento não linear material em cada fibra, nos quais a plastificação apenas é considerada na direcção longitudinal do elemento. É considerado o estado não uniforme de torção, utilizando a teoria de grandes deslocamentos.

A discretização por elementos finitos utilizada está representada na figura 11, tendo sido modelado o apoio à temperatura ambiente, com rigidez à flexão muito superior, comparativamente aos elementos representativos do elemento estrutural da viga, submetidos ao estado térmico de aquecimento. Este modelo possui dois elementos na vertical para representar o efeito do apoio, ver figura 11.

: de vigas com
foi semelhante,
estado limite de

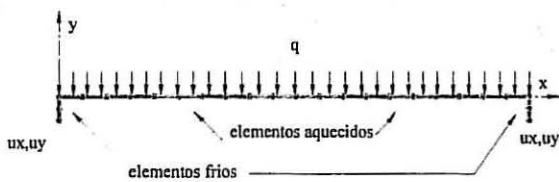
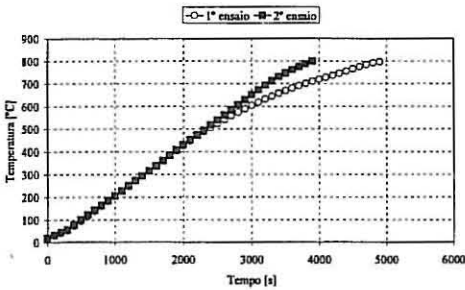


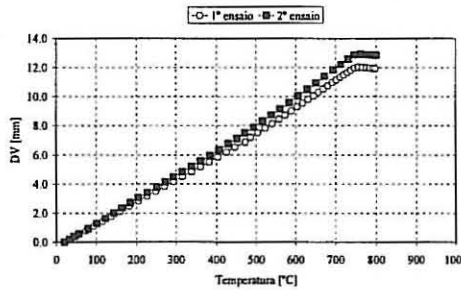
Figura 11 – Modelo de elementos finitos utilizado, com pormenor físico do apoio utilizado.

Os ensaios foram efectuados com o mesmo perfil comercial e com as mesmas curvas de solicitação térmica produzidas nos ensaios experimentais. Não foram consideradas as tensões residuais instaladas.

Para a modelação numérica dos ensaios em vigas de 1 [m] foi utilizada uma solução incremental, utilizando a informação térmica das curvas de aquecimento representada na figura 12. Os resultados do deslocamento vertical em função da temperatura média da viga, também se encontram representados na mesma figura.



a)

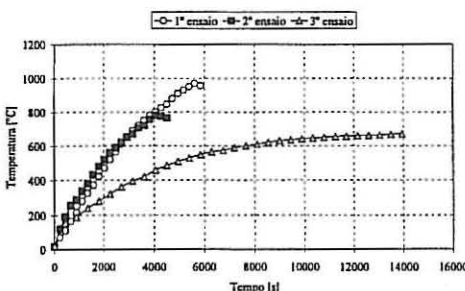


b)

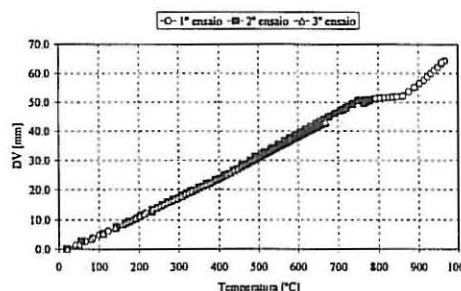
Figura 12 – Curva de aquecimento a) e de deslocamento vertical a meio vão das vigas com 1[m] b).

Como se pode verificar, a viga correspondente ao ensaio 2 é solicitada a uma taxa ligeiramente superior na parte final do ensaio, ao que corresponde um deslocamento superior para a mesma temperatura de comparação.

Na figura 13 estão representados os ensaios numéricos em vigas de 2 [m]. Enquanto que as duas primeiras curvas de aquecimento são semelhantes, a curva utilizada no aquecimento do 3º ensaio apresenta uma velocidade de crescimento muito inferior, não interferindo significativamente nos resultados do deslocamento vertical.



a)



b)

Figura 13 – Curva de aquecimento a) e de deslocamento vertical a meio vão das vigas com 2 [m] b).

Os ensaios foram realizados até ao estado limite no plano, sem ocorrência de deslocamentos significativos.

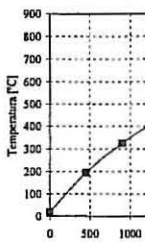


Figura 14 -

7- CONCLUSÕES

Os principais resultados dos ensaios foram as forças e os deslocamentos em diferentes tipos de viga.

Foi utilizado um perfil comercial, recorrendo ao mesmo perfil comercial para os desacoplados.

Foram realizados dois ensaios numéricos destes elementos, com resultados experimentais e temperatura crítica qualitativa de referência.

8- AGRADECIMENTOS

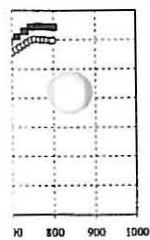
Este trabalho foi financiado pelo projecto intitulado 'Enquadramento de um sistema de agradecimentos aos colaboradores da Correia'.

REFERÊNCIAS

- [1] – Rotter, J. "Thermal Analysis of Fire"; Co
- [2] – CEN EN 1994-1-2 "Structural Design of Steel Structures";
- [3] – Franssen, J. "Fire analysis of steel structures";



zado.
 mesmas curvas
 nsideradas as
 uma solução
 apresentada na
 média da viga,



1 [m] b).
 a a uma taxa
 iento superior
 m]. Enquanto
 utilizada no
 inferior, não



12 [m] b).

Os ensaios numéricos efectuados em vigas com 3 [m] (figura 14) não poderiam prever o estado limite de encurvadura lateral uma vez que foram utilizados elementos finitos de viga no plano, sem informação adicional na direcção ortogonal, no entanto a tendência da evolução do deslocamento vertical a meio vão é semelhante ao comportamento experimental da viga.

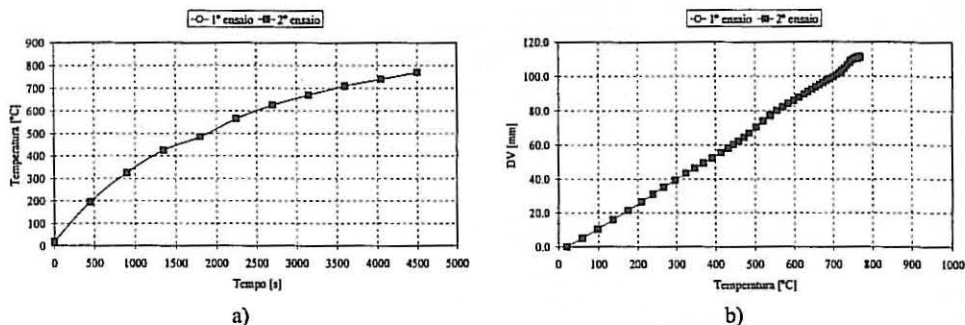


Figura 14 – Curva de aquecimento a) e de deslocamento vertical a meio vão das vigas com 3 [m] b).

7- CONCLUSÕES

Os princípios fundamentais apresentados neste artigo apresentam um meio de estimar as forças e os deslocamentos presentes em elementos ou estruturas reais em função dos diferentes tipos de comportamento e características geométricas.

Foi utilizado um dos métodos avançados de cálculo preconizados nos Eurocódigos, recorrendo ao método dos elementos finitos para estudar problemas termo-mecânicos desacoplados.

Foram efectuados ensaios experimentais de forma a verificar o comportamento real destes elementos sob a acção das mesmas condições térmicas. Apesar de não se ter obtido nos resultados experimentais e numéricos uma equivalência quantitativa nos valores da temperatura crítica, os dois tipos de análise apresentam no entanto uma correspondência qualitativa de resultados.

8- AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no seguimento 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 à Firma J. Soares Correia.

REFERÊNCIAS

- [1] – Rotter, J.M.; Usmani, A.S.; “ Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects”; in proceedings of the 1st International Workshop on Structures in Fire”; Compenhagen; Denmark; June 2000.
- [2] – CEN ENV 1993-1-2; “Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design”; 1995.
- [3] – Franssen, Jean-Marc et al; users manual for SAFIR 2001 – a computer program for analysis of structures submitted to the fire; November 2000.