

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E GESTÃO INDUSTRIAL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO  
COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS  
METÁLICAS SUJEITAS À ACÇÃO DO FOGO**

**Paulo Alexandre Gonçalves Piloto**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em  
Engenharia Mecânica*

2000

Dedico este trabalho à minha mulher Elza e à minha filha Joana

## **Agradecimentos**

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Doutor Paulo Vila Real, pelo acompanhamento e dedicação com que orientou este trabalho.

À Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Universidade de Aveiro, pelas excelentes oportunidade de contactos científicos.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio prestado através do financiamento do projecto Praxis XXI “Lateral Buckling of Steel beams Under fire conditions”.

À empresa J. Soares Correia pela oferta de todos os perfis comerciais IPE 100 utilizados nos ensaios experimentais destrutivos.

Aos técnicos dos laboratórios de Oficinas de Mecânica e de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, o agradecimento devido pela disponibilidade sempre demonstrada.

A todos que não foram referidos e que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

# ***“Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo”***

por

**Paulo Alexandre Gonçalves Piloto**

Tese submetida para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Realizada pela supervisão do

**Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real**

## **Resumo**

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o efeito da acção do fogo em estruturas metálicas, tendo sido elaborado um estudo numérico e experimental de um fenómeno de instabilidade estrutural relativo à encurvadura lateral torsional de vigas a elevadas temperaturas. Foram efectuados ensaios destrutivos em vários perfis com vista à determinação da carga limite resistente ou de colapso.

O efeito do fogo, como elemento activo e prejudicial à resistência do elemento estrutural, foi determinado tendo-se verificado uma substancial diminuição das capacidades resistentes, devendo por isso as acções serem convenientemente determinadas e analisadas.

No âmbito deste trabalho foram ainda estudadas as acções em estruturas sujeitas à acção do fogo, a variação das propriedades mecânicas e térmicas do aço com a temperatura e o comportamento não linear geométrico e material da estrutura.

Tendo como objectivo o desenvolvimento de ensaios experimentais em vigas de perfil comercial, foi elaborada a candidatura de um projecto de Investigação e Desenvolvimento, intitulado “Lateral Buckling of Steel Beams Under Fire Conditions”, financiado pelo Ministério da Ciência e da Tecnologia, o que tornou possível a constituição de todo o equipamento que serviu de base a este trabalho. Neste caso construiu-se um “setup” com as vertentes térmica e estrutural necessárias para ensaiar estruturas em situação accidental de incêndio.

Paralelamente foram desenvolvidos vários ensaios numéricos do fenómeno de encurvadura lateral a elevadas temperaturas com um programa de análise não linear geométrica e material, como são exemplo os programas SAFIR, ANSYS e Cosmos/M, os quais permitiram validar os restantes resultados e justificar a necessidade da revisão de algumas formulas simplificadas que o Eurocódigo 3 apresenta, nomeadamente as que dizem respeito à determinação da resistência de vigas à encurvadura lateral, em situação de incêndio.

No final é apresentada a validação de uma proposta de cálculo simples para verificação de elementos estruturais à encurvadura, que se propõe em alternativa à proposta apresentada pelo Eurocódigo 3.

### **Palavras chave:**

“Estruturas metálicas”; “Acção do fogo”; “Encurvadura lateral de vigas”; “Carga crítica”; “Validação experimental e numérica”.

# ***“Experimental and numerical analysis of metallic structures behaviour under fire conditions”***

by

**Paulo Alexandre Gonçalves Piloto**

Thesis submitted for the Ph.D. degree in Mechanical Engineering of the  
faculty of Engineering in the University of Porto

Supervised by

**Prof. Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real**

## **Abstract**

In this thesis a numerical and experimental validation of the lateral torsional buckling phenomenon of steel I beams under fire conditions is presented. A set of experimental destructive tests were made in several I beams profiles for the buckling moment resistance determination.

The fire effect as an active element may produce a severe reduction in structural strength. The numerical simulation of this phenomenon was done by means of a finite element code with non linear material and geometrical behaviour, based on elevated and constant temperatures.

The structural actions under fire conditions, the material behaviour regarding its mechanical and thermal properties variation with temperature and the non linear behaviour of structures were also studied..

Having in mind the development of experimental tests in the commercial profiles IPE100, a research project “Lateral Buckling of Steel I Beams Under Fire Condition” has been financed by the Science and Technology Portuguese Ministry, helping us to build a thermal and structural set up for this propose.

In parallel, several numerical simulations had been done by means of the material and geometrical non linear finite element code SAFIR, as well as, with other commercial codes, ANSYS and CosmosM. This lead us to the justification and the needed of reviewing some simple formulas in Eurocode regarding the lateral buckling behaviour of structures under fire conditions.

Finally a validation of a new proposal for a simple model in lateral torsional buckling under fire conditions is presented, different from that used in Eurocode, that seams to give unsafe results.

### **Key words:**

“Metallic Structures”; “Fire Action”; “Lateral Buckling of steel I Beams”; “Critical load”; “Experimental and numerical validation”.

# ***“Analyse experimental et numeric du comportement de structures métalliques sur actions du feu”***

pour:

**Paulo Alexandre Gonçalves Piloto**

Thèse présentée à la Faculté de la Université du Porto  
En vue de l’obtention du grade de docteur en Génie Mécanique

Supervision de

**Prof. Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real**

## **Résume**

Dans ce travail, un étude sur le effet des actions du feu sur les structures métalliques est présenté. Cet effet a été étudié avec des modèles numériques et expérimentaux. On a fait des essais destructifs en différents profils en acier du type IPE100 pour obtenir la résistance limite ou la charge de collapsus.

Le effet du feu, comme en élément active et préjudicielle pour la résistance de l’élément structurelle a été déterminée et on a vérifié une diminution des capacités de résistance. C’est pourquoi on devra déterminé ce type d’actions.

Dans le contour de ce travail on a étudié les actions mécaniques et thermiques, la variation des propriétés du matériel avec la température et le comportement non linéaire géométrique et matériaux de la structure.

Avec l’objectif du développement des essais expérimentaux sur des poteaux de profil commercial on a présentée un projet d’ investigation et développement sur le non de “Déversement de poteaux en acier sur des conditions du feu”, reconnu par le ministère de la Science et technologie, qui a permis la construction de l’équipement pour développé ce travail. Dans ce domaine on a construis le «set up» avec la versant thermique et structurelle nécessaire pour essayer les structures et particulièrement les poteaux sur action du feu.

On a développée aussi des essais numériques du phénomène de flambement latérale des poteaux a haute températures, en utilisant des logiciels de analyse géométrique et matériaux non linéaire, comme par exemple SAFIR, CosmosM et ANSYS, qui on permis valider les résultats et justifier la nécessité de amender certaines formules simplifiées que l’Eurocode présent, nommément ceux que concerne à la détermination de la résistance des poteaux à flambement latérale, en cas du feu.

A la fin, on présent une validation d’une proposé pour le calcule simple des éléments structurelles a cet type de instabilité, présentés comme alternatif à l’expressions de Eurocode.

### **Mot clés:**

“Structures métalliques”; “Action du feu”; “Déversement de poteaux en acier”; “Charge critique”; “Validation expérimental e numérique”.

## Nomenclatura

A nomenclatura que se apresenta está dividida em função da natureza da designação do símbolo, conforme se trata de um escalar, de uma grandeza vectorial ou tensorial. Em qualquer dos casos foi efectuada a sub divisão em caracteres que utilizam o latim e o grego.

Algumas notações verdadeiramente particulares não foram consideradas na listagem seguinte, uma vez que se apresentam com uma utilização restrita e/ou contradizem a nomenclatura de outros capítulos.

### *Grandezas escalares que utilizam símbolos em Latim:*

$A$	Área da secção recta
$A_d(t)$	Valor de cálculo da acção resultante de exposição ao fogo.
$a_{máx}$	Amplitude máxima da imperfeição geométrica medida
$b_a$	Efusividade do aço
$b$	Largura da secção recta do perfil
$C_a$	Calor específico do aço
$CF_{xx}$	Caracterização da capacidade isolante dos materiais de construção
$C_w$	Constante de empenamento
$dL$	Comprimento de segmento que une dois pontos de um corpo
$d'$	Distância igual à altura do perfil IPE menos o valor de uma espessura do banzo
$E$	Capacidade de integridade às chamas e a gases quentes
$E_{fi,d,t}$	Valor de cálculo do efeito das acções, durante exposição ao fogo, no instante t
$EF_{xx}$	Caracterização da estabilidade ao fogo de materiais de construção
$\bar{E}_{a\theta}$	Módulo de elasticidade em qualquer ponto, à temperatura $\theta$
$E_a$	Fracção de energia absorvida por radiação
$E_r$	Fracção de energia reflectida por radiação
$E_{ir}$	Energia irradiada pela superfície
$f_y$	Tensão de cedência do material
$f_{y,\theta,max}$	Tensão de cedência à temperatura máxima
$f_{au,\theta}$	Tensão última do aço
$f_{a máx,\theta}$	Tensão de cedência máxima do aço, para a temperatura $\theta$
$f_{ap,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço, para a temperatura $\theta$
$f_1, f_2$	Funções para determinação da deformação de corte em vigas.
$G_k$	Valor característico de acções permanentes
$G_i$	Fluxo recebido por radiação para a superfície
$h$	Altura da secção recta do perfil; altura da zona da superfície radiativa

$\dot{h}_{net}$	Fluxo de calor por unidade de área
$\dot{h}_{net,r}$	Fluxo de calor convectivo por unidade de área
$\dot{h}_{net,c}$	Fluxo de calor radiactivo por unidade de área
$I$	Momento de segunda ordem relativamente ao eixo resistente à flexão, Capacidade de isolamento térmico
$I_{\xi}, I_{\eta}$	Momentos de segunda ordem relativamente aos eixos da secção recta
$J$	Constante de torção, Jacobiano da transformação
$J_i$	Irradiação da superfície “i”
$k$	Coeficiente multiplicativo do momento, factor de comprimento de encurvadura efectivo
$k_w$	Factor relativo ao empenamento na extremidade
$k_{\theta}$	factor de redução do valor da propriedade mecânica em função da temperatura
$k_{y,\theta,com}$	Factor de variação da tensão de cedência com a temperatura
$k_{E,\theta,com}$	Factor de variação do módulo de elasticidade com a temperatura
$L_c$	Comprimento da zona útil do provete retirado do perfil
$L_0$	Comprimento inicial entre referência, do provete de ensaio
$l_d, l_g$	Comprimentos das fronteiras dos elementos
$M_{b,Rd}$	Momento resistente de cálculo à encurvadura, à temperatura ambiente
$M_{c,Rd}$	Momento resistente de cálculo da secção
$M_{fi,d}$	Momento flector de cálculo, em situação de incêndio
$M$	Esforço interno - momento flector
$(M_0)_{cr}$	Momento crítico elástico
$(M_0)_{cr}^*$	Momento crítico elástico corrigido
$(M_0)_{cr}^{in}$	Momento crítico não elástico
$M_{b,fi,t,Rd}$	Momento resistente à encurvadura lateral, no instante t, em situação de incêndio
$M_{fi,\theta,Rd}$	Momento resistente da secção em situação de incêndio
$M_{b,SAFIR}$	Momento resistente à encurvadura, determinado pelo SAFIR
$m_i$	Comprimento da linha média do perfil da secção aberta
$N$	Esforço interno - normal
$N_{fi,d}$	Esforço interno - normal de cálculo, em situação de incêndio
$N_i$	Funções de interpolação do campo ou da geometria
$NEC$	Número de elementos na cavidade
$nne$	Número de nós do elemento
$npg$	Número de pontos de gauss
$PC_{xx}$	Caracterização da estanqueidade ao fogo dos materiais de construção
$P$	Carga aplicada
$Q$	Resistividade
$Q_{k,1}$	Valor característico da acção variável principal
$Q_{k,i}$	Valores característicos das restantes acções variáveis

$q_c$	Fluxo de convecção
$q_i$	Balanco de fluxo de calor por radiação
$R_{fi,d,t}$	Valor de cálculo de resistência de carga, durante exposição ao fogo, no instante t
$R$	Capacidade resistente, Resistência do sistema de medição de deformações $[\Omega]$
$S$	Distância de P a X
$S_0$	Área da secção recta do perfil
$T$	Temperatura; Esforço interno - transversal
$T_s$	Temperatura à superfície da cavidade
$T_v$	Temperatura na cavidade
$T_0$	Temperatura inicial no compartimento de incêndio
$T_{ens}$	Temperatura de ensaio
$t$	Tempo
$t_{fi,d}$	Valor de cálculo da resistência ao fogo medido em tempo
$t_{fi,requ}$	Valor nominal requerido de resistência ao fogo standard
$t_f, t_w$	Espessura do banzo e da alma do perfil
$t_{f1}, t_{f2}$	Espessura mediada no banzo superior e inferior do perfil
$t_i$	Espessura do perfil
$u(x, y)$	Campo de deslocamentos axial num elemento de viga
$u$	Empenamento da secção, Deslocamento lateral em qualquer ponto do eixo da viga
$V$	Volume
$V_e$	Volume do elemento finito
$V_s$	Tensão eléctrica [V]
$v(x, y)$	Campo de deslocamentos transversal num elemento de viga
$w$	Largura da zona da superfície radiativa
$\omega(y, z)$	Função de empenamento
$W_{pl}, W_{pl,y}$	Módulo plástico da secção
$X_{fi,d}$	Valor de cálculo da propriedade em situação de incêndio
$X_{k,\theta}$	Valor característico das propriedades em situação de incêndio, função da temperatura.
$X_k$	Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente

***Grandezas escalares que utilizam símbolos em grego:***

$\alpha$	Coeficiente de dilatação térmica, Ângulo de rotação por unidade de comprimento de viga
$\alpha_a$	Difusividade térmica do aço
$\alpha_c$	Coeficiente de convecção
$\alpha_x$	Rotação da secção para uma abscissa x
$\alpha_g, \alpha_c, \alpha_d$	Coeficientes de convecção

$\alpha_{LT}$	Factor de imperfeição
$\beta_w$	Cociente entre do módulo da secção
$\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$	Factor de segurança para diferentes tipos de testes, em vários países.
$\gamma_{GA}$	Factor de segurança parcial das acções permanentes em situação acidental, normalmente igual a 1.0
$\gamma_G$	Factor de segurança parcial das acções permanentes à temperatura ambiente
$\gamma_Q$	Factor parcial de segurança para a acção variável principal
$\gamma_{M,fi}$	Factor parcial de segurança para a propriedade do material em causa na situação de incêndio ( =1 para todas as propriedades )
$\gamma_n$	Configuração actual do estado de um corpo sólido
$\gamma_{M1}$	Factor de segurança
$\Delta U$	Variação da energia interna
$\Delta \varepsilon_i$	Deformação mediada na direcção “i”
$\delta, u_1$	Deslocamento lateral a meio vão da viga
$\varepsilon_{res}$	Emissividade resultante, normalmente =0.56
$\varepsilon_m$	Emissividade da superfície do elemento, normalmente =0.7
$\varepsilon_f$	Emissividade do compartimento de incêndio, normalmente =0.8
$\varepsilon_{th}$	Deformação térmica
$\varepsilon_{au,\theta}$	Deformação do aço, para a temperatura $\theta$
$\varepsilon_{au,\theta}$	Deformação última do aço, para a temperatura $\theta$
$\varepsilon_{at,\theta}$	Deformação limite do aço para a tensão de cedência, à temperatura $\theta$
$\varepsilon_{as,\theta}$	Deformação limite do aço pós endurecimento, à temperatura $\theta$
$\varepsilon_{a\text{máx},\theta}$	Deformação de cedência do aço, à temperatura $\theta$
$\varepsilon_{ap,\theta}$	Deformação correspondente ao limite de proporcionalidade do aço, à temperatura $\theta$
$\varepsilon_{ij}$	Componente do tensor das deformações
$\varepsilon^*$	Emissividade relativa
$\varepsilon$	Cociente função da tensão de cedência do material
$\eta_{fi,t}$	Factor de redução dependendo do quociente entre a variável principal e as acções permanentes aplicadas na estrutura
$\theta_d$	Valor de cálculo de temperatura
$\theta_{cr,d}$	Valor de cálculo de temperatura crítica
$\theta_g, T_g$	Temperatura dos gases
$\theta_m$	Temperatura na superfície dos elementos
$\theta_r$	Temperatura de radiação na vizinhança do elemento, podendo ser considerada igual a $\theta_g$
$\theta(x)$	Rotação da secção de uma viga
$\theta_{iE}$	Rotação nodal, obtida com “i” elementos finitos
$\theta$	Rotação da secção recta a meio vão da viga
$\lambda_a, \lambda$	Condutividade do aço ou de outro material

$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza adimensional normalizada
$\lambda_{LT}$	Esbelteza da viga
$\lambda_1$	Coefficiente para determinação da esbelteza da viga
$\rho$	Massa específica de um material genérico
$\rho_a$	Massa específica do aço
$\sigma_{a,\theta}$	Tensão no aço para a temperatura $\theta$
$\sigma_{ij}$	Componente do tensor das tensões
$\sigma_{cr}$	Tensão crítica
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$ )
$\sigma_{rft}$	Tensão residual no extremo do banzo
$\sigma_{rfw}$	Tensão residual no meio do banzo
$\sigma_{rwc}$	Tensão residual no meio da alma
$\sigma_1, \sigma_2$	Tensões principais medidas
$\Phi, \varphi = F$	Factor de forma, Fluxo de calor
$\phi$	Função de Prandtl para determinação das tensões em torção; Rotação da secção recta em qualquer ponto do eixo da viga
$\phi_{LT}$	Factor de cálculo para determinar o coeficiente de redução
$\varphi$	Ângulo no plano de medição para determinação das direcções principais
$\chi_{fi}$	Factor de redução
$\chi_{LT}$	Coefficiente de redução para a encurvadura lateral torsional
$\chi_{LT,fi}$	Coefficiente de redução para a encurvadura lateral torsional, em situação de incêndio
$\psi_{1,1}; \psi_{2,i}$	Coefficientes de combinação para edifícios de acordo com ENV 1991-1
$\Gamma$	Configuração inicial do estado de um corpo sólido

***Grandezas vectoriais que utilizam símbolos em latim:***

$(X;Y;Z)$	Coordenadas cartesianas de sistemas de eixo
$(X^*,Y^*,Z^*)$	Coordenadas cartesianas de sistemas de eixo, posição deformada
$\vec{r}$	Vector posição
$\vec{u}$	Vector movimento de um ponto material
$\{\Delta b\}$	Incremento das forças de volume
$\{\Delta t\}$	Incremento das forças de superfície
$\{\Delta u\}$	Incremento do vector movimento
$\{u\} = \langle u \quad v \quad w \rangle^T$	Vector deslocamentos dos elementos finitos
$\langle N \rangle$	Vector das funções de forma
$\{x_i\}$	Vector para descrição geométrica
$\{p\}$	Vector das componentes nodais dos deslocamentos generalizados
$\vec{n}$	Vector normal à curva ou superfície
$\{T_n\}$	Vector das temperaturas nodais
$\{U_p\}$	Vector do carregamento térmico

$\{\dot{T}_n\}$  Vector derivada temporal das temperaturas nos nós

***Grandezas vectoriais que utilizam símbolos em grego:***

$\{\Delta \varepsilon\}$  Vector dos incrementos das deformações de Green Lagrange  
 $\{\Delta \sigma\}$  Vector incremento das segundas tensões de Piola Kirchhoff  
 $\{\Delta \varepsilon_l\}$  Vector incremento das componentes de deformação de Green lagrange, parte linear  
 $\{\delta \Delta \varepsilon\}$  Incremento virtual das deformações de Green lagrange  
 $\{\Delta \varepsilon_{nl}\}$  Vector incremento das componentes de deformação de Green lagrange, parte não linear  
 $\{\Delta f^e\}$  Incremento de carga das forças no elemento  
 $\{\Delta d\}$  Incremento de deslocamentos nodais  
 $\{\Delta f\}$  Incremento das forças nodais  
 $\{\delta \varepsilon\}$  Vector virtual das de formações de Green lagrange  
 $\{\delta \varepsilon\}$  Variação virtual do vector das componentes das deformações  
 $\{\varepsilon_l\}$  Componentes do tensor das deformações de Green Lagrange, parte linear.  
 $\{\varepsilon_{nl}\}$  Componentes do tensor das deformações de Green Lagrange, parte não linear.  
 $\{\varepsilon\}$  Tensor das deformações de Green lagrange  
 $\{\sigma^*\}$  Tensor das tensões de Cauchy  
 $\{\sigma\}$  Tensor das segundas tensões de Piola Kirchhoff

***Tensores e Matrizes que utilizam símbolos em latim:***

$[A]$  Matriz que depende do campo de deslocamentos  
 $[B]$  Matriz das deformações do elemento  
 $[B_l]$  Matriz do relacionamento linear entre deslocamentos e deformações  
 $[B']$  Matriz das derivadas cartesianas das funções de forma  
 $[B_{nl}]$  Matriz do relacionamento não linear entre deslocamentos e deformações  
 $[C]$  Tensor da deformação de Green  
 $[CAP]$  Matriz de capacidade térmica [ngl x ngl]  
 $[D^*]$  Matriz de comportamento tensão deformação  
 $[F]$  Tensor gradiente de deformação de corpo sólido  
 $[G]$  Matriz das derivadas cartesianas das funções de forma  
 $[K_T^e]$  Matriz rigidez tangencial do elemento  
 $[K_l^e]$  Matriz rigidez do elemento, parte linear  
 $[K_{nl}^e]$  Matriz rigidez do elemento, parte não linear  
 $[K_\sigma^e]$  Matriz rigidez das tensões iniciais ou residuais  
 $[K_{HC}]$  Matriz rigidez do elemento finito de Henky Mindlin  
 $[RET]$  Matriz rigidez equivalente térmico – condutividade [ngl x ngl]

$[SOL]$  Matriz de carregamento térmico [nºl x nº solicitações]

*Tensores e Matrizes que utilizam símbolos em grego:*

$[\Delta A]$  Matriz das derivadas cartesianas dos incrementos dos deslocamentos

## Índice

1. Introdução	1.1
1.1. Considerações gerais	1.1
1.2. Objectivo e desenvolvimento da investigação	1.3
1.3. Sumário dos capítulos	1.3
1.4. Referências	1.5
2. Propriedades termo mecânicas do aço	2.1
2.1. Introdução	2.1
2.2. Propriedades térmicas	2.2
2.2.1. Calor específico	2.3
2.2.2. Condutividade térmica	2.4
2.3. Propriedades mecânicas	2.5
2.3.1. Coeficiente de dilatação térmica	2.8
2.3.2. Módulo de elasticidade	2.9
2.3.3. Tensão de cedência	2.10
2.3.4. Tensão limite de proporcionalidade	2.11
2.4. Conclusões	2.12
2.5. Referências	2.12
3. Acções em estruturas sujeitas à acção do fogo	3.1
3.1. Introdução	3.1
3.2. Acções térmicas	3.2
3.2.1. Trocas convectivas	3.4
3.2.2. Trocas radiativas	3.6
3.3. Acções mecânicas	3.9
3.4. Conclusões	3.11
3.5. Referências	3.11
4. Cálculo de deslocamentos	4.1
4.1. Introdução	4.1
4.2. Caracterização da deformação do meio contínuo	4.1
4.2.1. Descrição do movimento	4.1
4.2.2. Definição das deformações	4.3
4.2.3. Definição da variação de volume e de área	4.4
4.2.4. Definição das tensões	4.5
4.3. Princípio dos trabalhos virtuais	4.6
4.3.1. Equações de equilíbrio incrementais	4.7
4.3.2. Relações constitutivas	4.9
4.4. Aplicação do método dos elementos finitos	4.10
4.4.1. Formulação Lagrangeana Total	4.11
4.4.2. Actualização das Tensões e Deformações	4.16
4.5. Elemento de Viga	4.16
4.5.1. Teoria Clássica analítica. Vigas de Hencky Mindlin	4.17
4.5.1.1. Exemplo de aplicação – Viga bi apoiada solicitada por	

Momento constante	4.20
4.5.1.2. Exemplo de aplicação – Viga em consola solicitada por um esforço transversal na extremidade	4.22
4.5.2. Descrição analítica do Elemento de Euler Bermoulli	4.24
4.5.2.1. Exemplo de aplicação - Viga bi apoiada solicitada por momento constante	4.25
4.5.2.2. Exemplo de aplicação – Viga em consola com carregamento transversal na extremidade	4.26
4.5.3. Elemento finito de viga Hencky – Mindlin	4.26
4.5.4. Elemento finito com integração reduzida	4.31
4.5.5. Elemento finito modificado	4.32
4.5.6. Elemento finito “exacto”	4.34
4.5.7. Elemento finito tridimensional de três nós	4.36
4.5.7.1. Discretização do elemento	4.39
4.5.7.2. Integração numérica	4.44
4.6. Torção não uniforme	4.46
4.7. Solução de equações não lineares	4.51
4.7.1. Método puramente incremental	4.52
4.7.2. Métodos incrementais e iterativos	4.53
4.7.2.1. Método de Newton Raphson	4.54
4.7.2.2. Método de Newton Raphson modificado	4.56
4.7.2.2.1. Método da rigidez inicial (K0)	4.57
4.7.2.2.2. Métodos KT1 e KT2	4.57
4.7.2.3. Método do comprimento do arco (ALC)	4.58
4.7.3. Critérios de convergência	4.61
4.8. Conclusões	4.61
4.9. Referências	4.62
5. Cálculo de temperaturas	5.1
5.1. Introdução	5.1
5.2. Equação de comportamento térmico	5.1
5.3. Formulação integral fraca	5.4
5.4. Aproximação por elementos finitos	5.6
5.5. Formulação matricial	5.9
5.6. Esquema de integração	5.12
5.7. Modelação de vazios internos	5.16
5.8. Exemplo de aplicação	5.20
5.9. Conclusões	5.24
5.10. Referências	5.25
6. Caracterização da resistência ao fogo	6.1
6.1. Introdução	6.1
6.2. Comportamento de uma estrutura metálica sujeita a vários cenários de incêndio	6.2
6.3. Conclusões	6.12
6.4. Referências	6.13
7. Encurvadura lateral de vigas	7.1
7.1. Introdução	7.1

7.2. Estado limite à temperatura ambiente– Resistência à encurvadura lateral	7.3
7.3. Equação de equilíbrio – método diferencial	7.5
7.3.1. Encurvadura por flexão pura	7.9
7.3.2. Encurvadura por carregamento transversal concentrado	7.13
7.3.3. Encurvadura por carregamento transversal distribuído	7.17
7.4. Equação de equilíbrio - método energético	7.17
7.4.1. Encurvadura por carregamento transversal concentrado	7.18
7.4.2. Encurvadura por carregamento transversal distribuído	7.20
7.4.3. Exemplo de Aplicação	7.20
7.5. Encurvadura lateral de vigas em regime não elástico	7.24
7.5.1. Encurvadura por flexão pura	7.24
7.5.2. Encurvadura por carregamento transversal	7.25
7.6. Estado limite último em situação de incêndio - resistência à encurvadura Lateral	7.26
7.6.1. Proposta do Eurocódigo 3	7.26
7.6.2. Nova proposta	7.28
7.7. Conclusões	7.29
7.8. Referências	7.30
8. Análise experimental da encurvadura lateral de vigas I em situação de incêndio	8.1
8.1. Introdução	8.1
8.2. Imperfeições geométricas	8.2
8.2.1. Imperfeições longitudinais	8.2
8.2.2. Imperfeição da secção transversal	8.5
8.3. Propriedades e características dos materiais	8.6
8.4. Tensões residuais	8.10
8.4.1. Determinação das tensões residuais – método do furo	8.13
8.4.2. Equipamento de ensaio	8.14
8.4.3. Tratamento analítico dos valores medidos	8.15
8.4.4. Preparação das medições	8.17
8.4.5. Instrumentação para medição	8.19
8.4.6. Resultados experimentais	8.22
8.5. Equipamento de ensaio	8.23
8.5.1. Equipamento de ensaio estrutural	8.23
8.5.2. Equipamento hidráulico	8.26
8.5.3. Equipamento resistivo de efeito térmico	8.28
8.6. Procedimento de ensaio	8.32
8.7. Medições a efectuar durante os ensaios	8.32
8.7.1. Temperaturas	8.33
8.7.2. Deslocamentos a meio vão	8.33
8.7.3. Momento resistente à encurvadura	8.34
8.8. Discussão dos resultados	8.40
8.9. Conclusões	8.48
8.10. Referências	8.49
Anexo 8.1 - Resultados experimentais – tensões residuais	8.51
Anexo 8.2 - Resultados experimentais – deslocamentos a meio vão	8.61
9. Análise numérica da encurvadura lateral de vigas I em situação de incêndio	9.1

9.1. Introdução	9.1
9.2. O modelo de elementos finitos utilizado	9.2
9.3. Modelo numérico das tensões residuais	9.2
9.4. Modelo numérico das imperfeições geométricas	9.3
9.5. Comportamento mecânico do material	9.4
9.6. Modelação numérica da resistência à encurvadura lateral	9.4
9.7. Comparação numérica com outros programas de elementos finitos	9.8
9.8. Conclusões	9.14
9.9. Referências	9.14
Anexo 9.1 - Resultados Numéricos – Deslocamentos a meio vão	9.16
10. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros	10.1
10.1. Conclusões	10.1
10.2. Perspectivas de desenvolvimentos futuros	10.2

# Capítulo 1

## *Introdução*

### **1.1- Considerações gerais**

Para garantir os objectivos da segurança contra incêndio das estruturas deve-se considerar, por ordem decrescente de importância, a protecção das vidas humanas em caso de sinistro, a protecção dos bens existentes no edifício e das actividades previstas no mesmo e a protecção da estrutura contra danos de incêndios que possam deflagrar nela ou em estruturas vizinhas.

Com a regulamentação de segurança contra incêndio pretende-se atingir os objectivos supracitados e em particular, limitar o risco de desenvolvimento pleno do incêndio, limitar o risco de propagação no interior do edifício, limitar o risco de propagação a outros edifícios, facilitar o combate ao incêndio e limitar os danos.

O risco de generalização de um incêndio a todo o compartimento em que teve origem é em particular controlado através de disposições regulamentares relativas ao grau de sofisticação e de viabilidade do sistema de detecção de incêndio, disponibilidade e eficácia de meios de intervenção para o combate a incêndio e controlo das características de reacção ao fogo dos materiais de construção a utilizar. O risco de propagação do incêndio no interior do edifício é controlado por medidas destinadas a dificultar a propagação na horizontal e na vertical, quer pelo interior do edifício quer pelo exterior. Essas medidas englobam a definição das características de resistência ao fogo da envolvente das caixas de escadas, dos elevadores, das lajes dos pisos, da envolvente dos caminhos de evacuação protegidos, dos locais com risco especial de incêndio, das portas de comunicação com caminhos de evacuação, bem como das respectivas características de reacção ao fogo dos materiais de revestimento utilizados nestes elementos. Outras medidas poderão ser tomadas relativamente à definição das características dos sistemas de ventilação, ar condicionado e evacuação de fumos.

O risco de propagação do incêndio a outros edifícios é limitado através de disposições relativas à distância mínima das construções aos limites do lote, da resistência ao fogo das

paredes exteriores do edifício, da distância mínima entre fachadas de edifícios em confronto, da distância mínima entre vãos abertos em fachadas de edifícios contíguos e das características das coberturas de edifícios confinantes de alturas diferentes.

É costume distinguir as medidas de segurança contra incêndio em medidas activas e medidas passivas. As medidas activas visam reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios severos. A probabilidade de ocorrência de incêndios severos resulta da utilização das estruturas para fins diferentes dos que foram definidos, da natureza do equipamento e material existente no edifício, das condições climáticas, da quantidade e das características de ignição e combustão dos materiais existentes na estrutura e das condições de fronteira dos compartimentos de incêndio. As medidas passivas visam reduzir a probabilidade de colapso estrutural sempre que ocorra um incêndio severo e/ou facilitar a evacuação do edifício e a acção dos bombeiros. De entre as medidas passivas será de extrema importância prever a reacção ao fogo dos materiais de construção, a resistência ao fogo dos elementos de construção e a utilização de compartimentos corta fogo.

A resistência das estruturas metálicas pode ser verificada pela análise dos respectivos componentes, por partes da estrutura ou de uma forma global, sendo necessário verificar a segurança relativamente aos estados limites últimos de resistência e aos estados limites de utilização. Neste trabalho será estudado o caso da instabilidade estrutural associado ao modo de colapso para o qual um ou mais elementos de uma estrutura sofre um deslocamento lateral e uma rotação da respectiva secção recta. Esta forma de encurvadura ocorre geralmente quando um elemento apresenta menor rigidez à flexão lateral e à rotação, comparativamente à rigidez no plano de carregamento. A encurvadura lateral não aparece confinada a elementos isolados, podendo ocorrer eventualmente em estruturas com ligações rígidas, onde é verificada a continuidade das rotações entre membros adjacentes. A caracterização deste estado é de extrema importância no dimensionamento de estruturas metálicas, uma vez que pode diminuir a capacidade de carga para qual são projectadas.

A investigação teórica relativa ao fenómeno da encurvadura lateral de vigas quando submetidas à acção do fogo teve início no ano de 1759 na pessoa de Euler. Em 1989 Michel e Prandtl publicaram os primeiros trabalhos sobre este fenómeno. No ano de 1905, Timoshenko incluiu o efeito do empenamento por torção nas vigas de secção em I, às quais dedicaremos grande parte deste estudo. Em 1929, Wagner desenvolveu a teoria da encurvadura lateral por flexão e torção. Durante a década de 60, todo o trabalho publicado era desenvolvido analiticamente, tendo Lee contribuído com uma compilação escrita sobre todo o fenómeno. Depois de 1960 e com a evolução do cálculo automático verificou-se um grande aumento das publicações neste domínio, tendo este fenómeno contribuído para um resumo alargado de vários trabalhos, elaborado pelo comité de Investigação do Japão em 1971 [1.1].

Mais recentemente, Trahair [1.2], Bazant [1.3], Galambos [1.4], Kollár [1.5], e outros investigadores têm vindo a desenvolver estudos no âmbito da instabilidade de elementos estruturais, sendo este trabalho um contributo para o desenvolvimento de metodologias simples a propor para o dimensionamento de vigas à encurvadura, em situação de incêndio.

## 1.2- Objectivo e desenvolvimento da Investigação

O objectivo do trabalho visa fundamentalmente o estudo da instabilidade de estruturas metálicas quando submetidas a elevadas temperaturas, como é exemplo a acção do fogo. A análise de estruturas tridimensionais nestas condições é complexa devido às não linearidades envolvidas. Grandes deslocamentos e propriedades a variarem com a temperatura, afectam de uma forma significativa o comportamento dos elementos estruturais.

No âmbito do projecto de investigação Praxis XXI ECM “Lateral Buckling of Steel Beams Under Fire Conditions” desenvolveram-se ensaios à escala real, com o objectivo de estudar este fenómeno e de poder comparar com os resultados numéricos obtidos com um programa de elementos finitos de análise não linear de estruturas SAFIR, desenvolvido na Universidade de Liège. Apresenta-se a formulação do campo de deslocamentos generalizados do elemento de viga utilizado neste programa e é feita a comparação com outros códigos comerciais, como são exemplo os programas COSMOS e ANSYS.

No âmbito dos testes experimentais realizados, foi construída uma estrutura auxiliar que permitiu efectuar cento e vinte ensaios com diferentes comprimentos de encurvadura e sujeitos a cinco níveis de temperaturas diferentes. Foi verificada a condição inicial dos perfis cedidos pela empresa J. Soares Correia, nomeadamente as tensões residuais, a imperfeição geométrica instalada e a caracterização de resistência mecânica do material. A determinação da curva de projecto à encurvadura lateral de vigas, bem como a verificação experimental e numérica, possibilitaram a validação de uma nova proposta e a constatação de insegurança presente nas actuais curvas do Eurocódigo.

Dos vários centros de investigação sobre ensaios de fogo, com são exemplo a Universidade de Lunde na Suécia, a Universidade de Liège na Bélgica, o Instituto do fogo na Dinamarca, os laboratórios Labein em Bilbao e outros laboratórios do Reino Unido, não é conhecida qualquer investigação no domínio da encurvadura lateral em situação de incêndio, pelo que pensamos que este trabalho consitui um importante contributo para a comunidade científica em geral e para a investigação do comportamento das estruturas sujeitas ao fogo em particular.

## 1.3- Sumário dos capítulos

No capítulo 2 é feita a caracterização das propriedades térmicas e mecânicas do aço quando submetido a elevadas temperaturas. É possível verificar a diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura e ao mesmo tempo verificar as alterações micro estruturais responsáveis pela variação das propriedades que irão influenciar o comportamento do material.

No capítulo 3 são apresentadas as acções termo-mecânicas a que um elemento estrutural fica submetido durante uma situação de incêndio. São apresentados vários tipos de solicitações ou modelações de incêndio e caracterizada a combinação accidental para a solicitação mecânica. Do processo de transferência de calor produzido pelo incêndio, é feita a respectiva caracterização dos parâmetros e das formas de transferência de calor (radiação e convecção) envolvidas.

No capítulo 4 será apresentada a metodologia que descreve o movimento do componente estrutural durante o processo de encurvadura lateral, através da caracterização dos deslocamentos, deformações, tensões e das respectivas leis constitutivas. A aproximação pelo método dos elementos finitos é apresentada, bem como a definição e comparação dos vários tipos de elementos de viga, correspondentes a diferentes formulações. São apresentados os aspectos numéricos relacionados com a integração na secção recta, com a resolução de equações não lineares e respectivos procedimentos que podem ser utilizados para solucionar este tipo de problemas.

No capítulo 5 são apresentadas as equações que regem o comportamento térmico no domínio da secção recta. A aproximação por elementos finitos do campo de temperaturas é feita com elementos planos lineares. Todos os aspectos numéricos relacionados com a integração e evolução no tempo são apresentados. Alguns exemplos de aplicação pretendem demonstrar a capacidade do programa SAFIR na resolução de problemas térmicos transientes, proporcionados pelo efeito da acção do fogo em estruturas metálicas, com e sem isolamento térmico.

No capítulo 6 será caracterizada a resistência ao fogo de elementos estruturais quando submetidos a uma solicitação normalizada de incêndio ISO834. A referência aos métodos de cálculo simplificados e avançados fazem parte da proposta actual dos Eurocódigos, sendo apresentado um exemplo de método avançado para determinação da resistência ao fogo de uma estrutura, bem como a verificação da resistência desta em função do número e localização dos compartimentos sujeitos a esta acção.

No capítulo 7 será feita a descrição analítica do fenómeno de instabilidade de vigas, nomeadamente o processo de encurvadura lateral torsional, à temperatura ambiente e quando submetidas a elevadas temperaturas, decorrentes de um possível incêndio. São apresentadas as equações de equilíbrio que regem o comportamento, apresentadas soluções para os deslocamentos e determinadas as cargas críticas elásticas para a situação em estudo. São ainda apresentados alguns exemplos de carregamentos que impõem diferentes valores de cargas críticas, bem como os métodos para as determinar. É ainda apresentado o caso de estudo deste trabalho e que servirá de base aos ensaios experimentais e numéricos a efectuar.

No capítulo 8 será apresentada toda a campanha experimental desenvolvida, com especial ênfase na definição e construção de todo o equipamento dedicado ao estudo da encurvadura lateral torsional de vigas em situação de incêndio. É efectuada a caracterização do estado inicial dos perfis ensaiados e verificado o comportamento de cada um deles na situação de ensaio, à temperatura ambiente e na situação de temperaturas elevadas. São apresentados os deslocamentos a meio vão de cada viga, em função da carga a que está submetida, até ao momento do seu colapso. Estes resultados possibilitaram a verificação da curva de cálculo à encurvadura lateral do Eurocódigo 3 e a respectiva confrontação com a falta de segurança que esta apresenta, para certos valores de esbelteza adimensional.

No capítulo 9 são apresentados os resultados numéricos para as situações de ensaio real efectuadas, isto é, introduzindo no modelo numérico os dados recolhidos na campanha experimental, nomeadamente, as imperfeições geométricas, as propriedades mecânicas e as tensões residuais medidas. É efectuada a validação numérica da nova proposta de cálculo simples do momento resistente à encurvadura lateral. É ainda apresentado um estudo comparativo entre vários tipos de elementos finitos tipo viga, quando submetidos ao estado de instabilidade estudado e que contribuem para a validação numérica do programa SAFIR.

Finalmente, no capítulo 10 serão apresentadas as conclusões e discutidos desenvolvimentos futuros deste estudo.

#### **1.4- Referências**

- [1.1]- Chen, W. F.; Lui, E. M.; “Stability Design of steel frames”; CRC Press; USA; 1991.
- [1.2]- Trahair, N. S.; “Flexural Torsional Buckling of Structures”; E & FN SPON; USA; 1993.
- [1.3]- Bazant, P. Zednek; Cedolin Luigi; “Stability of Structures – Elastic, Inelastic, Fracture, and damage Theories”; Oxford University Press; 1991.
- [1.4]- Galambos, Theodore V.; “Guide to stability design criteria for metal structures”; John Wiley & Sons; 5th editon; USA; 1998.
- [1.5]- Kollár Lajos; “Structural stability in Engineering Practice”; E & FN SPON; USA; 1999.