

# A UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS AVANÇADOS DE CÁLCULO NA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Vila Real, Paulo. M. M.

Professor Associado c/ Agregação, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro

Piloto, Paulo A. G.

Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, 5300 Bragança

## RESUMO

*Neste trabalho faz-se a modelação numérica do comportamento termomecânico de duas estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo utilizando-se para o efeito um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material especialmente desenvolvido para cálculo de estruturas em situação de incêndio. O primeiro caso estudado trata uma asna em que o dono da obra apenas permitia a utilização de material de protecção nos banzos e o segundo caso é uma estrutura porticada pertencente a um edifício do tipo comercial em estrutura metálica, para a qual se estudaram vários cenários de incêndio possíveis de modo a definir a situação mais desfavorável do ponto de vista da sua resistência ao fogo.*

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança contra incêndios de edifícios tem vindo a merecer em Portugal uma atenção crescente [1], começando a surgir no nosso País regulamentação que abrange os vários tipos de edifícios existentes [2-10]. Entre as exigências estabelecidas nestes regulamentos encontra-se a “Resistência ao Fogo” de elementos estruturais, que se avalia pelo tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado (no presente trabalho a curva de incêndio padrão ISO 834 representada na figura 1), a que o elemento é submetido, até ao momento em que ele deixa de satisfazer as funções para que foi projectado.

Dada a inexistência em Portugal de regulamentação relativa ao cálculo estrutural ao fogo foram utilizados, neste trabalho, os seguintes Eurocódigos, que se encontram ainda em fase de Pré-Norma (ENV):

- Eurocódigo 1, Parte 2.2 – Acções em Estruturas Sujeitas a Incêndio [11], onde se faz a caracterização das acções térmicas;
- Eurocódigo 3, Parte 1.2 – Cálculo Estrutural ao Fogo [12], onde se estabelecem as regras para o cálculo da capacidade resistente das estruturas de aço em situação de incêndio e se definem as propriedades térmicas e mecânicas do aço em função da temperatura.

ISBN: 972-9025-63-0

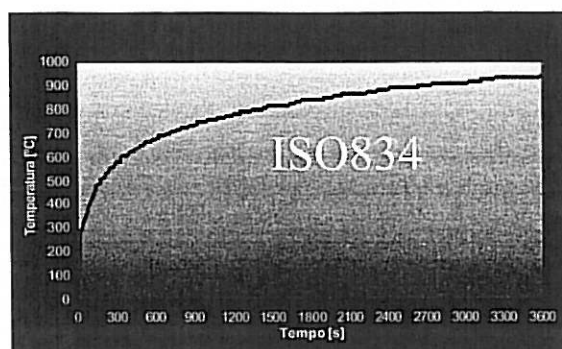


Figura 1 - Curva de incêndio padrão ISO 834.

De acordo com a Parte 1.2 do Eurocódigo 3, o Cálculo Estrutural ao Fogo pode ser feito em dois níveis de sofisticação crescente:

- *Métodos simplificados de cálculo*, fazendo uso de fórmulas analíticas aplicáveis apenas a elementos estruturais isolados;
- *Métodos avançados de cálculo*, os quais podem ser usados na simulação do comportamento de:
  1. Estrutura Global;
  2. Partes da estrutura, como por exemplo pórticos ou sub-estruturas em que há necessidade de determinar as condições de fronteira que nelas actuam, as quais se consideram constantes durante a ocorrência do incêndio;
  3. Elementos estruturais isolados (vigas, pilares ou lajes), desprezando qualquer interacção entre eles.

Em qualquer caso, o cálculo da resistência ao fogo do elemento ou estrutura com funções de suporte de cargas é feito impondo que, após um determinado instante de tempo  $t$  de exposição ao fogo normalizado, se verifique a condição [12]:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (1)$$

onde,  $E_{fi,d,t}$ , é o valor de cálculo dos efeitos das acções (térmicas e mecânicas) em situação de incêndio no instante  $t$ , determinado de acordo com a combinação acidental de acções expressa na ENV 1991-2-2 [11] e  $R_{fi,d,t}$  é o valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante  $t$ .

## 2. MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Existem actualmente vários programas de cálculo automático para análise da resistência ao fogo das estruturas, que vão desde programas baseados nos *métodos simplificados de cálculo* definidos nos Eurocódigos, até programas mais complexos de análise não - linear, baseados no método dos elementos finitos e que se incluem nos chamados *métodos avançados de cálculo* referidos nos Eurocódigos. Entre estes últimos encontra-se o programa SAFIR [13] que é um código de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège vocacionado para a análise de estruturas sujeitas à acção do fogo.

### 2.1 O programa SAFIR

O programa SAFIR é constituído por dois módulos de cálculo distintos, um para a análise do comportamento térmico da estrutura e outro para a análise do seu comportamento mecânico. Assim, numa primeira fase calcula-se a evolução do campo não uniforme de temperaturas,

para cada secção tipo existente na estrutura, e numa fase posterior o módulo mecânico do programa lê estas temperaturas e faz o cálculo do comportamento mecânico da estrutura em regime transiente.

### 2.1.1 Análise do comportamento térmico

O programa SAFIR permite fazer a análise do comportamento térmico das estruturas quer utilizando elementos sólidos tridimensionais (3D), quer utilizando elementos planos bidimensionais (2D). Os elementos sólidos são lineares de oito nós e os elementos planos, também lineares podendo ser triangulares de 3 nós ou quadriláteros com 4 nós.

É possível a consideração de mais do que um material possibilitando assim a análise de elementos com protecção térmica.

#### 2.1.1.1 A equação de condução de calor e suas condições de fronteira

O calor propaga-se no aço por condução sendo a equação diferencial que rege o fenómeno dada por

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

em que  $\lambda$  é a condutividade térmica,  $\dot{Q}$  é o calor gerado internamente por unidade de volume e de tempo,  $\rho$  a massa específica,  $c_p$  o calor específico,  $\theta$  a temperatura e  $t$  o tempo.

O campo de temperaturas que satisfaz esta equação deve satisfazer certas condições de fronteira, que podem ser: temperaturas prescritas numa parte  $\Gamma_\theta$  da fronteira; fluxo de calor prescrito  $\bar{q}$  numa outra parte  $\Gamma_q$  da fronteira; transmissão de calor por convecção entre uma parte  $\Gamma_c$  da fronteira à temperatura  $\theta$ , e o meio ambiente à temperatura  $\theta_\infty$

$$q_c = h_c(\theta - \theta_\infty) \quad \text{em } \Gamma_c \quad (3)$$

em que  $h_c$  é o coeficiente de transmissão de calor por convecção; transmissão de calor por radiação entre uma parte  $\Gamma_r$  da fronteira à temperatura absoluta  $\theta$ , e a superfície absorvente à temperatura absoluta  $\theta_a$

$$q_r = \beta \epsilon (\theta^4 - \theta_a^4) = \underbrace{\beta \epsilon (\theta^2 + \theta_a^2)(\theta + \theta_a)}_{h_r} (\theta - \theta_a) = h_r (\theta - \theta_a) \quad \text{em } \Gamma_r \quad (4)$$

em que  $\beta$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $\epsilon$  é a emissividade e  $h_r$  é o coeficiente de transmissão de calor por radiação. No caso da transferência de calor na fronteira se processar simultaneamente por convecção e por radiação e em particular se for,  $\theta_\infty = \theta_a$ , pode escrever-se

$$q_{cr} = q_c + q_r = h_c(\theta - \theta_\infty) + h_r(\theta - \theta_a) = h_{cr}(\theta - \theta_\infty) \quad (5)$$

em que  $h_{cr} = h_c + h_r$  é o coeficiente de transmissão de calor por convecção e (ou) por radiação.

#### 2.1.1.2 Discretização por elementos finitos e integração no tempo da equação de condução de calor

Aplicando à eq. (2) e às suas condições de fronteira, o método dos resíduos pesados, usando elementos finitos  $\Omega^e$  para discretizar o domínio, uma formulação fraca e o método de Galerkin, obtém-se, o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{F} \quad (6)$$

onde

$$K_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} (\nabla N_l \lambda \nabla N_m) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} N_l N_m d\Gamma_h^e \quad (7)$$

$$C_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_l N_m d\Omega^e ; \quad (8)$$

$$F_l = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_l \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_l \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_h^e} N_l h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h^e \quad (9)$$

em que  $E$  é o número total de elementos,  $Q$  é o nº de elementos com fronteira do tipo  $\Gamma_q$ ,  $H$  é o nº de elementos com fronteiras do tipo  $\Gamma_c$  e (ou)  $\Gamma_r$ ,  $N_l$  e  $N_m$  são as habituais funções de forma.

Adoptando uma discretização do tempo através de diferenças finitas o sistema de equações diferenciais ordinárias (6) resulta na seguinte fórmula de recorrência:

$$\hat{K}_{n+\alpha} \theta_{n+\alpha} = \hat{F}_{n+\alpha} ; \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (10)$$

onde

$$\hat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (11)$$

e

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha} \theta_n \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (12)$$

Resolvido o sistema de equações (10), para  $\theta_{n+\alpha}$ , no instante  $t_{n+\alpha}$ , o valor de  $\theta$  no final do intervalo de tempo  $\Delta t$ , ou seja, no instante  $t_{n+1}$  é dado por

$$\theta_{n+1} = \frac{1}{\alpha} \theta_{n+\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \theta_n \quad (13)$$

sendo estas as condições iniciais quando se avança para o intervalo de tempo seguinte. Fazendo variar o parâmetro  $\alpha$ , obtêm-se vários esquemas de integração no tempo, sendo os mais usuais os correspondentes a  $\alpha = 1/2$  (*Crank-Nicolson*),  $\alpha = 2/3$  (*Galerkin*) e  $\alpha = 1$  (*Euler Backward*) [16].

Segundo Hughes [17], o algoritmo que acabamos de apresentar nas equações (10) a (13) tem os mesmos critérios de estabilidade, quer se trate de problemas lineares ou de problemas não-lineares, sendo *incondicionalmente estáveis* quando  $\alpha \geq 1/2$ .

### 2.1.1.3 O processo iterativo para solução do problema não-linear

Em problemas não-lineares, em que as propriedades térmicas do material dependem da temperatura, o sistema de equações (6) pode ser escrito na seguinte forma

$$K(\theta, t) \theta(t) + C(\theta, t) \dot{\theta}(t) = F(\theta, t) \quad (14)$$

Não há um método geral para resolver este sistema não linear de equações diferenciais. No entanto existem várias técnicas numéricas essencialmente baseadas numa integração linear no tempo e utilizando processos iterativos, [16-19]. Foram implementadas e comparadas algumas dessas técnicas em [18].

Implementou-se o algoritmo proposto por Damjanic [19] e mais tarde utilizado por Vila Real [18,20]. Agora as matrizes  $K$  e  $C$  e o vector  $F$ , necessários à construção de  $\hat{K}_{n+\alpha}$  e de  $\hat{F}_{n+\alpha}$  dados pelas equações (11) e (12), podem variar ao longo do intervalo de tempo  $\Delta t$  em função da temperatura e do tempo, pelo que devem ser calculados no instante  $t_{n+\alpha}$ .

Assim,

$$K_{n+\alpha} = K(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) ; \quad (15)$$

$$C_{n+\alpha} = C(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}); \quad (16)$$

$$F_{n+\alpha} = F(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (17)$$

Devido a esta não linearidade, a equação (10) não é, em geral, satisfeita, pelo que é necessário implementar um processo iterativo com vista à obtenção da convergência. Neste trabalho adoptou-se um procedimento baseado no método de *Newton-Raphson modificado* [19], que em seguida se descreve sucintamente.

Não sendo satisfeita a equação (10), durante o passo  $i$  do processo iterativo existirá um sistema de *forças residuais* da forma:

$$\Psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i - \hat{K}_{n+\alpha}^i \theta_{n+\alpha}^{i+1} \neq 0 \quad (18)$$

A solução corrigida,  $\theta_{n+\alpha}^{i+1}$ , em cada iteração, pode ser calculada por

$$\Delta\theta_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}^i]^{-1} \Psi_{n+\alpha}^i \quad (19)$$

e

$$\theta_{n+\alpha}^{i+1} = \theta_{n+\alpha}^i + \Delta\theta_{n+\alpha}^i \quad (20)$$

em que a matriz,  $\hat{K}_{n+\alpha}^i$ , em (19) corresponde à matriz Jacobiana do método de Newton-Raphson original, mas em que se retiraram os termos não simétricos com o objectivo de preservar a simetria [19].

O processo iterativo continua, resolvendo-se o sistema (19) para  $\Delta\theta_{n+\alpha}^i$ , em cada novo passo do processo iterativo, até que a solução convirja, sendo a matriz  $\hat{K}_{n+\alpha}^i$  em (19) actualizada em cada iteração. É, no entanto, possível implementar variantes do método de Newton-Raphson em que aquela matriz é apenas actualizada em iterações predefinidas, numa tentativa de reduzir os tempos de computação ou, eventualmente, de melhorar a solução obtida [18,19].

### 2.1.2 Análise do comportamento mecânico

A análise transiente do comportamento mecânico das estruturas utiliza, como se disse, os resultados da análise térmica previamente efectuada.

Para além do elemento sólido estão também disponíveis no SAFIR elementos de barra e de viga, sendo possível com estes dois últimos modelar estruturas reticuladas tridimensionais.

O elemento de viga baseia-se na hipótese de Bernoulli, em que as secções planas antes da deformação se mantêm planas depois da deformação e o efeito do esforço transversal não é tido em consideração. Por outro lado este elemento não contempla encurvadura local, razão pela qual se devem apenas utilizar perfis com secções da Classe 1 e da Classe 2 de acordo como são definidas no eurocódigo 3 [14].

A secção recta dos elementos é discretizada através de elementos finitos aos quais correspondem fibras, sendo em cada ponto de integração longitudinal, todas as variáveis, tais como a temperatura, a deformação, a tensão, etc. uniformes em cada fibra. A discretização do elemento de viga através do modelo de fibras, permite a consideração de tensões residuais [15, 16] e mesmo a introdução de pré-esforço em estruturas de betão.

O critério de colapso da estrutura é definido como sendo o instante em que a sua matriz de rigidez deixa de ser definida positiva, não sendo mais possível estabelecer o equilíbrio da estrutura. O programa utiliza a técnica do comprimento de arco, "*arc-length*", para resolver os problemas de ruína local que por vezes surgem. De facto em estruturas hiperstáticas pode acontecer que a ruína de um dos seus elementos não corresponda ao colapso global da estrutura. É possível que para além do instante em que ocorre a ruína local, a parte dos

esforços que não pode mais ser suportada pelo elemento em questão seja redistribuída pelos outros elementos da estrutura, encontrando esta uma nova posição de equilíbrio.

### 3. ACÇÕES EM ESTRUTURAS SUJEITAS A FOGO

#### 3.1 Acções mecânicas

O valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio,  $E_{fi,d,t}$ , deve ser obtido usando-se a seguinte combinação de acidente definida no Anexo F da parte 2-2 do Eurocódigo 1 [11]:

$$\sum \gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (2)$$

onde

- $\gamma_{GA}$  - é o coeficiente de segurança parcial para as acções permanentes em situação de acidente, o qual deve tomar o valor unitário [ $\gamma_{GA} = 1$ ];
- $G_k$  - é o valor característico das acções permanentes;
- $Q_{k,1}$  - é o valor característico da acção variável principal ou dominante;
- $\psi_{1,1}$  - é o coeficiente de combinação associado à acção variável principal ou dominante [17];
- $\psi_{2,i}$  - é o coeficiente de combinação associado às restantes acções variáveis [17];
- $A_d(t)$  - é o valor de cálculo da acção resultante da exposição ao fogo e que se traduz no efeito da temperatura sobre as propriedades dos materiais e nas acções indirectas de incêndio a que correspondem os esforços resultantes das restrições às dilatações térmicas.

#### 3.2 Acções térmicas

No que diz respeito às acções térmicas a parte 2-2 do Eurocódigo 1 [11] estabelece que a temperatura de incêndio pode ser dada em termos de curvas nominais tempo - temperatura ou sob a forma de curvas paramétricas.

As curvas nominais são curvas convencionais que podem ser definidas por uma fórmula simples e que não dependem da dimensão ou do tipo dos edifícios. São assim definidas três curvas nominais:

1. Curva de incêndio padrão ISO 834;
2. Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores;
3. Curva de incêndio de hidrocarbonetos.

As curvas de incêndio paramétricas distinguem-se das anteriores por possuírem fase de arrefecimento. Estas curvas pretendem traduzir de modo mais apropriado os incêndios reais e têm em conta os principais parâmetros que influenciam a extensão e o desenvolvimento dos incêndios, ou seja, a dimensão do edifício, o factor de abertura do compartimento de incêndio e a densidade de carga de incêndio.

Neste trabalho utilizou-se, como se referiu, a curva de incêndio padrão ISO 834 (fig. 1), cuja expressão analítica é dada por [11]:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

onde

- $\theta_g$  é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em [°C];
- $t$  é o tempo em [min].

## 4. CASOS ESTUDADOS

### 4.1 Caso 1: Asna metálica

Fez-se um estudo da resistência ao fogo da asna metálica para um edifício do tipo comercial, com planta rectangular com asnas de cobertura com cerca de 49 metros de vão (fig. 2) assentes em pilares de betão armado, para a qual o dono da obra exigia inicialmente uma resistência ao fogo de 30 minutos [19]. Como a resistência ao fogo da asna calculada deu inferior a 30 minutos recorreu-se à utilização de material termicamente isolante de modo a que fosse atingida aquela resistência. Por razões de ordem prática pretendia-se proteger apenas o banzo superior e o banzo inferior mantendo as diagonais sem protecção. Dado que as diagonais desprotegidas limitavam a resistência ao fogo da asna não foi possível respeitar a resistência exigida. No entanto, como se tratava de um edifício que possuía apenas rés-do-chão sem cave foi abandonada aquela exigência inicial de 30 minutos, pois a própria regulamentação não faz qualquer exigência de resistência ao fogo nestes casos.

Os banzos da asna são constituídos pela associação de dois perfis UNP ( $\square$   $\square$ ). O banzo inferior é constituído por dois perfis UNP140 e o superior tem dois troços, um com perfis UNP120 e outro com perfis UNP140, sendo as diagonais e montantes constituídos por perfis tubulares SHS 90x90x3.6 e SHS 90x90x6.3, conforme se ilustra na figura 2.

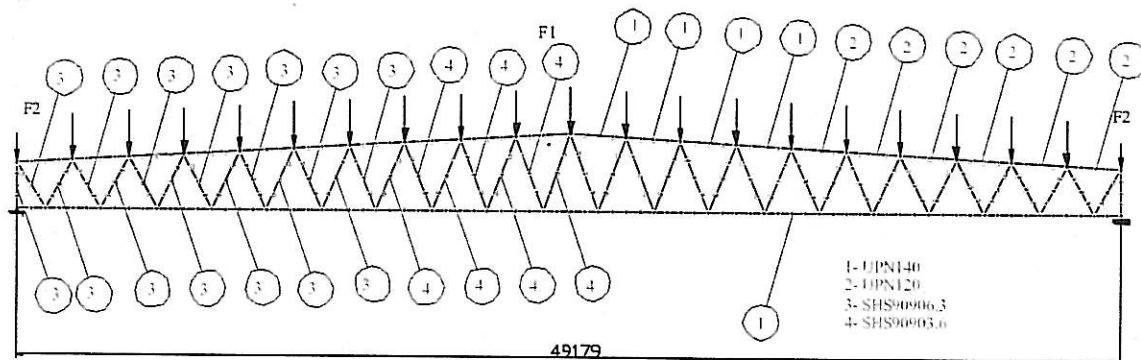


Figura 2 - Asna treliçada com cerca de 49 metros de vão. Perfis adoptados na constituição da asna.

As asnas estão espaçadas de 7.5 metros e o seu peso próprio é de 1 kN/m, sendo o peso dos revestimentos e das madres de 1.65 kN/m. A este carregamento uniformemente distribuído correspondem as forças nodais concentradas,  $F_1 = 6.53kN$  e  $F_2 = 3.265kN$  representadas na figura 2.

O aço utilizado é o S275 e as suas propriedades térmicas e mecânicas estão definidas no Eurocódigo 3 [12,14].

Foi adoptado, como se disse, no cálculo da resistência ao fogo da asna, o método dos elementos finitos.

Procurou-se aumentar a resistência ao fogo da estrutura recorrendo à utilização de placas de gesso de 13 mm de espessura, dispostas em caixão nos dois banzos da asna.

#### 4.1.1 Análise por elementos finitos

##### 4.1.1.1 Acção térmica

O estudo compreendeu uma prévia análise térmica das secções utilizadas, sujeitas, como se disse, à curva de incêndio padrão ISO 834.

As secções foram discretizadas em elementos quadrangulares e triangulares lineares conforme se representa na figura 3.

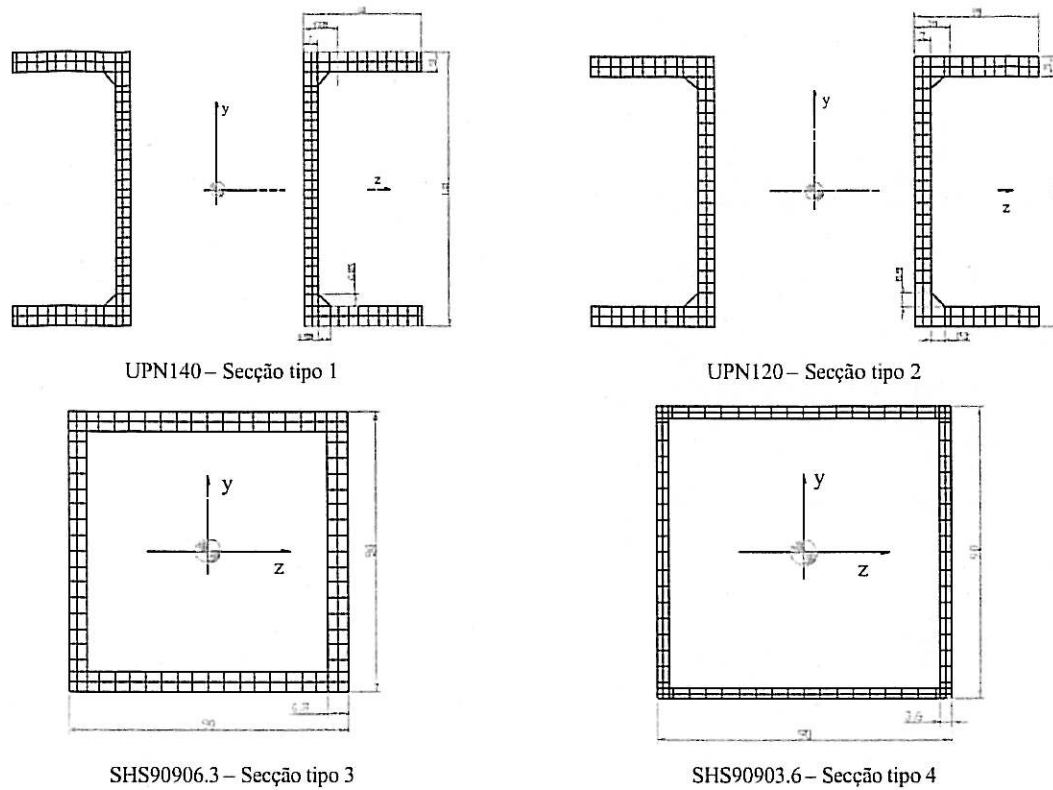


Figura 3 - Discretização por elementos finitos da secção recta dos perfis utilizados.

Após análises térmicas transientes, foi possível determinar a evolução da temperatura nos perfis quando solicitados externamente pela acção do fogo. Na figura 4 apresentam-se os campos de temperatura para alguns instantes de tempo. Foram utilizadas condições de simetria para simplificar o estudo.

No caso dos perfis tubulares, o interior foi considerado isolado. Na realidade deveria ter sido considerado como um vazio interno, no qual a temperatura tenderia a aumentar em função do fluxo de calor para o seu interior. No entanto, e tendo em consideração o baixo valor do calor específico do ar, esta modelação originaria uma distribuição de temperaturas similar à situação correspondente a isolamento, pelo que se optou pelo primeiro modelo.

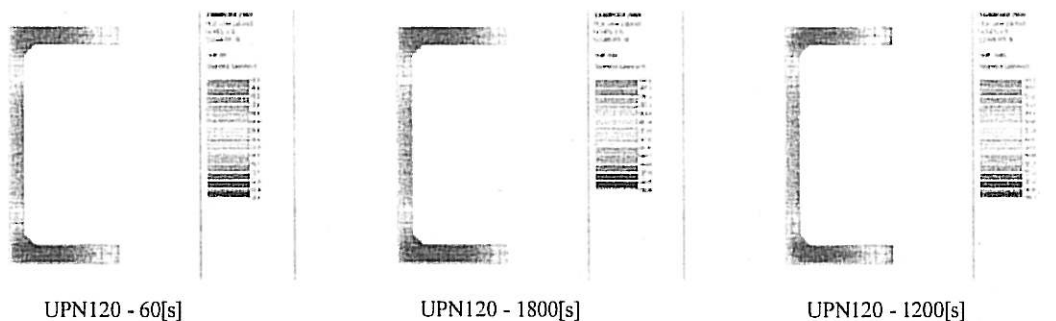


Figura 4 - Evolução da temperatura nas secções dos perfis.

Com o objectivo de aumentar a resistência ao fogo da estrutura, protegeram-se os perfis com placas de gesso com 13 mm de espessura, com as seguintes características térmicas [11,18]:

- Condutividade térmica = 0.2 [W/mK]
- Calor específico 1700 = [J/kgK]
- Emissividade relativa = 0.5
- Densidade = 800 [kg/m<sup>3</sup>]

- Coeficiente de convecção nas superfícies aquecidas = 25 [W/m<sup>2</sup>K]
- Coeficiente de convecção nas superfícies não directamente aquecidas = 9 [W/m<sup>2</sup>K].

Na figura 5 estão representadas as discretizações em elementos finitos das secções com as placas de gesso dispostas em caixão.

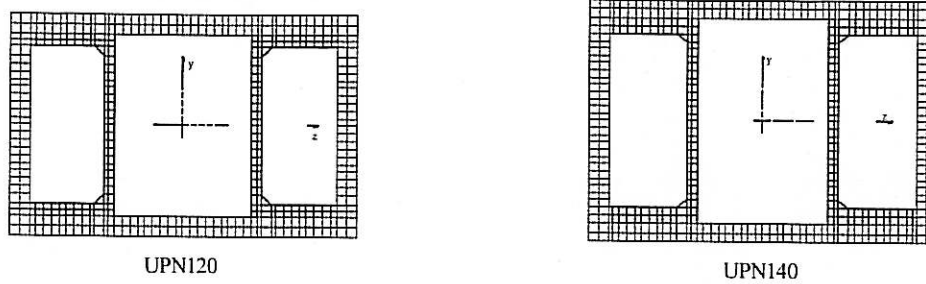


Figura 5 – Protecção em caixão dos banzos da asna.

Os campos de temperatura obtidos com esta solução estão representados na figura 6. Nesta situação considerou-se que a região isolada constituía um vazio interno, o que está mais próximo da realidade.

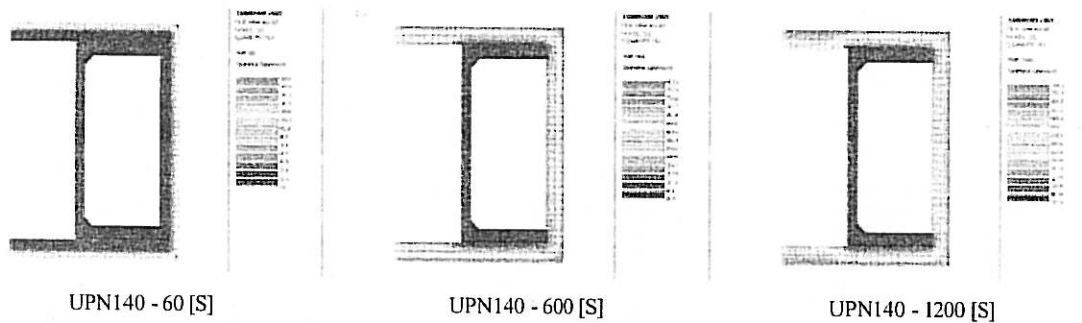


Figura 6 – Campo de temperaturas com protecção em caixão.

#### 4.1.1.2 Comportamento termomecânico

Após estar definido o efeito da acção térmica em cada perfil, o carregamento mecânico foi aplicado no início e mantido constante durante a evolução no tempo.

Os tempos de resistência ao fogo obtidos foram os seguintes:

- Sem qualquer protecção .....  $t_{cr} = 14.0$  minutos
- Com protecção em caixão dos banzos da asna com placas de gesso .....  $t_{cr} = 23.6$  minutos

Na figura 7 é comparada a deformada da estrutura ampliada 10 vezes para as duas situações estudadas.

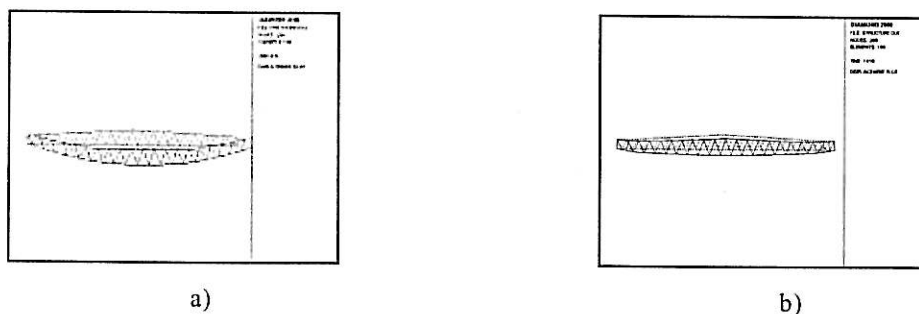


Figura 7 - Deformada da estrutura no instante de colapso para as duas situações estudadas. Ampliação 10X.  
a) Sem protecção térmica. b) Com protecção térmica.

### 4.2 Caso 2: Estrutura porticada

Fez-se o estudo paramétrico dos vários cenários de incêndio que podem ocorrer numa estrutura metálica porticada, com dois vãos e três pisos como a que se mostra na figura 8 [20].

A resistência ao fogo da estrutura, correspondente aos vários cenários de incêndio analisados, adoptando para o efeito a curva de incêndio padrão ISO 834, apresenta-se resumida na figura 8, onde estão indicados os tempos em segundos até se atingir o colapso da estrutura.

Desta figura pode-se constatar que o cenário de incêndio mais desfavorável para a estrutura em causa corresponde à ocorrência de incêndio simultaneamente em todos os compartimentos do edifício.

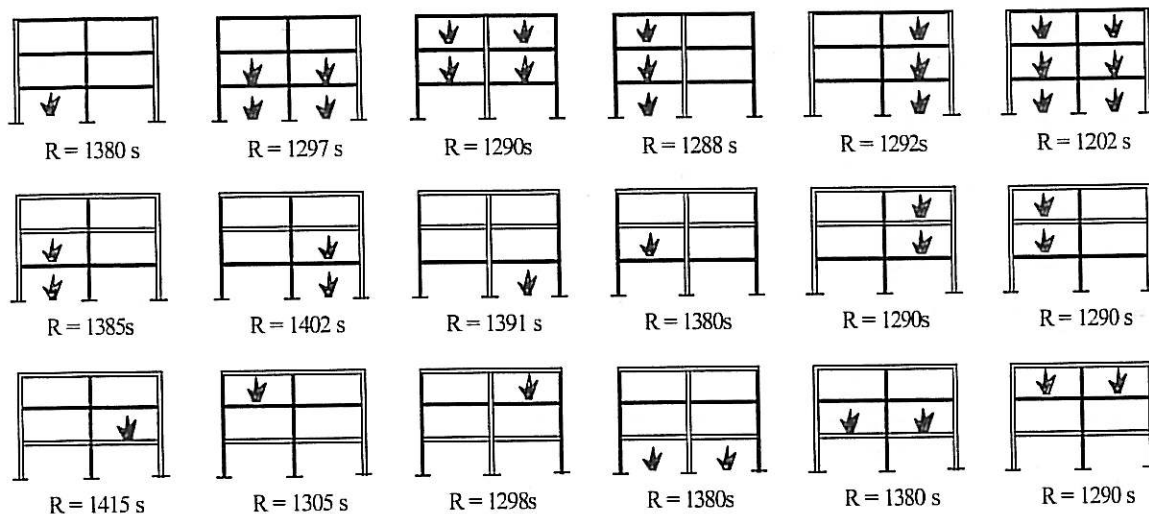


Figura 8 – Resistência ao fogo para vários cenários de incêndio.

Na figura 9 está representada a deformada da estrutura ao fim de 300 e de 1200 segundos de exposição ao incêndio padrão em todos os compartimentos em simultâneo.

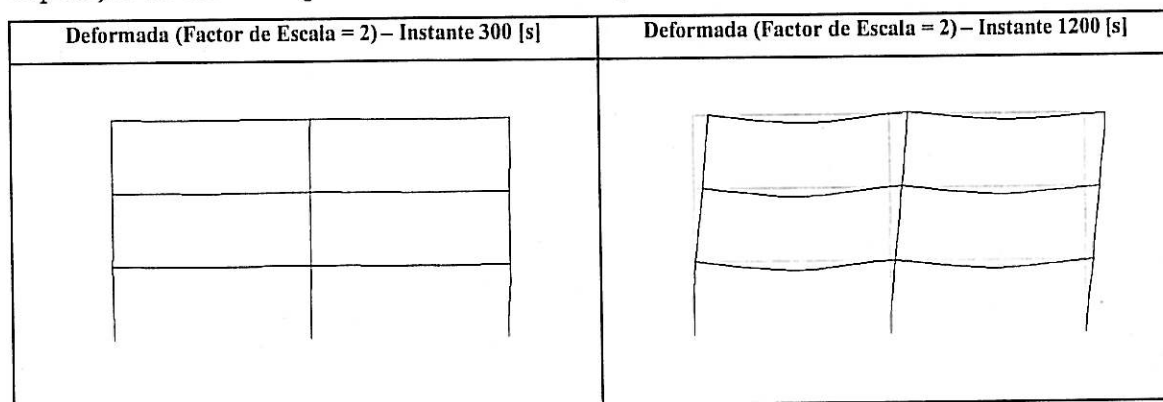


Figura 9 – Resultados correspondentes ao cenário de incêndio com fogo em todos os compartimentos.

## 5. CONCLUSÕES

Fez-se o cálculo da resistência ao fogo de duas estruturas metálicas considerando-se ou não protecção ao fogo.

O método de análise adoptado enquadra-se nos chamados *métodos avançados de cálculo* preconizados nos Eurocódigos, tendo sido utilizado um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material desenvolvido na Universidade de Liège, especialmente destinado ao estudo do comportamento das estruturas em situação de incêndio.

Trata-se de um programa com enormes potencialidades como ficou demonstrado, que permite o cálculo da resistência ao fogo de estruturas metálicas com ou sem protecção, estruturas mistas aço-betão e ainda de estruturas de betão.

## REFERÊNCIAS

- [1] CABRITA NEVES, I. – “Betão estrutural – Resistência ao Fogo e Eurocódigos”, Betão Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 305-318, 1994.
- [2] Regulamento de Segurança contra Incêndios em Edifícios de Habitação, Dec. Lei nº 64/90 de 21 de Fevereiro.
- [3] Normas de Segurança contra Risco de Incêndio a aplicar a Estabelecimentos Comerciais (incluindo Anexo sobre Medidas de Segurança contra riscos de Incêndio a aplicar em estabelecimentos Comerciais), Dec. Lei nº 368/99 de 18 de Setembro.
- [4] Medidas Cautelares Mínimas contra Riscos de Incêndio a Aplicar aos Locais e seus Acessos Integrados em Edifícios onde estejam Instalados Serviços Públicos e da Administração Central, Regional e Local, Instituições de Interesse Público e Entidades Tuteladas pelo Estado, Resolução do Conselho de Ministros, nº 31/89 de Agosto.
- [5] Regulamento de Segurança contra Risco de Incêndio em Centros Urbanos Antigos, – Dec. Lei nº 126/89 de 16 de Dezembro.
- [6] Regulamento de Empreendimentos Turísticos e Estabelecimentos de Restauração e Bebidas, Portaria nº1063/97 de 21 de Outubro..
- [7] Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios do tipo Administrativo, Dec. Lei nº 410/98, 23 de Dezembro de 1998.
- [8] Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios Escolares, Dec. Lei nº 414/98, 31 de Dezembro de 1998.
- [9] Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios do tipo Hospitalar, Dec. Lei nº 409/98, de , 23 de Dezembro de 1998.
- [10] Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Parques de Estacionamento Cobertos, Dec. Lei nº 66/95, 8 de Abril.
- [11] CEN, ENV 1991-2-2; “Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures – Part 2-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire”; February 1995.
- [12] CEN, ENV 1993-1-2; “Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”; November 1993.
- [13] FRANSSEN, J.-M.; “SAFIR - Numerical program for materially and geometrically non-linear analysis of structures exposed to fire”; Institut du Génie Civil; Service “Ponts et Charpents”; Univerité de Liège.
- [14] CEN, ENV 1993-1-1; “Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”; December 1992.
- [15] VILA REAL, P. M. M.; FRANSSEN, J. M. – “Numerical Modelling of Lateral Buckling of Steel I Beams Under Fire Conditions – Comparison with Eurocode 3”, Vol. 11, No. 2, pp. 112-128, Journal of Fire Protection Engineering, USA, May 2001.
- [16] VILA REAL, P. M. M.; PILOTO, P A. G.; FRANSSEN, J. M. – “A New Proposal of a Simple Model for the Lateral-Torsional Buckling of Unrestrained Steel I-Beams in Case of Fire: Experimental and Numerical Validation”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59/2, pp. 179-199, Elsevier Science, 2002.
- [17] CEN, ENV 1991-1; “Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures – Part 1: Basis of design”; october 1994.
- [18] ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures, “Explanatory Document for ECCS N° 89, Euro-Nomogram, Fire Resistance of Steel Structures”, ECCS N° 92, 1996.
- [19] VILA REAL, P. M. M.; PILOTO, P A. G.; GIL, CARLOS, “Cálculo da Resistência ao Fogo de uma Asna Metálica”, comunicação apresentada no III Encontro de Construção Metálica e Mista, Aveiro 6 a 7 de Dezembro de 2001, Universidade de Aveiro.
- [20] VILA REAL, P. M. M.; PILOTO, P. A. G.; FRANSSEN, J.-M. – “Modelação Numérica do Comportamento de uma Estrutura Metálica Sujeita à Acção do Fogo – Análise de Vários Cenários de Incêndio”, – Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, LNEC, pp. 23-32, Março de 2000.