

Elza Fonseca
Paulo Vila Real

Análise não-linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo

58

Elza Fonseca
Paulo Vila Real

Análise não-linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo

SÉRIE

Estudos

EDIÇÃO DO INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

Título: Análise não-linear do comportamento termo-mecânico de
componentes em aço sujeitas ao fogo

Autores: Elza M. M. Fonseca e Paulo M. M. Vila Real

Edição: Instituto Politécnico de Bragança · 2002

Apartado 1138 · 5301-854 Bragança · Portugal

Tel. 273 331 570 · 273 303 200 · Fax 273 325 405 · <http://www.ipb.pt>

Execução: Serviços de Imagem do Instituto Politécnico de Bragança

(grafismo, Atilano Suarez; paginação, Luís Ribeiro;

montagem, Maria de Jesus; impressão, António Cruz,

acabamento, Isaura Magalhães)

Tiragem: 500 exemplares

Depósito legal nº 166516/01

ISBN 972-745-060-1

Aceite para publicação em 1999

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto n.º PBIC/C/CEG/2446/95 financiado pela FCT intitulado *Modelação Numérica do Comportamento das Estruturas Metálicas Sujeitas a Altas Temperaturas*.

Índice

Agradecimentos	5
1 · Introdução	9
2 · Propriedades Térmicas dos Aços	11
3 · Propriedades Mecânicas do Aço	15
4 · Equações Gerais	19
4.1 · Modelo Térmico	19
4.1.1 . Curva de Incêndio Padrão ISO 834	21
4.2 · Modelo Mecânico	22
5 · Exemplo de Aplicação	25
6 · Conclusões	31
7 · Referências	33

Análise não-linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo

Resumo

Neste trabalho apresenta-se um conjunto de informação relativa às propriedades térmicas e mecânicas do aço quando sujeito a altas temperaturas, de acordo com o Eurocódigo 3.

Desenvolveu-se um programa de elementos finitos FEMSEF98 – ‘Finite Element Modelling of Structures Exposed to Fire 98’, que permite o estudo do comportamento termo-elastoplástico de componentes em aço sujeitas à acção do fogo.

Fez-se o estudo do comportamento termo-mecânico de um tubo cilíndrico espesso de aço submetido externamente à acção do fogo, tendo sido utilizada para o efeito a curva de incêndio padrão ISO 834.

Apresenta-se a evolução, no tempo, do campo de temperaturas e de tensões térmicas, em regime não-linear, obtida com o código FEMSEF98, sendo os resultados obtidos comparados com os que se obtêm com o programa comercial COSMOS.

Palavras-Chave:

Termo-Mecânico, Eurocódigos, Elastoplasticidade, Elementos Finitos, Fogo, Tensões Térmicas.

Abstract

This work presents a set of information about the mechanical and thermal properties of steel, when submitted to high temperatures, according to Eurocode 3.

A finite element code has been developed FEMSEF98 – ‘Finite Element Modelling of Structures Exposed to Fire 98’, which makes possible the study of thermo-elastoplastic behaviour of steel components submitted to fire.

The study of thermo-mechanical behaviour of a thick steel cylinder, submitted to external fire, using the standard fire curve ISO 834, has been made.

The non-linearity evolution of the temperature has been presented, the thermal stresses evolution with time, obtained with the FEMSEF98, and the results were compared with the commercial finite element code COSMOS.

Key-words:

Thermo-Mechanical, Eurocodes, Elastoplasticity, Finite Elements, Fire, Thermal Stresses.

Résumé

Dans ce travail on présente un ensemble d’information sur les propriétés thermiques et mécaniques de l’acier quand il est soumis à élevées températures, suivant l’eurocode 3.

On a développé un logiciel avec les éléments finis FEMSEF98 – ‘Finite Element Modelling of Structures Exposed to Fire 98’, qui permis étudier le conduite thermo-elastoplastique de composants en acier soumises à l’action du feu.

On étudie le conduite thermomécanique d’un tube cylindrique épais, à l’action du feu externe.

On présente les évolutions, dans le temps, des champs des températures et de tensions thermiques, au régime non-linéaire, avec le programme FEMSEF98 et les résultats comparées avec le logiciel commercial des éléments finis COSMOS.

Mots-clé:

Thermomécanique, Eurocodes, Elastoplasticité, Éléments Finis, Incendie, Tensions Thermiques.

1 · Introdução

Durante a última década tem havido um progresso importante no desenvolvimento de métodos analíticos para o cálculo do comportamento ao fogo de elementos de aço. Estes métodos estão sendo utilizados presentemente em diversos países sempre que tal é possível, como uma alternativa à classificação convencional baseada directamente nos resultados dos ensaios normalizados de resistência ao fogo.

A determinação da distribuição de temperatura e verificação da resistência térmica é um problema que interessa a muitos ramos da ciência e da engenharia: na indústria nuclear, aeroespacial, nas instalações de aquecimento e ar condicionado, em edifícios... Todos os problemas inerentes à concepção, ao cálculo, protecção de estruturas, deverão ser analisados em conjunto para que soluções óptimas sejam tomadas.

Os incêndios afectam o comportamento estrutural dos materiais, pois alteram as suas propriedades físicas e mecânicas. Por consequência um dimensionamento de natureza técnica exige que se faça a quantificação da exposição ao fogo, por um lado, e que se avaliem, por outro, os efeitos que tal exposição terão no comportamento estrutural.

O estudo do comportamento termo-mecânico de peças metálicas sujeitas à acção do fogo é um problema complexo devido por um lado às propriedades térmicas e mecânicas do aço dependerem

fortemente da temperatura e por outro à complexidade geométrica das peças. Por outro lado as técnicas experimentais para obtenção da evolução das temperaturas e das deformações são dispendiosas pelo que é fundamental a utilização de modelos numéricos de simulação do processo de aquecimento quando as peças estão sujeitas ao fogo. O desenvolvimento de um programa de cálculo automático de análise térmica e mecânica, permite-nos avaliar facilmente a evolução das temperaturas nesses elementos, bem como ainda analisar o campo de tensões a que vão estar sujeitos. Neste contexto desenvolveu-se um programa de elementos finitos, FEMSEF98, que permite a determinação da evolução dos campos de temperatura e de tensão ao longo do tempo.

O método dos elementos finitos é um método de discretização que permite a conversão de um modelo contínuo num modelo discreto aproximado. Este método origina uma solução aproximada das equações diferenciais, transformadas em equações algébricas.

Neste trabalho, para determinação das tensões de origem térmica admite-se que o problema se pode decompor em dois problemas distintos que se resolvem consecutivamente [1,2]. Assim, com base na teoria da condução de calor obtêm-se as variações de temperatura que ocorrem durante um intervalo de tempo e seguidamente com base num modelo termo-elastoplástico, determinam-se as alterações ao campo de tensões provocadas por aquelas variações térmicas. Adoptou-se o critério de cedência de von Mises e uma lei associativa para o escoamento plástico, incluindo os efeitos de endurecimento isotrópico do material.

No que respeita à não-linearidade utilizou-se o método iterativo incremental baseado no método de Newton-Raphson modificado.

2 · Propriedades Térmicas dos Aços

As propriedades térmicas dos aços variam segundo expressões analíticas fornecidas pelo Eurocódigo 3 [4], dentro de intervalos de temperatura definidos. A consideração da influência da temperatura na variação das propriedades é importante por se considerar assim, uma aproximação mais real do comportamento térmico dos materiais.

No caso do calor específico, o gráfico da figura 1, representa a sua evolução em função da temperatura do aço, θ_a , de acordo com as expressões analíticas a seguir indicadas:

para, $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$

$$C_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad [\text{J/KgK}] \quad (1a)$$

para, $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$

$$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/KgK}] \quad (1b)$$

para, $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J/KgK}] \quad (1c)$$

para, $900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $C_a = 650$ [J/KgK] (1d)

No caso de modelos de cálculo simples, o Eurocódigo permite a utilização de um valor constante para o calor específico:
 $C_a = 600$ [J/KgK] (1e)

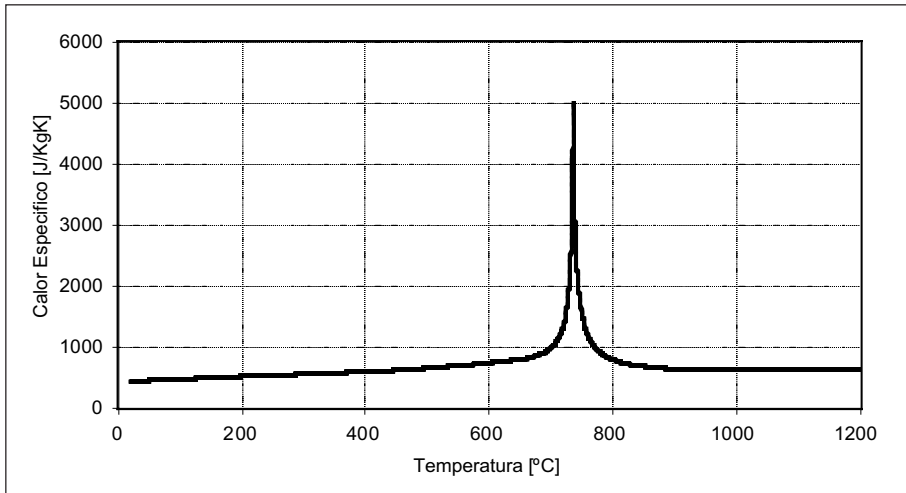


Fig. 1 - Calor específico do aço em função da temperatura.

A variação da condutividade térmica do aço é representada na figura 2, em função da temperatura, θ_a , de acordo com as expressões analíticas a seguir representadas:

para, $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$
 $\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a$ [W/mK] (2a)

para, $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$
 $\lambda_a = 27.3$ [W/mK] (2b)

No caso de modelos de cálculo simples o Eurocódigo permite a utilização de um valor constante:
 $\lambda_a = 45$ [W/mK] (2c)

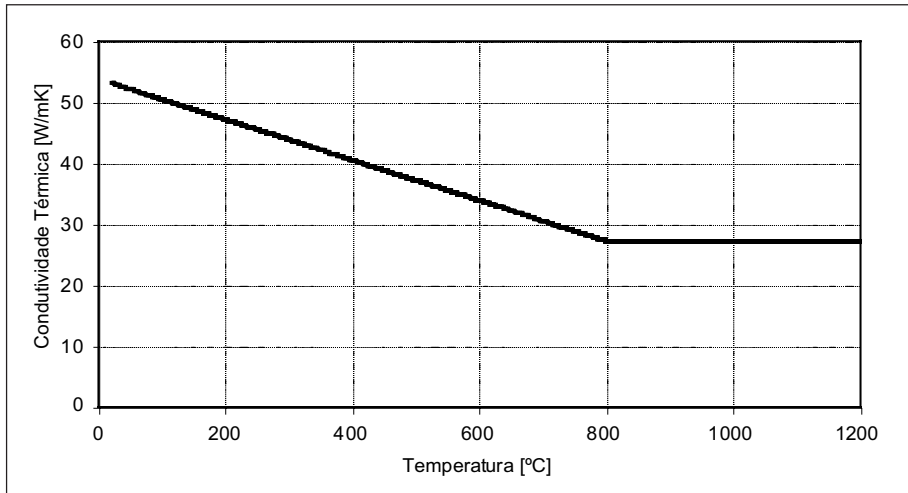


Fig. 2 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura.

3 · Propriedades Mecânicas do Aço

A tabela 1, bem como a figura 3, mostram a evolução das propriedades mecânicas do aço em função da temperatura, com base num factor de redução, K , segundo o Eurocódigo 3, [4].

Como se pode verificar, a resistência mecânica do aço diminui com o aumento da temperatura. A tensão de cedência mantém um valor constante até 400[°C], diminuindo drasticamente para valores mais elevados de temperatura, influenciando da mesma forma a elasticidade do material.

À temperatura de θ [°C] a tensão de cedência e o módulo de elasticidade são determinados em função dos seus valores à temperatura de 20[°C] de acordo com as expressões seguintes:

$$K_{Y,\theta} = f_{Y,\theta} / f_Y \quad (3.a)$$

$$K_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (3.b)$$

No caso do aço Fe 360 a tensão de cedência a 20[°C] vale $f_Y = 235 \times 10^3$ [KN/m²] e o módulo de elasticidade é de $E_a = 210 \times 10^6$ [KN/m²].

Tabela 1 – Propriedades mecânicas em função da temperatura.

Temperatura do aço θ_a	Factor de redução à temperatura θ_a relativo a f_y $K_{Y,\theta} = f_{Y,\theta} / f_Y$	Tensão de cedência $f_{Y,\theta}$ [MPa]	Factor de redução à temperatura θ_a relativo a E_a $K_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	Módulo de elasticidade $E_{a,\theta}$ [GPa]
20	1,000	235	1,0000	210
100	1,000	235	1,0000	210
200	1,000	235	0,9000	189
300	1,000	235	0,8000	168
400	1,000	235	0,7000	147
500	0,780	183	0,6000	126
600	0,470	110	0,3100	65,1
700	0,230	54,1	0,1300	27,3
800	0,110	25,9	0,0900	189
900	0,060	14,1	0,0675	142
1000	0,040	9,4	0,0450	9,45
1100	0,020	4,7	0,0225	4,73
1200	0,000	0,0	0,0000	0,0

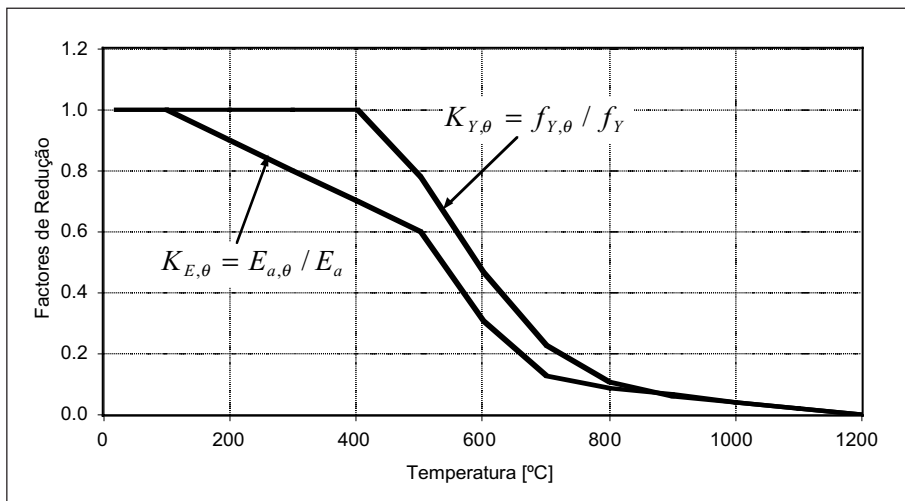


Fig. 3 - Propriedades mecânicas do aço em função da temperatura.

As expressões analíticas do Eurocódigo 3, para determinação da deformação térmica em função da temperatura, conforme a figura 4, são as seguintes:

para, $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta L}{L} = 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4} \quad (4.a)$$

para, $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 860^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta L}{L} = 1.1 \times 10^{-2} \quad (4.b)$$

para, $860^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta L}{L} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6.2 \times 10^{-3} \quad (4.c)$$

sendo:

L - o comprimento a 20°C , ΔL - o alongamento térmico e θ_a - a temperatura do aço [$^{\circ}\text{C}$]

Para modelos de cálculo simples o Eurocódigo 3 permite que a deformação térmica seja obtida conforme a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta L}{L} = 1.4 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (4.d)$$

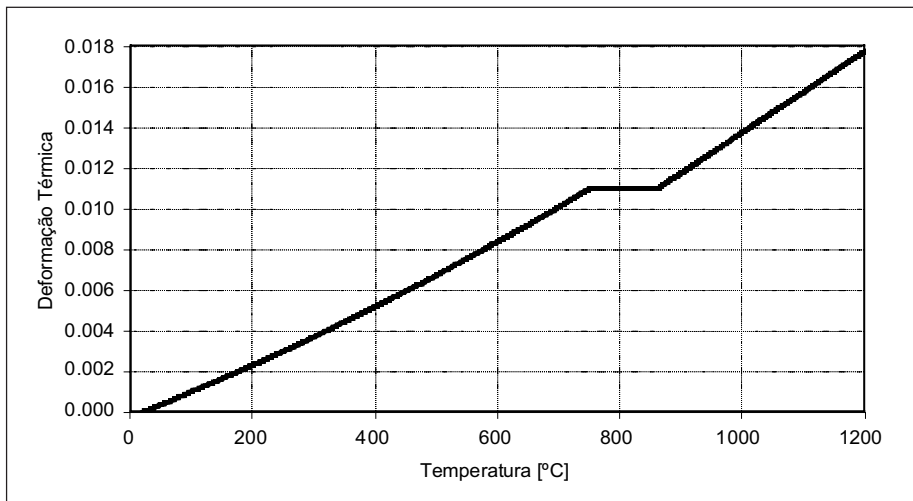


Fig. 4 - Deformação térmica do aço em função da temperatura.

4 · Equações Gerais

4.1 · Modelo Térmico

A transferência de calor é uma ciência que estuda a transferência de energia entre corpos materiais, causadas por diferenças de temperatura. Os três modos de transferência de calor a considerar são: condução, convecção e radiação.

O modelo térmico baseia-se na formulação da equação diferencial da condução de calor [1,2]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

onde: λ - é a condutividade térmica, \dot{Q} - o calor gerado por unidade de volume e de tempo, ρ - a densidade, c_p - o calor específico, θ - a temperatura e t - o tempo.

O campo de temperaturas que satisfaz esta equação no domínio Ω deve também satisfazer as condições iniciais e de fronteira do problema. As condições fronteira impostas podem ser do tipo: temperaturas prescritas numa parte da fronteira (condição de Dirichlet), fluxo de calor prescrito (condição de Newman); fronteira convectiva, com transmissão de calor por convecção (condição de Cauchy); fronteira radiativa, em que há trocas de calor por radiação entre uma parte da fronteira e a superfície envolvente; ou ainda o caso de ocorrer simultaneamente a convecção e a radiação.

Aplicando à equação 5 e às suas condições de fronteira, o método dos resíduos pesados, usando elementos finitos para discretizar o domínio Ω , uma formulação fraca e o método de Galerkin, obtém-se o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{\theta} + \underset{\sim}{C}\underset{\sim}{\dot{\theta}} = \underset{\sim}{F} \quad (6)$$

Para elementos sólidos ou planos a representação dos elementos das matrizes K , C e vector F , no domínio cartesiano, é função de:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_h^e \quad (6.a)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_i N_j dx dy dz \quad (6.b)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_i Q dx dy dz - \sum_{e=1}^p \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} \theta_{\infty} N_i d\Gamma_h^e \quad (6.c)$$

A solução deste sistema de equações requer a utilização de uma discretização no tempo, tendo sido adoptada uma discretização através de diferenças finitas. Considerando que o sistema envolve só derivadas de primeira ordem e admitindo a hipótese da temperatura variar linearmente ao longo do intervalo de tempo Δt , as temperaturas $\theta_{\sim{n+\alpha}}$ no instante $t_{n+\alpha} = t_n + \alpha \Delta t$ são definidas por:

$$\theta_{\sim{n+\alpha}} = \theta_{\sim{n}} + \alpha \Delta t (\theta_{\sim{n+1}} - \theta_{\sim{n}}) / \Delta t, \quad \alpha \in (0, 1), n \in (0, 1, \dots, N-1) \quad (7)$$

sendo α o parâmetro que define, dentro de cada intervalo de tempo, o instante em que as equações (6) são satisfeitas.

De acordo com a hipótese de que a derivada da temperatura em ordem ao tempo é constante dentro de cada intervalo de tempo, tem-se:

$$\underset{\sim}{\dot{\theta}}_{\sim{n+\alpha}} = \frac{\theta_{\sim{n+1}} - \theta_{\sim{n}}}{\Delta t} \quad (8)$$

Substituindo (7) e (8) na equação (6), obtêm-se a fórmula de recorrência:

$$\left(\underset{\sim}{K}_{\sim{n+\alpha}} + \frac{\underset{\sim}{C}}{\alpha \Delta t} \right) \underset{\sim}{\theta}_{\sim{n+\alpha}} = \underset{\sim}{F}_{\sim{n+\alpha}} + \frac{\underset{\sim}{C}}{\alpha \Delta t} \underset{\sim}{\theta}_{\sim{n}} \quad (9)$$

sendo as respectivas matrizes calculadas no instante $t_{n+\alpha}$.

É possível, assim, obter o campo de temperaturas no final do intervalo de tempo, através de:

$$\theta_{n+1} = \frac{\theta_n}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\theta_n \quad (10)$$

sendo estas as temperaturas iniciais quando se avança para o intervalo de tempo seguinte.

Fazendo variar o parâmetro α obtêm-se vários esquemas de integração no tempo. Para α não nulo, os esquemas designam-se implícitos e correspondem a: $\alpha = 1/2$, esquema de Crank-Nicolson; $\alpha = 2/3$, esquema de Galerkin e $\alpha = 1$, esquema de Euler Backward.

Para a resolução do problema com condições não-lineares, onde as propriedades térmicas do material variam com a temperatura, a equação 6 pode ser escrita na forma:

$$\underset{\sim}{K}(\underset{\sim}{\theta}, t)\underset{\sim}{\theta}(t) + \underset{\sim}{C}(\underset{\sim}{\theta}, t)\underset{\sim}{\dot{\theta}}(t) = \underset{\sim}{F}(\underset{\sim}{\theta}, t) \quad (11)$$

Não há um método geral para resolver este sistema de equações diferenciais não linear, existindo no entanto vários métodos numéricos essencialmente baseados numa integração linear no tempo e métodos iterativos. Neste algoritmo utiliza-se o método de Newton-Raphson modificado.

4.1.1 . Curva de Incêndio Padrão ISO 834

Neste trabalho admitiu-se que a temperatura ambiente é dada pela curva de incêndio padrão ISO 834 representada na figura 5 e cuja expressão analítica é:

$$\theta = \theta_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (12)$$

onde: θ - é a temperatura ambiente, ou seja a temperatura dos gases do compartimento de incêndio, no instante t , θ_0 - a temperatura inicial do compartimento de incêndio, geralmente 20°C e t - o tempo decorrido desde o início, [min].

Esta e outras curvas encontram-se definidas no Eurocódigo 1 e poderão ser utilizadas para a simulação de um incêndio, permitindo a determinação e a comparação da resistência ao fogo em estruturas.

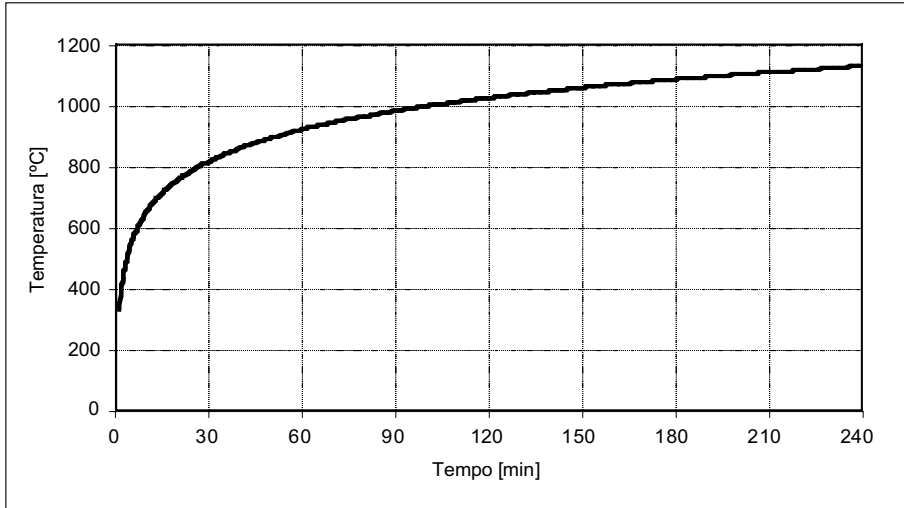


Fig. 5 - Curva ISO 834.

4.2 · Modelo Mecânico

Foi aplicado o método dos elementos finitos na discretização do meio contínuo, apresentando-se as relações constitutivas elásticas dos materiais e a derivação das equações de equilíbrio com base no princípio do trabalho virtual. Optou-se por uma formulação baseada nos deslocamentos, em que estes são escolhidos como incógnita do problema, obtendo-se o campo de tensões após o cálculo do campo de deslocamentos. O elemento finito utilizado foi o elemento isoparamétrico de 8 nós.

A equação integral de equilíbrio de forças, em problemas de elasticidade bidimensional é obtida fazendo uso do princípio dos trabalhos virtuais:

$$\int_{\Omega} [\delta \underline{\varepsilon}]^T \underline{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega} [\delta \underline{u}]^T \underline{b} d\Omega - \int_{\Gamma_t} [\delta \underline{u}]^T \underline{t} d\Gamma = 0 \quad (13)$$

sendo: $\underline{\sigma}$ - o vector de tensão, \underline{b} - o vector de forças de massa, \underline{t} - o vector de forças na fronteira, $\delta \underline{u}$ - o vector dos deslocamentos virtuais, $\delta \underline{\varepsilon}$ - o vector associado às deformações virtuais, Ω - o domínio a analisar e Γ_t - a parte da fronteira onde existem forças aplicadas.

A relação tensão-deformação linear para cada elemento é dada pela equação 14, sendo D a matriz de constantes elásticas função do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

$$\underline{\sigma} = D \underline{\varepsilon} = D \left(\sum_{j=1}^r B_{j-j} d_j \right) \quad (14)$$

A matriz de rigidez elementar, K , é obtida por integração em coordenadas naturais:

$$\underset{\sim}{K} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \underset{\sim}{B}^T \underset{\sim}{D} \underset{\sim}{B} \det J d\xi d\eta d\zeta = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 T d\xi d\eta d\zeta \quad (15)$$

No modelo mecânico, o aparecimento do comportamento plástico é condicionado por um critério de cedência que pode ser expresso através de uma função escalar que depende do estado de tensão e da deformação plástica, dada por [2]:

$$F(\underset{\sim}{\sigma}, K, \theta) = f(\underset{\sim}{\sigma}) - Y(k, \theta) \quad (16)$$

com: $f(\sigma)$ – função de cedência e $y(k, \theta)$ parâmetro do material, que pode ser função de um coeficiente de encruamento k e da temperatura θ .

A regra de escoamento plástico para o critério de cedência de von Mises, tem como base a teoria do potencial plástico de Prandtl-Reuss, definindo-se como:

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}_p = \Delta \lambda \frac{\partial Q}{\partial \underset{\sim}{\sigma}} \quad (17)$$

sendo: Q - uma função potencial plástico e $\Delta \lambda$ - uma constante de proporcionalidade não negativa designada por multiplicador plástico.

Se igualarmos o potencial Q à função de cedência f , uma vez que ambas dependem dos invariantes do tensor das tensões desvio, J_2' e J_3' , a equação 17 pode ser escrita como:

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}_p = \Delta \lambda \frac{\partial F}{\partial \underset{\sim}{\sigma}} \quad (18)$$

que se designa por lei associativa do escoamento plástico.

A análise incremental plástica para pequenas deformações é dada pelo incremento total da deformação através de:

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon} = \left(\Delta \underset{\sim}{\varepsilon} \right)_e + \left(\Delta \underset{\sim}{\varepsilon} \right)_p + \left(\Delta \underset{\sim}{\varepsilon} \right)_{th} \quad (19)$$

A parte elástica obedece à relação de Hooke através da expressão 14, expressa na forma incremental:

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}_e = D^{-1} \Delta \underset{\sim}{\sigma} \quad (20)$$

A deformação plástica, $\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}_p$, é dada pela equação 18.

Finalmente a deformação térmica é definida por:

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}_{th} = \left[\int_{\theta_{ref}}^{\theta} \alpha d\theta \right] \delta_{ij} \quad (21)$$

em que α é o coeficiente de expansão térmica.

O critério de cedência utilizado foi o de von Mises definido através do invariante do tensor das tensões desvio, J_2' , através da expressão:

$$F = \sqrt{3J_2'} - Y(\theta) \quad (22)$$

A análise do comportamento térmico e mecânico baseia-se, como se disse, no cálculo das variações de temperatura, num intervalo de tempo, através da aplicação da teoria da condução de calor e posterior cálculo das alterações ao campo de tensões com o modelo elastoplástico. Para cada instante de tempo as equações de equilíbrio são verificadas, calculam-se os deslocamentos, as tensões e verifica-se a convergência da solução obtida através de um processo iterativo incremental de Newton-Raphson.

5 · Exemplo de Aplicação

Foi analisada uma peça em estado plano de deformação representando um tubo cilíndrico espesso em aço, em que a discretização do domínio foi feita com elementos bidimensionais de oito nós como mostra a figura 6.

As condições de fronteira impostas para análise do comportamento térmico, são de convecção e de radiação devida à presença de incêndio, na parte exterior do cilindro. Na parte interna do cilindro impôs-se uma temperatura prescrita de 20°C, simulando a situação correspondente à circulação de um fluido no interior do tubo.

Dada a simetria, estudou-se apenas um quarto do cilindro.

As propriedades mecânicas e térmicas do material são as descritas nos capítulos anteriores. A temperatura ambiente varia conforme a curva de incêndio padrão ISO 834.

Os resultados foram obtidos através do programa de elementos finitos desenvolvido FEMSEF98 e ainda simulados no programa comercial COSMOS nas mesmas condições, para dois instantes de tempo correspondentes a 120 e 750 segundos.

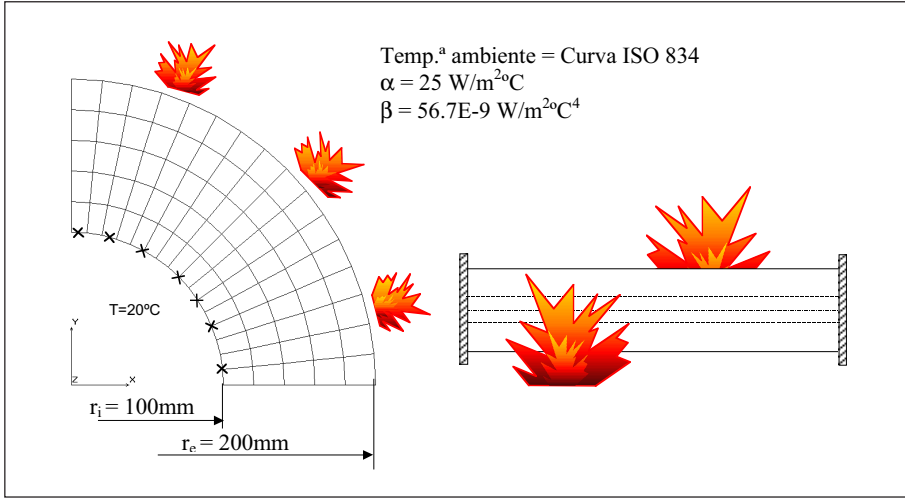


Fig. 6 - Geometria e condições de fronteira impostas.

Nas figuras 7 e 8 mostram-se os campos de temperaturas e de tensões térmicas equivalentes após 120 segundos de exposição ao fogo. Como se pode verificar o componente metálico vai aquecendo e apresenta um estado de tensão ainda no domínio elástico. Os resultados na figura 7 foram obtidos com o programa desenvolvido FEMSEF98 e os da figura 8 com o programa COSMOS.

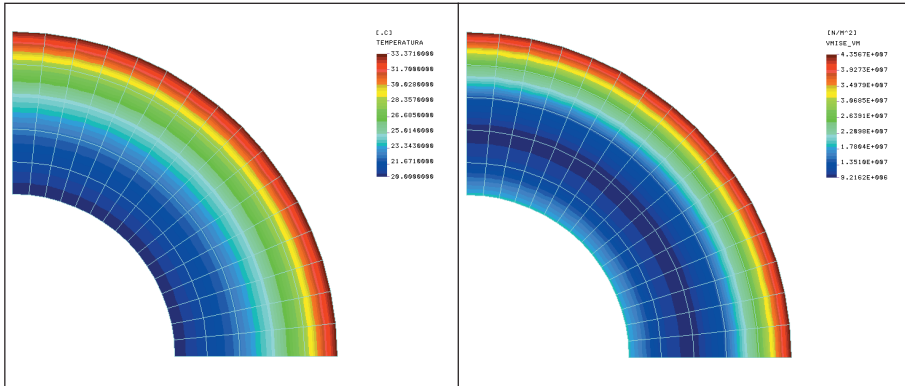


Fig. 7 - Campo de temperaturas e de tensões equivalentes, para 120 segundos, obtidos com o código desenvolvido FEMSEF98.

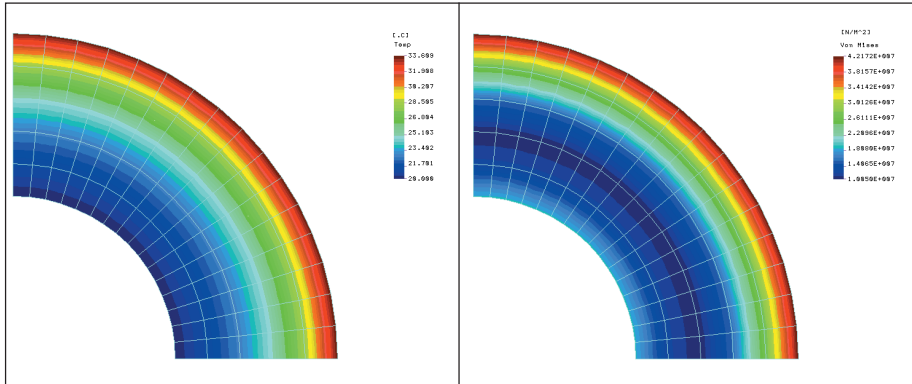


Fig. 8 - Campo de temperaturas e de tensões equivalentes, para 120 segundos, obtidos com o código comercial COSMOS.

Nas figuras 9 e 10 mostram-se os campos de temperaturas e de tensões térmicas equivalentes no final de 750 segundos. O aumento da temperatura devida à acção do fogo, influencia o aumento das tensões térmicas como se pode verificar nos resultados obtidos com o código FEMSEF98, os quais são comparáveis aos obtidos com o programa COSMOS. Como se verifica o aumento significativo da temperatura provocou um aumento no campo de tensões, dando início ao domínio plástico, nos elementos localizados na parte exterior do cilindro.

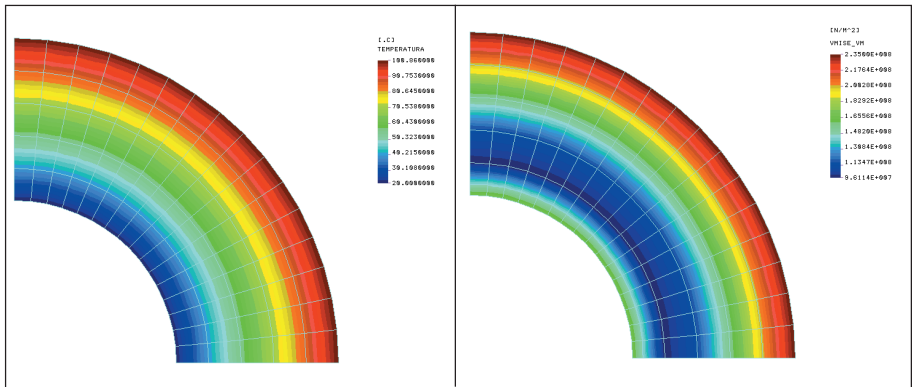


Fig. 9 - Campo de temperaturas e de tensões equivalentes, para 750 segundos, obtidos com o código desenvolvido FEMSEF98.

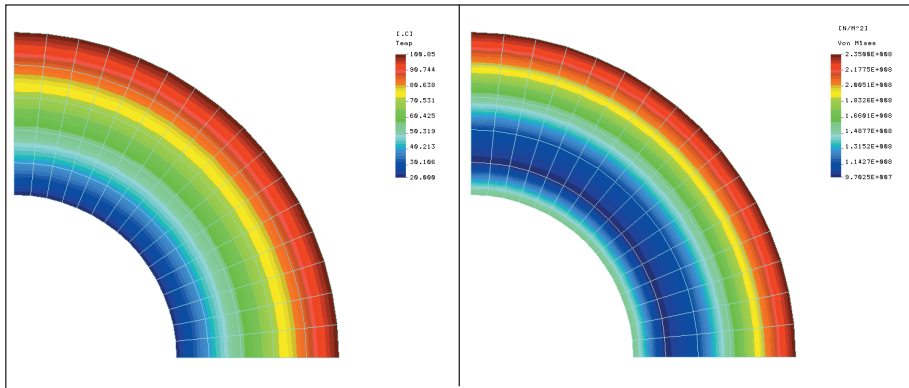


Fig. 10 - Campo de temperaturas e de tensões equivalentes, para 750 segundos, obtidos com o código comercial COSMOS.

O gráfico da figura 11 mostra a evolução do campo de tensões equivalentes até ao início da plastificação no exterior do cilindro, função do aumento da temperatura. Estes resultados foram obtidos com o programa desenvolvido, tendo sido utilizado o modelo termo-elastoplástico.

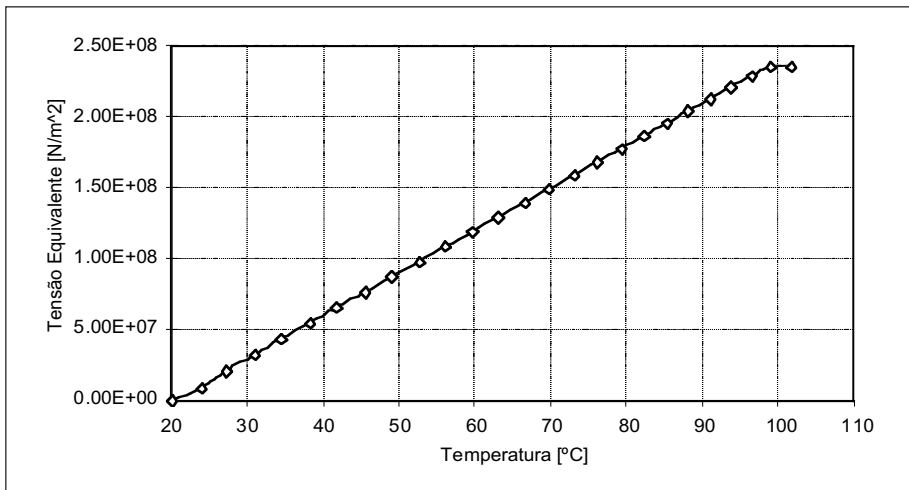


Fig. 11 – Evolução do campo de tensões equivalentes no exterior do cilindro em função da temperatura.

Na figura 12 comparam-se as temperaturas no exterior e a meio da espessura do cilindro em aço, com a evolução da temperatura ambiente na situação de incêndio. Estes resultados foram obtidos com o programa desenvolvido, tendo sido utilizado unicamente o modelo térmico apresentado.

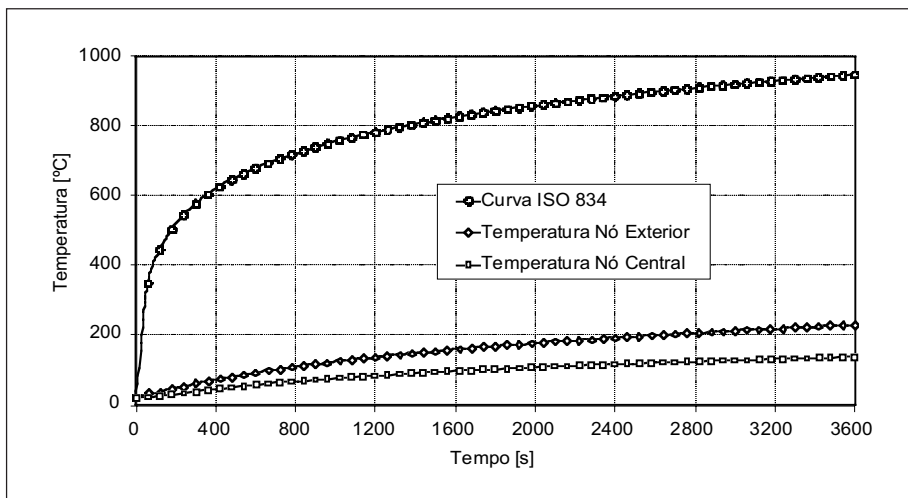


Fig. 12 – Curva ISO 834 e campo de temperaturas no exterior e parte central do cilindro.

6 · Conclusões

Desenvolveu-se um programa de elementos finitos que permite a análise térmica e mecânica de componentes mecânicos sujeitos a altas temperaturas, nomeadamente as que ocorrem em situação de incêndio.

Apresentaram-se os resultados correspondentes à resolução de um problema termo-mecânico em regime transiente não-linear, tendo sido utilizado o código de elementos finitos FEMSEF98 desenvolvido para este tipo de problemas. Como se pode verificar, os resultados obtidos com este programa de elementos finitos apresentam boa concordância com os resultados obtidos com o programa comercial COSMOS.

É possível simular o desenvolvimento de tensões térmicas devido à ocorrência de incêndio, de acordo com os Eurocódigos, em que as propriedades do aço são função da temperatura, facilitando ao projectista a escolha de materiais, e/ou procedimentos que façam aumentar a resistência ao fogo dos elementos mecânicos, nomeadamente a utilização de materiais de protecção ao fogo.

7 · Referências

- [1] VILA REAL, P. M. M. - Modelação por Elementos Finitos da Solidificação e Comportamento Termo-Mecânico de Peças Vazadas em Moldações Metálicas, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993.
- [2] FONSECA, E. M. M. - Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Perfis Metálicos Sujeitos à Acção do Fogo, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [3] FONSECA, E. M. M.; VILA REAL, P. M. M. - Análise Termo-Elastoplástica de uma Peça em Estado Plano de Deformação - 1ª Conferencia Anual de Usuarios COSMOS/M para España y Portugal, Bilbao, España, 1998.
- [4] EUROCODE 3, Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design, ENV 1993-1-2:1995.
- [5] EUROCODE 1, Basis of Design and Actions on Structures - Part 2-2: Actions on Structures – Action on Structures Exposed to Fire, ENV 1991-2-2:1995.

- [6] FONSECA, E. M. M. - Program FEMSEF98 - Finite Element Modelling for Structures Exposed to Fire 98 - User's Manual, V1, ESTIG, Bragança, 1998.
- [7] COMINI, G.; GIUDICE, S.; NONINO, C. - Finite Element Analysis in Heat Transfer, Taylor & Francis, 1976.
- [8] HUANG, H.; USMANI, A. - Finite Element Analysis for Heat Transfer, Springer-Verlag, 1994.
- [9] ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. - The Finite Element Method, Vol.2, McGraw-Hill, 1991.

Títulos publicados:

- 1 · **A agricultura nos distritos de Bragança e Vila Real**
Francisco José Terroso Cepeda – 1985
- 2 · **Política económica francesa**
Francisco José Terroso Cepeda – 1985
- 3 · **A educação e o ensino no 1º quartel do século XX**
José Rodrigues Monteiro e Maria Helena Lopes Fernandes
– 1985
- 4 · **Trás-os-Montes nos finais do século XVIII: alguns aspectos económico-sociais**
José Manuel Amado Mendes – 1985
- 5 · **O pensamento económico de Lord Keynes**
Francisco José Terroso Cepeda – 1986
- 6 · **O conceito de educação na obra do Abade de Baçal**
José Rodrigues Monteiro – 1986
- 7 · **Temas diversos – economia e desenvolvimento regional**
Joaquim Lima Pereira – 1987
- 8 · **Estudo de melhoramento do prado de aveia**
Tjarda de Koe – 1988
- 9 · **Flora e vegetação da bacia superior do rio Sabor no Parque Natural de Montesinho**
Tjarda de Koe – 1988
- 10 · **Estudo do apuramento e enriquecimento de um pré-concentrado de estanho tungsténio**
Arnaldo Manuel da Silva Lopes dos Santos – 1988
- 11 · **Sondas de neutrões e de raios Gama**
Tomás d'Aquino Freitas Rosa de Figueiredo – 1988
- 12 · **A descontinuidade entre a escrita e a oralidade na aprendizagem**
Raul Iturra – 1989
- 13 · **Absorção química em borbulhadores gás-líquido**
João Alberto Sobrinho Teixeira – 1990

-
- 14 · **Financiamento do ensino superior no Brasil – reflexões sobre fontes alternativas de recursos**
Victor Meyer Jr. – 1991
 - 15 · **Liberalidade régia em Portugal nos finais da idade média**
Vitor Fernando Silva Simões Alves – 1991
 - 16 · **Educação e loucura**
José Manuel Rodrigues Alves – 1991
 - 17 · **Emigrantes regressados e desenvolvimento no Nordeste Interior Português**
Francisco José Terroso Cepeda – 1991
 - 18 · **Dispersão em escoamento gás-líquido**
João Alberto Sobrinho Teixeira – 1991
 - 19 · **O regime térmico de um luvissole na Quinta de Santa Apolónia**
Tomás d'Aquino F. R. de Figueiredo - 1993
 - 20 · **Conferências em nutrição animal**
Carlos Alberto Sequeira - 1993
 - 21 · **Bref aperçu de l'histoire de France – des origines à la fin du II^e empire**
João Sérgio de Pina Carvalho Sousa – 1994
 - 22 · **Preparação, realização e análise / avaliação do ensino em Educação Física no Primeiro Ciclo do Ensino Básico**
João do Nascimento Quina – 1994
 - 23 · **A pragmática narrativa e o confronto de estéticas em *Contos de Eça de Queirós***
Henriqueta Maria de Almeida Gonçalves – 1994
 - 24 · **“Jesus” de Miguel Torga: análise e proposta didáctica**
Maria da Assunção Fernandes Morais Monteiro – 1994
 - 25 · **Caracterização e classificação etnológica dos ovinos churros portugueses**
Alfredo Jorge Costa Teixeira – 1994
 - 26 · **Hidrogeologia de dois importantes aquíferos (Cova de Lua, Sabariz) do maciço polimetamórfico de Bragança**
Luís Filipe Pires Fernandes – 1996

-
- 27 · **Micorrização in vitro de plantas micropropagadas de castanheiro (*Castanea sativa* Mill)**
Anabela Martins – 1997
- 28 · **Emigração portuguesa: um fenómeno estrutural**
Francisco José Terroso Cepeda – 1995
- 29 · **Lameiros de Trás-os-Montes: perspectivas de futuro para estas pastagens de montanha**
Jaime Maldonado Pires; Pedro Aguiar Pinto; Nuno Tavares Moreira – 1994
- 30 · **A satisfação / insatisfação docente**
Francisco Cordeiro Alves – 1994
- 31 · **O subsistema pecuário de bovinicultura na área do Parque Natural de Montesinho**
Jaime Maldonado Pires; Nuno Tavares Moreira – 1995
- 32 · **A terra e a mudança – reprodução social e património fundiário na Terra Fria Transmontana**
Orlando Afonso Rodrigues – 1998
- 33 · **Desenvolvimento motor: indicadores bioculturais e somáticos do rendimento motor de crianças de 5/6 anos**
Vítor Pires Lopes – 1998
- 34 · **Estudo da influência do conhecimento prévio de alunos portugueses na compreensão de um texto em língua inglesa**
Francisco Mário da Rocha – 1998
- 35 · **La crise de Mai 68 en France**
João Sérgio de Pina Carvalho Sousa – 1999
- 36 · **Linguagem, psicanálise e educação: uma perspectiva à luz da teoria lacaniana**
José Manuel Rodrigues Alves
- 37 · **Contributos para um estudo das funções da tecnologia vídeo no ensino**
Francisco Cordeiro Alves – 1998
- 38 · **Sistemas agrários e melhoramento dos bovinos de raça Mirandesa**
Fernando Jorge Ruivo de Sousa – 1998

-
- 39 · **Enclaves de clima Cfs no Alto Portugal – a difusa transição entre a Ibéria Húmida e a Ibéria Seca**
Ário Lobo Azevedo; Dionísio Afonso Gonçalves; Rui Manuel Almeida Machado – 1995
- 40 · **Desenvolvimento agrário na Terra Fria – condicionantes e perspectivas**
Duarte Rodrigues Pires – 1998
- 41 · **A construção do planalto transmontano – Baçal, uma aldeia do planalto**
Luísa Genésio – 1999
- 42 · **Antologia epistolográfica de autores dos sécs. XIX-XX**
Lurdes Cameirão – 1999
- 43 · **Teixeira de Pascoaes e o projecto cultural da “Renascença Portuguesa”**
Lurdes Cameirão – 2000
- 44 · **Descargas atmosféricas – sistemas de protecção**
Joaquim Tavares da Silva
- 45 · **Redes de terra – princípios de concepção e de realização**
Joaquim Tavares da Silva
- 46 · **O sistema tradicional de exploração de ovinos em Bragança**
Carlos Barbosa – 2000
- 47 · **Eficiência de utilização do azoto pelas plantas**
Manuel Ângelo Rodrigues, João Filipe Coutinho – 2000
- 48 · **Elementos de física e mecânica aplicada**
João Alberto Sobrinho Teixeira
- 49 · **A Escola Preparatória Portuguesa – Uma abordagem organizacional**
Henrique da Costa Ferreira
- 50 · **Agro-ecological characterization of N. E. Portugal with special reference to potato cropping**
T. C. Ferreira, M. K. V. Carr, D. A. Gonçalves – 1996
- 51 · **A participação dos professores na direcção da Escola Secundária, entre 1926 e 1986**
Henrique da Costa Ferreira

-
- 52 - A evolução da Escola Preparatória – o conceito e componentes curriculares**
Henrique da Costa Ferreira
- 53 - O Homem e a biodiversidade (ontem, hoje... amanhã)**
António Réffega – 1997
- 54 - Conservação, uso sustentável do solo e agricultura tropical**
António Réffega – 1997
- 55 - A teoria piagetiana da equilibração e as suas consequências educacionais**
Henrique da Costa Ferreira
- 56 - Resíduos com interesse agrícola - Evolução de parâmetros de compostagem**
Luís Manuel da Cunha Santos – 2001
- 57 - A dimensão preocupacional dos professores**
Francisco dos Anjos Cordeiro Alves – 2001
- 58 - Análise não-linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo**
Elza M. M. Fonseca e Paulo M. M. Vila Real – 2002