

## **Desenvolvimento de um sistema via método dos elementos finitos para simulação do comportamento de elementos estruturais de aço e mistos em situação de incêndio**

José Carlos L. Ribeiro<sup>1</sup>, Ricardo H. Fakury<sup>2</sup>, Estevam B. de Las Casas<sup>3</sup>

### **Resumo**

Diversos países têm estabelecido regras e procedimentos cada vez mais avançados para garantir a segurança das edificações em situação de incêndio. Dentre as alternativas propostas pelas normas europeias encontram-se os métodos avançados de análise estrutural. Esses métodos devem considerar os princípios e hipóteses da teoria de transferência de calor e da mecânica estrutural, incluindo, entre outros, os efeitos da não-linearidade geométrica, da não-linearidade das propriedades dos materiais e da variação das propriedades com a temperatura. Neste trabalho, é apresentado o desenvolvimento de um sistema computacional de análise termo-mecânica, denominado *Thersys 2.0*, onde se implementou um método avançado de análise estrutural de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio com base nas formulações do Método dos Elementos Finitos. Nos estudos de caso realizados, o sistema forneceu resultados próximos daqueles obtidos por ensaios e por outros métodos de análise.

*Palavras-chave:* Análise termo-mecânica. Dimensionamento em situação de incêndio. Método dos Elementos Finitos. Estruturas de aço. Estruturas mistas.

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Brasil, Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, Departamento de Engenharia Civil, 36570-000, Viçosa, MG. Email: jcarlos.ribeiro@ufv.br (*autor correspondente*).

<sup>2</sup> Professor Titular, D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627 – Bloco I – 4º andar, Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG. Email: fakury@dees.ufmg.br.

<sup>3</sup> Professor Titular, D. Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627 – Bloco I – 4º andar, Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG. Email: estevam@dees.ufmg.br.

# 1 Introdução

Vários países, em especial os desenvolvidos, têm se preocupado em estabelecer regras e procedimentos cada vez mais avançados e realísticos para garantir a segurança das edificações em situação de incêndio. Dentre as alternativas propostas pelas normas européias para o dimensionamento de elementos estruturais de aço, EN 1993-1-2:2005, e mistos de aço e concreto, EN 1994-1-2:2005, são citados os métodos avançados de análise estrutural. Esses métodos devem considerar os princípios e hipóteses da teoria de transferência de calor e da mecânica estrutural, incluindo os efeitos da não-linearidade geométrica, da não-linearidade das propriedades dos materiais e da variação das propriedades com a temperatura, dentre outros itens.

Neste trabalho, é apresentado um sistema computacional de análise termo-mecânica, denominado *Thersys 2.0*, onde se implementou um método avançado de análise estrutural com base nas formulações do Método dos Elementos Finitos (Ribeiro 2009).

Ao final, são analisados dois estudos de caso e os resultados obtidos são comparados e avaliados criticamente com os resultados de ensaios e de métodos simplificados, demonstrando a aplicabilidade do sistema para a obtenção da capacidade resistente de elementos isolados ou de subsistemas estruturais em situação de incêndio.

## 2 Análise térmica

### 2.1 Transferência de calor em problemas de domínio sólido

A análise térmica visa, basicamente, determinar a distribuição de temperatura nos elementos estruturais em situação de incêndio, de modo que, na análise mecânica (ver item 3), seja possível avaliara perda de resistência e de rigidez do material estrutural com o aumento de temperatura.

A equação básica da transferência de calor por condução no domínio da estrutura (meio sólido) é a Equação de Poisson, expressa por:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 \mathbf{D} \theta + \bar{\rho} \quad \text{em } \Omega \quad (1)$$

onde  $\theta(^{\circ}\text{C})$  representa a temperatura,  $t(\text{s})$  a variável tempo,  $\rho(\text{kg/m}^3)$  a densidade do material,  $c (\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$  o calor específico,  $\bar{\rho} (\text{W/m}^3)$  a densidade de calor devido a uma fonte de calor interna,  $\nabla$  o operador diferencial e  $\mathbf{D}$  corresponde à matriz constitutiva, formada pelas condutividades térmicas  $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ , para as diferentes dimensões nas quais se descreve o domínio sólido  $\Omega$ .

A transferência de calor por condução em domínios sólidos, Equação (1), está sujeita a dois tipos de condições de contorno, como mostrado na Figura 1: temperaturas prescritas (condição de Dirichlet) e fluxo de calor prescrito (condição de Neumann).

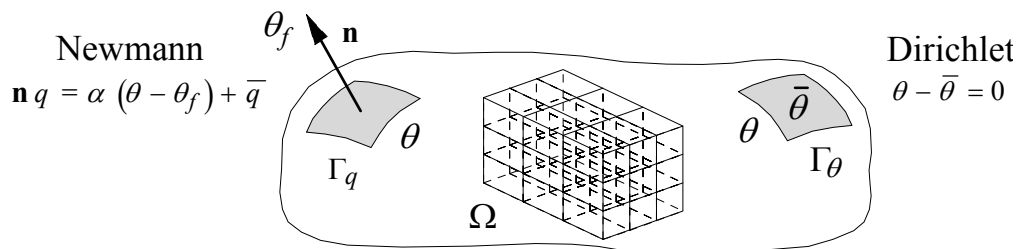


Figura 1 - Região tridimensional com as condições de contorno possíveis para análise térmica

O contorno com fluxo de calor prescrito compreende um fluxo de calor pré-definido  $\bar{q}$  ( $\text{W/m}^2$ ) e um fluxo de calor devido a convecção e a radiação  $\alpha(\theta - \theta_f)$ , onde  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura da superfície,  $\theta_f$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura do fluido que envolve a estrutura e  $\alpha$  ( $\text{W/m}^2\text{^{\circ}C}$ ) é o coeficiente que representa ambos os fenômenos, convecção e radiação, sendo dado por:

$$\alpha = \alpha_c + \varepsilon_{res} \sigma \left( 4 \times 273^3 + 6 \times 273^2 (\theta_f + \theta) + (\theta_f + \theta) (\theta_f^2 + \theta^2) + 4 \times 273 (\theta_f^2 + \theta_f \theta + \theta^2) \right) \quad (2)$$

A constante  $\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção e  $\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante entre o fluido (gases decorrentes da combustão) e a superfície, podendo ser tomados respectivamente iguais a  $25 \text{ W/m}^2\text{^{\circ}C}$  e  $0,5$ , segundo o EN<sup>o</sup>1991-1-2:1991, e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a  $5,669 \times 10^{-80} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

O EN<sup>o</sup>1991-1-2:2002 substituiu o conceito da emissividade resultante  $\varepsilon_{res}$  pelo produto  $k_{sh} \varepsilon_f \varepsilon_m$ , sendo  $k_{sh}$  o fator de sombreamento,  $\varepsilon_f$  a emissividade do fogo, frequentemente adotada igual a  $1,0$ , e  $\varepsilon_m$  a emissividade da superfície, devendo ser tomada igual a  $0,7$ .

## 2.2 Formulação para o Método dos Elementos Finitos

A aplicação do Método dos Elementos Finitos ao problema de transferência de calor parteda forma integral que expressa o mecanismo de transferência de calor do sistema. Essa forma integral pode ser obtida aplicando-se o Método dos Resíduos Ponderados à Equação (1) e à condição de contorno de Neumann. A condição de contorno de Dirichlet não é considerada no método dos resíduos ponderados, pois sendo as temperaturas conhecidas, o resíduo pode ser anulado pela imposição das temperaturas prescritas.

Huang e Usmani (1994) demonstram o desenvolvimento dessas equações considerando-se o Método de Galerkin ao adotar as funções de peso do Método dos Resíduos Ponderados iguais às funções de forma utilizadas no Método dos Elementos Finitos. O sistema matricial de equações obtido pode ser escrito da forma:

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{f} \quad (3)$$

Nessa equação,  $\mathbf{a}$  é o vetor de incógnitas contendo a temperatura em todos os nós da malha, e  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{f}$  são a matriz de massa, a matriz de rigidez e o vetor de fluxos de calor nodais equivalentes, respectivamente. Para cada elemento, esses agrupamentos podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$\mathbf{M}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \mathbf{N}^T \mathbf{N} \, d\Omega^{(e)} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, d\Omega^{(e)} + \alpha \oint_{\Gamma_q^{(e)}} \mathbf{N}^T \mathbf{N} \, d\Gamma_q^{(e)} \quad (5)$$

$$\mathbf{f}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \mathbf{N}^T \bar{\rho} \, d\Omega^{(e)} - \oint_{\Gamma_q^{(e)}} \mathbf{N}^T \bar{q} \, d\Gamma_q^{(e)} + \alpha \oint_{\Gamma_q^{(e)}} \mathbf{N}^T \theta_f \, d\Gamma_q^{(e)} \quad (6)$$

A solução do problema transiente pode ser obtida pela integração da Equação (3) no tempo por meio de um esquema trapezoidal. Vila Real (1988) sugere a utilização do esquema de Galerkin (ponto de colocação a  $2/3$  do início do intervalo de tempo) como uma solução de melhor convergência.

## 3 Análise mecânica

### 3.1 Generalidades

A análise mecânica visa determinar a capacidade de carga máxima da estrutura, considerando as não-linearidades geométrica e material e a degradação das propriedades dos materiais com a temperatura. A formulação utilizada tem por base o Princípio da Energia Potencial Mínima.

### 3.2 Não-linearidade geométrica

A não-linearidade geométrica é considerada na análise utilizando-se a formulação Euleriana, onde todas as quantidades são referidas à configuração final da estrutura (deformada). Nessa formulação, utiliza-se a deformação de Hencky  $\epsilon$  (logarítmica) e as tensões de Cauchy  $\sigma$  como medidas de deformações e tensões, respectivamente (SOUZA NETO, PERIĆ OWEN, 2008).

A versão espacial (formulação Euleriana) do Princípio dos Trabalhos Virtuais considera o equilíbrio da estrutura na posição deformada. Assim, sendo  $\varphi$  o mapeamento da deformação do corpo, pode-se desenvolver uma formulação matricial adequada para o Método dos Elementos Finitos a partir dos conceitos do Princípio dos Trabalhos Virtuais. Souza Neto, Perić e Owen (2008) apresentam o desenvolvimento dessas expressões, obtendo-se:

$$\int_{\varphi(\Omega)} \mathbf{G}^T \mathbf{a} \mathbf{G} dV \delta \mathbf{u} = \mathbf{f} + \int_{\varphi(\Gamma)} \mathbf{N}^T \mathbf{t} dA + \int_{\varphi(\Omega)} \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV - \int_{\varphi(\Omega)} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (7)$$

sendo  $\mathbf{G}$  o operador gradiente espacial completo, expresso em termos das derivadas da função de forma do nó  $i$  em relação à direção  $j$  ( $N_{i,j}$ ) e da matriz identidade de ordem 3 ( $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ ) por

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} N_{i,x} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ N_{i,y} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ N_{i,z} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

aa matriz completa do módulo tangente espacial consistente, cuja forma tensorial é dada em função do tensor do operador constitutivo tangente consistente ( $\hat{\mathbf{D}}$ ), do tensor de quarta ordem da deformação de Cauchy-Green pela esquerda  $\mathbf{B}^e$  ( $\hat{\mathbf{B}}$ ), do tensor da derivada da função logarítmica de  $\mathbf{B}^e$  ( $\hat{\mathbf{L}}$ ), do delta de Kronecker ( $\delta_{jk}$ ) e do gradiente material de deformação ( $\mathbf{F} = \partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{X}$ ) por

$$\hat{\mathbf{a}}_{ijkl} = \frac{1}{2 \det(\mathbf{F})} [\hat{\mathbf{D}} : \hat{\mathbf{L}} : \hat{\mathbf{B}}]_{ijkl} - \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{il} \delta_{jk} \quad (9)$$

$\mathbf{f}$  o vetor das forças aplicadas diretamente nos nós da estrutura,  $\mathbf{t}$  o vetor das forças distribuídas na superfície do corpo,  $\mathbf{b}$  o vetor das forças de corpo (forças gravitacionais) e  $\mathbf{B}$  o operador gradiente material (relação deformação  $\times$  deslocamento).

### 3.3 Não-linearidade material

A não-linearidade material corresponde às não-linearidades da estrutura devido à plasticidade, fluência, fissuração, fraturas, e outros fenômenos. Neste trabalho, somente a plastificação foi considerada, utilizando-se os seguintes critérios de escoamento:

- **von Mises**: para simulação do comportamento elasto-plástico do aço estrutural, considerado como elástico-perfeitamente plástico ( $E_p = 0$ );
- **Drucker-Prager**: para modelagem do comportamento do concreto em estruturas mistas.

O cálculo de tensões e deformações no regime elasto-plástico compreende a solução do problema incremental constitutivo mostrado na Figura 2. Essa solução também é denominada *algoritmo de integração implícito* ou *backward-Euler*.

Dados, no instante  $n$ , o vetor de deformações elásticas  $\boldsymbol{\varepsilon}_n^e$  e a deformação plástica efetiva  $\varepsilon_{p,n}$ , resolver o sistema de equações:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \boldsymbol{\varepsilon}_n^e + \Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \gamma \mathbf{N}(\sigma_{ij,n+1}, \varepsilon_{p,n+1}) \\ \varepsilon_{p,n+1} = \varepsilon_{p,n} + \Delta \gamma E_p \end{cases}$$

para as incógnitas  $\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e$ ,  $\varepsilon_{p,n+1}$  e  $\Delta \gamma$ , sujeitas às restrições:

$$\Delta \gamma \geq 0 \quad \Phi(\sigma_{ij,n+1}, \varepsilon_{p,n+1}) \leq 0 \quad \Delta \gamma \Phi(\sigma_{ij,n+1}, \varepsilon_{p,n+1}) = 0$$

sendo  $\Delta \gamma$  o multiplicador plástico,  $E_p$  o módulo plástico e  $\Phi$  o critério de escoamento.

Figura 2: Problema incremental constitutivo elasto-plástico (soluções:  $\Delta \gamma = 0$  ou  $\Delta \gamma > 0$ )

Na modelagem do concreto com o critério de Drucker-Prager, Ribeiro (2009) mostra que a melhor simulação do comportamento desse material em situação de incêndio é obtida fazendo-se o ápice do cone de Drucker-Prager coincidir com o ápice da pirâmide de Mohr-Coulomb. Por outro lado, deve-se utilizar o raio da base do cone ajustado para o valor médio entre os raios externo ( $\rho_c$ ) e interno ( $\rho_i$ ) da pirâmide de Mohr-Coulomb, conforme se vê na Figura 3.

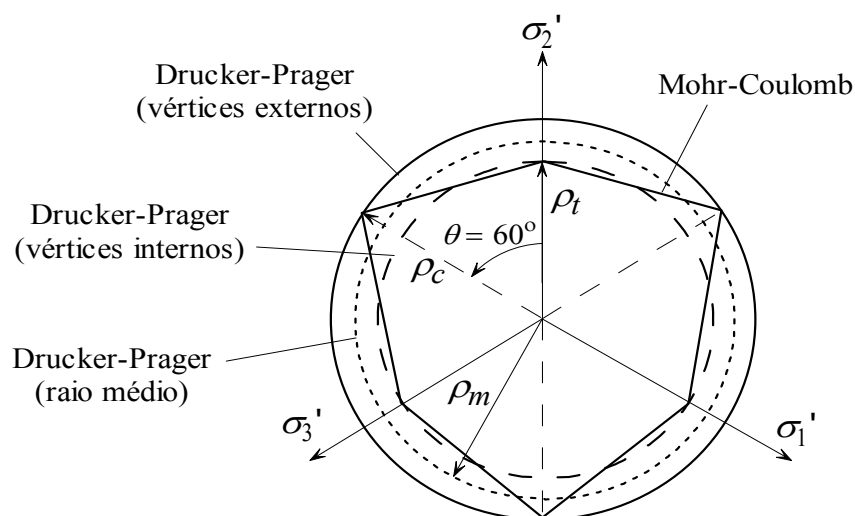


Figura 3: Critérios de escoamento de Drucker-Prager e Mohr Coulomb no plano desviador II

## 4 Desenvolvimento do sistema computacional

Usando a teoria apresentada nos itens anteriores, foi desenvolvido o sistema computacional *Thersys 2.0*, na linguagem Delphi, utilizando-se o paradigma de programação orientado a objetos. O sistema permite análise térmica não-linear transiente e estacionária, análise mecânica com não-linearidade geométrica e não-linearidade nas propriedades dos materiais (plasticidade), bem como a variação das propriedades dos materiais com a temperatura.

Foram implementados os critérios de escoamento de von Mises (para análise de aços) e de Drucker-Prager (para análise de concretos). O algoritmo de solução utilizado é o Newton-Raphson completo, sendo que se resolve primeiramente a análise térmica e, posteriormente, a análise mecânica (acoplamento fraco), conforme mostrado na Figura 4.

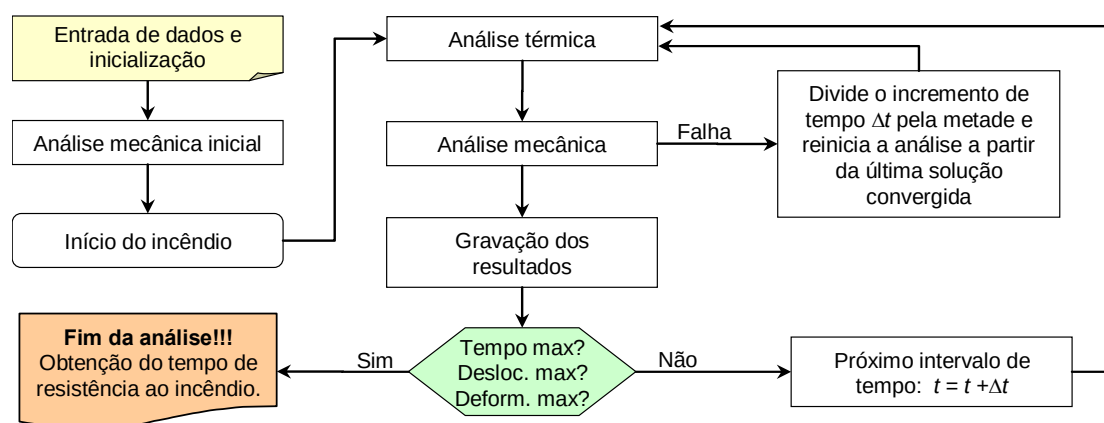


Figura 4: Algoritmo macro do sistema *Thersys 2.0*

O sistema *Thersys2.0* permite o uso de várias curvas de incêndio, sendo que os valores adotados para a condutividade térmica, calor específico e massa específica do aço e do concreto são os previstos no EN 1993-1-2:2005 e no EN 1994-1-2:2005.

## 5 Estudos de caso

### 5.1 Pilar em perfil H sujeito a compressão excêntrica

Wainman e Kirby(1988) apresentaram os resultados de um ensaio conduzido na GhentUniversit , na Bélgica, onde um pilar de  o H 400 x 400 com 3950 mm de comprimento, birrotulado, foi submetido a uma força axial de compressão de 3400 kN, com excentricidade dos apoios de 180 mm na direção do eixo de menor inércia. A Figura 5 ilustra as dimensões do perfil, vinculações, excentricidade da força normal e malha utilizada na análise numérica.

Pelas prescrições do EN 1993-1-2:2005, o produto  $k_{sh} \epsilon_f \epsilon_m$  nesse caso é igual a 0,45. Como esse valor   próximo ao valor de 0,5 prescrito no EN 1991-1-2:1991, adotou-se na análise numérica a emissividade resultante de 0,5. A Figura 6 mostra os resultados obtidos na análise.

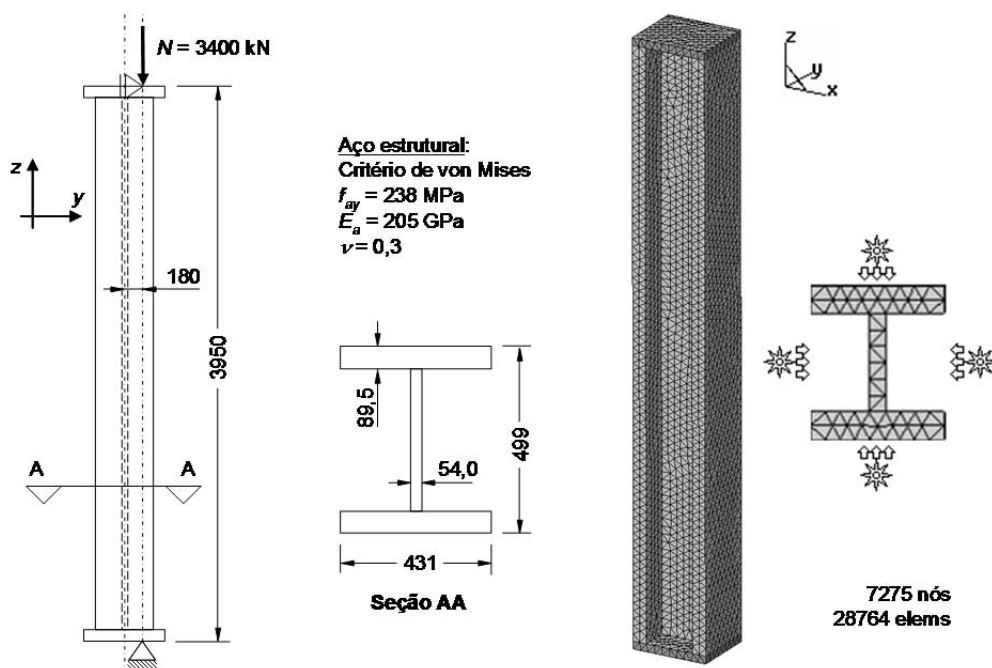


Figura 5: Dimensões e discretização do pilar de  o para análise numérica



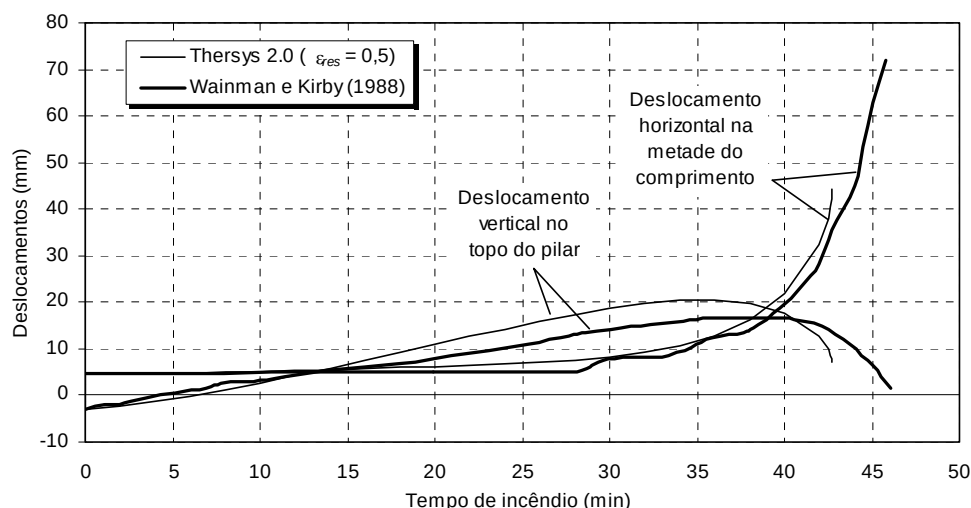


Figura 6: Deslocamentos obtidos na análise do pilar de aço

Como se pode observar na Figura 6, os deslocamentos da estrutura obtidos pela análise numérica são muito próximos aos deslocamentos medidos no ensaio. Com relação ao tempo máximo de resistência ao fogo, o *Thersys 2.0* interrompeu a análise com 42' 42" de incêndio, 7,2% abaixo do tempo máximo obtido no ensaio.

## 5.2 Pilar misto em perfil tubular circular preenchido com concreto

No segundo estudo de caso, analisou-se um pilar misto em perfil tubular circular preenchido com concreto e com uma excentricidade a meio vão de  $L/200$ . O pilar possui 4000 mm de comprimento, sendo biengastado e com a extremidade superior livre para a aplicação de uma força de compressão de 3071 kN. As propriedades mecânicas do aço e do concreto, bem como a malha de elementos utilizada na análise numérica são apresentados na Figura 7.

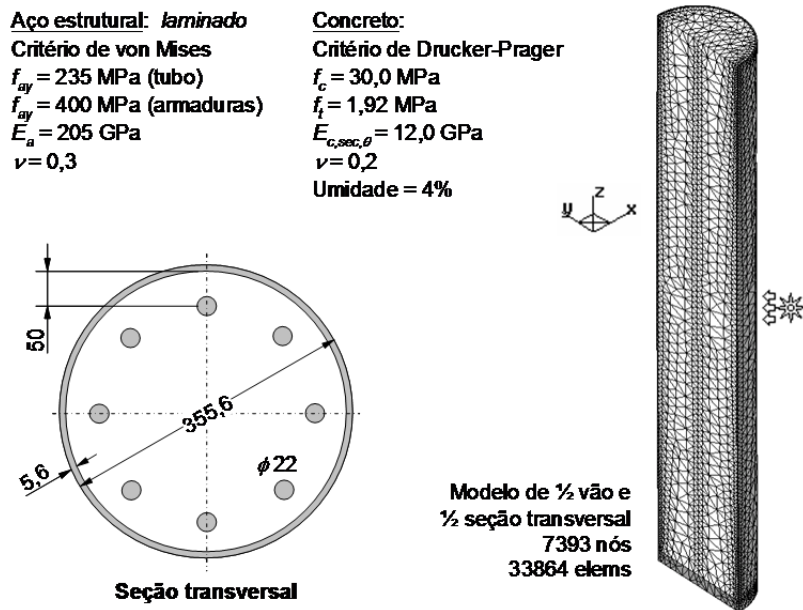


Figura 7: Dimensões e discretização do pilar misto tubular preenchido com concreto

Twiltet al.(1994)também analisaram esse mesmo estudo de caso por meio de um programa de computador desenvolvido e verificado por Valexty. O programa foi ajustado de modo a apresentar conformidade com os mais recentes resultados de ensaios. Para manter a compatibilidade com esse estudo, a análise por meio do *Thersys 2.0* considerou uma emissividade resultante de 0,5, sendo o incêndio aplicado em toda a face externa do tubo.

Twiltet al. (1994) obtiveram a força axial máxima suportada pelo pilar para os tempos de incêndio de 60, 90 e 120 minutos. Ribeiro, Fakury e Las Casas (2008) também analisaram esse problema e obtiveram uma boa concordância com os resultados apresentados por Twiltet al., como mostrado na Figura 8. Assim, extrapolando-se os resultados deTwiltet al. para 30 minutos de incêndio, obtém-se, para a força axial de 3071 kN, um tempo máximo de resistência ao incêndio de 49' 35".

A Figura 9 mostra os deslocamentos horizontais na metade do comprimento do pilar em função do tempo de incêndio obtidos na análise com o *Thersys 2.0*, em comparação com o tempo máximo de incêndio suportado pelo pilar segundo o estudo de Twiltet al. (1994).

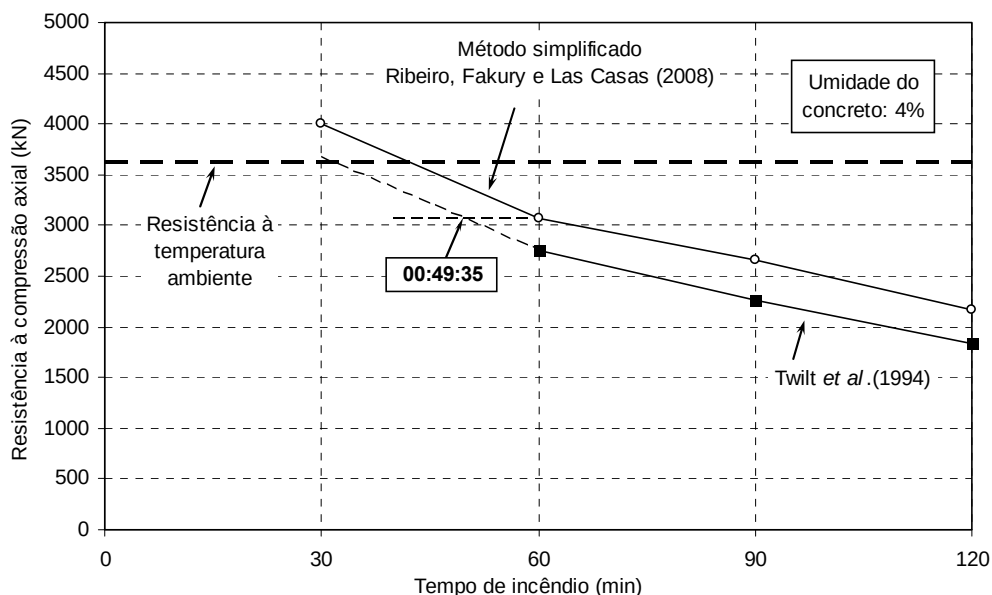


Figura 8: Tempo de resistência ao incêndio para o estudo de Twilt *et al.* (1994)

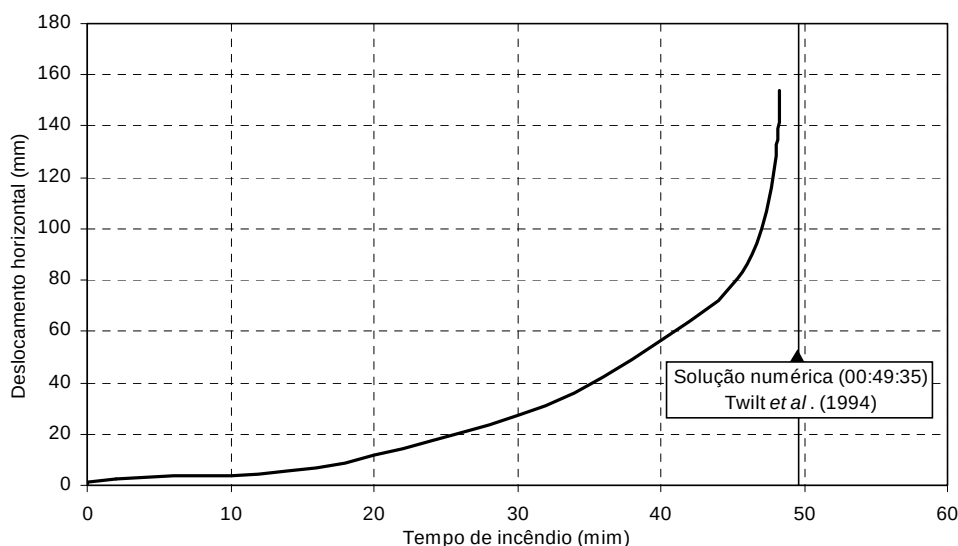


Figura 9: Deslocamentos horizontais a meio vão do pilar misto

Ao se utilizar o critério de Drucker-Prager ajustado com o raio médio entre os vértices internos e externos do critério de Mohr-Coulomb, observa-se que o tempo máximo de resistência ao incêndio obtido por meio do *Thersys 2.0* é apenas 2,6 % menor que o tempo obtido a partir dos resultados apresentados por Twilt *et al.* (1994).

## 6 Conclusões

O sistema computacional *Thersys 2.0* apresentado no presente trabalho se mostrou capaz de realizar análises termomecânicas avançadas, conforme o EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005. Por meio dos estudos de caso analisados, observou-se que os resultados obtidos pelo *Thersys 2.0* são

muito próximos dos resultados obtidos por ensaios e por outros métodos de análise. Assim, pode-se considerar que o mesmo representa uma contribuição no que se refere à caracterização e simulação do comportamento de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

## **7 Agradecimentos**

Ao CNPq, FAPEMIG, UFV e CBCA por terem tornado possível a execução deste trabalho.

## **8 Referências**

- ECS (1991). Actions on structures: Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2:1991 – EUROCODE 1. Bruxelas.
- ECS (2002). Actions on structures: Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2:2002 – EUROCODE 1. Bruxelas.
- ECS (2005a). Design of steel structures: Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1993-1-2:2005 – EUROCODE 3. Bruxelas.
- ECS (2005b). Design of composite steel and concrete structures: Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1994-1-2:2005 – EUROCODE 4. Bruxelas.
- HUANG, H.; USMANI, A.S. (1994). Finite Element Analysis for Heat Transfer. Springer-Verlag London Ltd., Swansea, Reino Unido.
- RIBEIRO, J.C.L. (2009). Desenvolvimento e aplicação de um sistema computacional para simulação via Método dos Elementos Finitos do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- RIBEIRO, J.C.L.; FAKURY, R.H.; LAS CASAS, E.B. (2008). Eurocode structural fire design and its application for composite circular hollow section columns. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. XXX, n. 1, p. 39-46.
- SOUZA NETO, E. A.; PERIĆ, D.; OWEN, D.R.J. (2008). Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Reino Unido.
- TWILT, L.; HASS, R.; KLINGSCH, W.; EDWARDS, M.; DUTTA, D. (1994). Design guide for structural hollow section columns exposed to fire. Construction with hollow steel sections, CIDECT, Verlag TÜV Rheinland, Alemanha.
- VILA REAL, P.J.M. (1988). Modelação por Elementos Finitos do Comportamento Térmico e Termo-Elástico de Sólidos Sujeitos a Elevados Gradientes Térmicos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
- WAINMAN, D.E.; KIRBY, B.R. (1988). Compendium of UK standard fire test data - unprotected structural steel. Volume 1, BSC Swinden Laboratories, Reino Unido.

# **Computational system for simulation of steel structures and composite steel and concrete structures behavior in fire situation**

## **Abstract**

Realistic advanced design rules and procedures to provide the fire safety of structures have been established in several countries. The European Standards for Steel Structures Design, EN 1993-1-2:2005, and the Composite Steel and Concrete Structures Design, EN 1994-1-2:2005, propose several methods for such structural design. Among them, “advanced methods of structural analysis” are mentioned. These methods must consider the principles and hypothesis used by heat transfer theory and structural mechanics. Non-linear geometry effects, non-linear material properties and the variation of material properties with temperature must be considered in the analysis. In this work, a computational system of thermo-mechanical analysis is presented, *Thersys 2.0* (Ribeiro 2009), a finite element based implementation of an advanced method of structural analysis. Two problems are analyzed and the results are compared and critically evaluated based on test results and simplified method results. The examples are used to validate the proposed software.

**Keywords:** Thermo-mechanical analysis. Fire safety design. Finite Element Method. Steel structures. Composite steel and concrete structures.

## **Objective**

This work has as objective to describe a computational system for simulation of steel structures and composite steel and concrete structures behavior in fire situation. The software considers the transient thermo-mechanical analysis weakly coupled of three-dimensional models and it is based on Finite Element Method.

The computational system developed finds the strength of single structures or structural subsystems under fire situation.

## **Methodology**

The computational system *Thersys 2.0* was developed using Delphi and the programming object-oriented (OOP) paradigm. The software allows transient and stationary non-linear thermal analysis, geometric and material non-linear mechanical analysis and considers the variation of material properties with the temperature. The following yielding criteria are implemented: von Mises (for steel) and Drucker-Prager (for concrete). The complete Newton-Raphson solution algorithm is employed, where the thermal analysis is solved first and the mechanical analysis is solved in sequence (weakly coupled). The algorithm is described in Figure 4.

## Results and discussion

The first problem analyzed consists of an I-column subjected to eccentric compression with bending around the lower inertial axis. Wainman and Kirby (1988) provided test results obtained in laboratory to this problem. The vertical displacement was measured at top of the column and the horizontal displacement was measured at mid of height of column. These displacements have a good fit with those obtained by *Thersys 2.0*, where the resultant emissivity used was 0.5. The numerical analysis with 0.7 resultant emissivity was also performed and the obtained results were conservative when compared to the test results.

The second problem is a composite steel and concrete column composed of a circular hollow section filled with concrete and subjected to a compressive load. The column has an eccentricity at mid-height of  $L/200$ . The results of this analysis are also presented by Twiltet *al.* (1994) and Ribeiro, Fakury and Las Casas (2008). The numerical analysis performed in *Thersys 2.0* considered the Drucker-Prager yielding criteria adjusted with the mid-radius between internal and external vertices of Mohr-Coulomb criteria. The results obtained also presented a good fit with those in the literature.

## Conclusions

The *Thersys 2.0* system, presented in this work, allowed performing advanced thermo-mechanical analysis, as defined by EN 1993-1-2:2005 and EN 1994 1 2:2005. The analyzed case studies showed that the results obtained by *Thersys 2.0* agreed very closely with experimental results and other methods of analysis. It can then be considered that *Thersys 2.0* represents a useful tool for characterization and simulation of steel structures and composite steel and concrete structures in fire situation.