

# MODELOS NUMÉRICOS DE PILARES MISTOS CURTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ÊNFASE ÀS SEÇÕES TUBULARES CIRCULARES DE AÇO PREENCHIDAS COM CONCRETO

**Rodrigo Tadeu dos Santos**  
**Ronaldo Rigobello**  
**Jorge Munaiar Neto**

Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (USP),  
Avenida Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil,  
e-mails: santosrt@sc.usp.br, ronbello@sc.usp.br, jmunaiar@sc.usp.br

## Resumo

Os pilares mistos de aço e concreto apresentam comportamento estrutural bastante satisfatório e reduzem o fenômeno denominado “*spalling*”, que pode ocorrer em elementos de concreto submetidos a elevadas temperaturas, em resposta ao efeito confinamento bastante pronunciado em seções tubulares circulares. Para esse mesmo elemento, ressalta-se também sua reduzida taxa de aquecimento por consequência da baixa condutividade térmica do concreto. A presente proposta de trabalho tem por objetivo principal modelar numericamente, em campo tridimensional, pilares mistos curtos com seções tubulares circulares de aço preenchidos com concreto submetidos ao *incêndio-padrão* proposto pela norma ISO 834:1999. A modelagem busca simular o comportamento estrutural em situação de incêndio observando a influência da elevação de temperatura na resistência e, em caráter apenas exploratório, no confinamento desses mesmos elementos. Para a modelagem numérica se utiliza o código computacional ANSYS® V9.0, cujos resultados são comparados com valores obtidos por meio do código computacional STC v5.0.

*Palavras-chave:* estruturas de aço, estruturas mistas de aço e concreto, pilares mistos, incêndio, análise numérica, análise não linear.

## Introdução

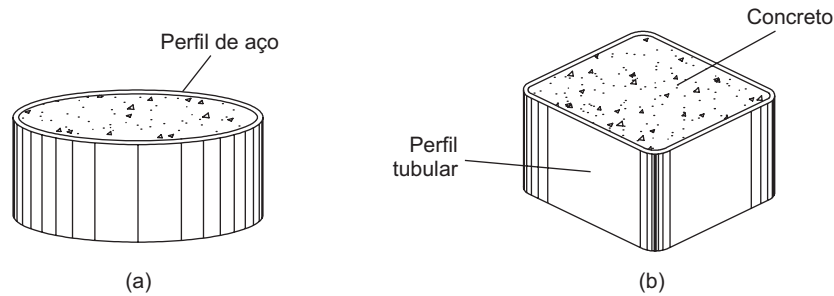
A consideração do trabalho em conjunto dos elementos de aço e de concreto para a concepção de elementos mistos, como, por exemplo, *as lajes mistas de aço e concreto, as vigas mistas de aço e concreto e os pilares mistos de aço e concreto*, surgiu, inicialmente, como forma de proteção ao fogo e à corrosão dos elementos estruturais de aço, em que o concreto não possuía qualidade estrutural, contribuindo pouco para a resistência do elemento. Posteriormente, passou-se a considerar a contribuição do concreto na resposta estrutural desses mesmos elementos, garantindo considerável eficiência estrutural em termos de resistência e de rigidez. O elemento de aço (tubular) pode ser utilizado na forma de perfis laminados, soldados ou formados a frio, enquanto o concreto pode ser simples ou armado.

Os pilares mistos preenchidos com concreto, quando analisados em temperatura ambiente, asseguram maior e mais adequada eficiência estrutural para fins de utilização em estruturas correntes. Tais elementos apresentam como vantagens a *ausência de fôrmas, redução ou até mesmo*

*a ausência de armaduras, redução da seção transversal, redução no consumo de material, aumento da área útil do pavimento e ganho na ductilidade do pilar.*

Atualmente, as pesquisas referentes às estruturas em situação de incêndio crescem de forma significativa no cenário mundial. Tal fato se justifica pela necessidade de avaliar o desempenho das estruturas quando estas são submetidas à ação térmica. O aumento gradativo de temperatura provoca alterações nas propriedades mecânicas dos materiais, fazendo com que ocorra redução de resistência e rigidez, podendo levar a estrutura ao colapso prematuro.

No caso de pilares mistos de aço preenchidos por concreto, conforme Figura 1 extraída de De Nardin (2006), quando submetidos a ação térmica, além de apresentarem comportamento estrutural bastante satisfatório, reduzem ou mesmo evitam o fenômeno do “*lascamento*”, ou “*spalling*”, presente em elementos de concreto submetidos a elevadas temperaturas em virtude do efeito de confinamento do concreto imposto pelo tubo de aço.



**Figura 1** Seções mistas de aço preenchidas por concreto: (a) circular e (b) quadrada.

Destaca-se também, conforme descrito em Han (2003), o fato de o tubo de aço se expandir axialmente no início da fase de aquecimento, passando a receber a maior parte da carga aplicada, fazendo com que a tensão de compressão no núcleo de concreto diminua. Posteriormente, com o aumento da temperatura, o aço passa a se deformar localmente e a carga passa também a ser resistida pelo concreto. Em um estágio final, o aço, axialmente, não suporta mais a carga aplicada, porém, ainda mobiliza restrição à deformação radial do núcleo de concreto até o instante de ruptura do elemento misto como um todo.

Outro aspecto a ser considerado, segundo Ding & Wang (2008), refere-se ao fato de a maioria dos pesquisadores assumir, como hipótese simplificadora, contato perfeito na interface entre o aço e o concreto nos pilares mistos preenchidos durante a exposição ao fogo. A última referência ressalta o fato de a dilatação do aço ser maior que a do concreto, impondo um descolamento no contato, dando origem à existência de uma “folga” (*gap de ar*) entre ambos, fenômeno que deve ser levado em conta em análises experimental e numérica.

## O Incêndio – Elevação da Temperatura e Seus Efeitos

O incêndio caracteriza-se pela existência de fogo sem controle, e só ocorrerá se houver *fonte de calor, combustível e oxigênio (comburente)*, juntos denominados “*triângulo do fogo*”. A reunião desses três elementos origina uma reação química exotérmica que libera calor em grande intensidade.

O risco de ocorrer um incêndio, sua intensidade e duração estão diretamente associados à quantidade, ao tipo e ao posicionamento da carga de incêndio (material combustível) que constitui o mobiliário ou equipamentos de um dado ambiente. Em virtude da grande dificuldade em determinar todos esses aspectos, convencionou-se adotar um modelo de curva temperatura-tempo conhecido como “incêndio-padrão”, representado pela equação (1), a qual determina a temperatura dos gases ( $T_g$ ) em função do tempo, de acordo com a ISO 834:1999. Na equação (1),  $t$  é o tempo em minutos e a temperatura dos gases é dada em °C. A Figura 2 representa graficamente a curva de incêndio-padrão.

$$T_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

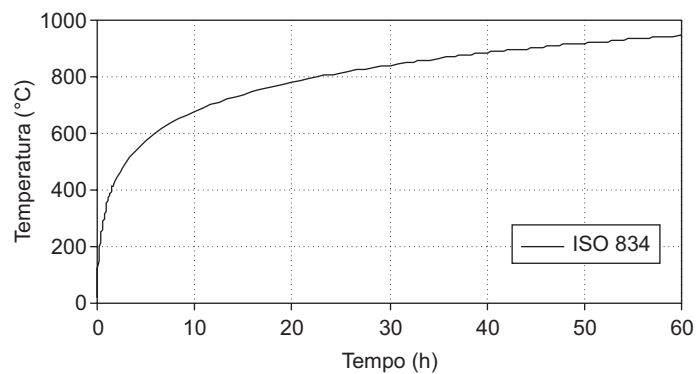
A verificação estrutural em situação de incêndio deve-se ao fato de as propriedades mecânicas do aço e do concreto resultarem reduzidas quando expostas a elevadas temperaturas, podendo provocar o colapso da estrutura em um tempo reduzido. A influência da temperatura na resistência ao escoamento e na rigidez do aço e do concreto pode ser observada, de maneira geral, conforme informações apresentadas na Figura 3, elaborada com base em Silva (2000).

Dos parâmetros de interesse para fins de análise térmica, destacam-se o calor específico ( $C_a$  em J/kg°C), que representa a quantidade de calor requerida para aumentar em uma unidade de temperatura a massa unitária do material, bem como a condutividade térmica ( $\lambda_a$  em W/m°C), parâmetro que estabelece a razão pela qual o calor é conduzido para o interior do material em análise. A norma brasileira ABNT NBR 14323:1999 disponibiliza valores, em função do tempo, para o aço e para o concreto, conforme Figuras 4 e 5.

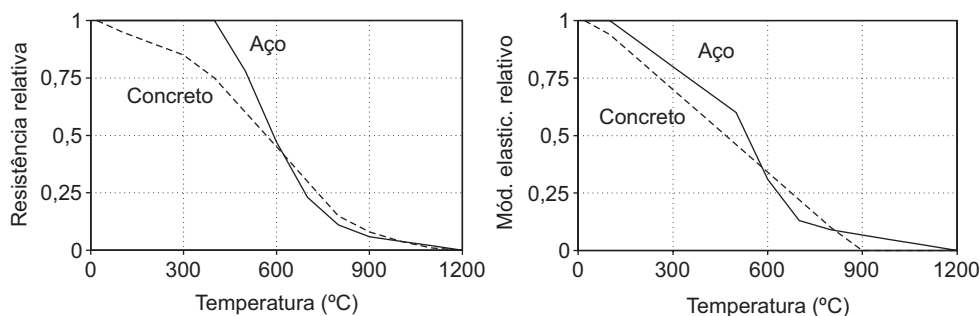
As informações disponibilizadas nas Figuras 3, 4 e 5 foram utilizadas (fornecidas ao ANSYS) nas análises térmicas realizadas dentro do contexto do presente trabalho. Também foram adotados os seguintes valores:  $\alpha_c = 25$  W/m<sup>2</sup>°C (coeficiente de transferência de calor por convecção) e  $\epsilon_r = 0,5$  (emissividade resultante).

## Modelos Numéricos – Estratégia Adotada

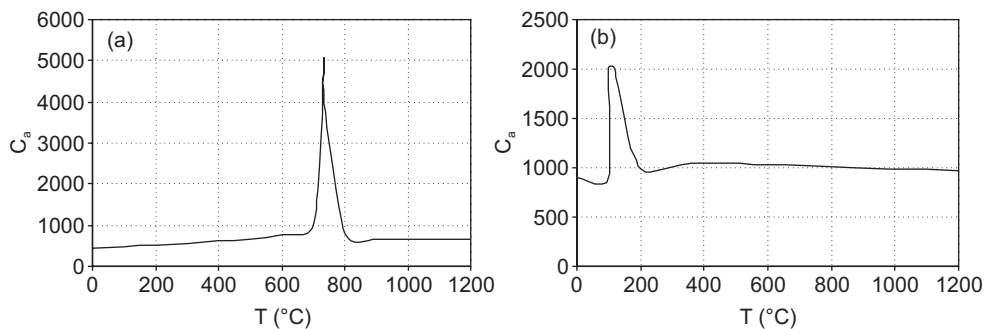
Para a modelagem numérica foi utilizado o pacote comercial ANSYS® V9.0, o qual permite a análise transiente do gradiente térmico nos elementos estruturais, conforme descrito em Rigobello (2007). Foi realizada em campo tridimensional, conforme Figura 6, para pilares mistos curtos com seções tubulares circulares de aço preenchidos com concreto submetidos ao incêndio-padrão. A modelagem foi dividida em duas etapas: análise térmica com aplicação do campo térmico no modelo numérico e, em seguida, análise termoestrutural com aplicação do carregamento (axial) juntamente com a influência da temperatura no comportamento dos materiais.



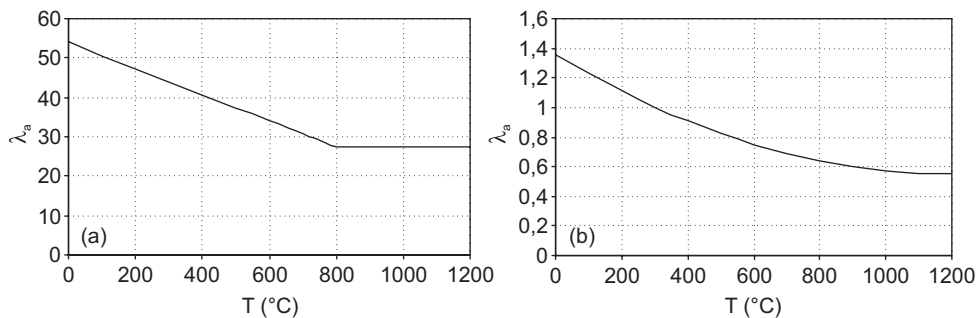
**Figura 2** Curva referente ao incêndio-padrão de acordo com a ISO 834:1999.



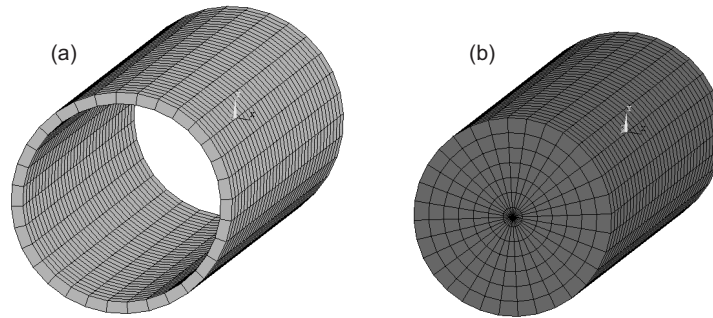
**Figura 3** Reduções da resistência e módulo de elasticidade, do aço e do concreto, em função da temperatura.



**Figura 4** Gráficos referentes ao calor específico para: (a) aço e (b) concreto.



**Figura 5** Gráficos referentes à condutividade térmica para: (a) aço e (b) concreto.



**Figura 6** Malha de elementos finitos utilizada: (a) tubo de aço e (b) núcleo de concreto.

Tomando como ponto de partida a análise em temperatura ambiente, foram utilizados valores de resultados experimentais apresentados em Oliveira (2008), os quais se referem a pilares mistos circulares preenchidos e que servirão como valores de comparação para os resultados em temperaturas elevadas. As características do modelo experimental utilizado no presente trabalho, aqui denominado PMC-19, refere-se a um pilar misto curto de seção circular preenchido com concreto, de relação  $D/t = 19$  e com as seguintes dimensões:

- D (diâmetro total) = 114 mm, t (espessura de chapa) = 6 mm e h (altura) = 343 mm;
- resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck} = 32$  MPa);
- resistência ao escoamento do aço ( $f_y = 343$  MPa).

#### **Elementos finitos adotados**

Para análise térmica seguiu-se a mesma estratégia adotada em Rigobello (2007), em que foram utilizados dois tipos de elementos finitos: o SOLID70 para modelar o pilar misto de aço preenchido por concreto e o SURF152 para aplicar ao modelo as condições de contorno respectivas à carga térmica (referente à convecção e à radiação). O SOLID70 é um elemento finito sólido que possui oito nós, com um grau de liberdade em cada nó, no caso, a temperatura. O SURF152 possui de quatro a nove nós, além de um nó extra para simular efeitos térmicos, todos com apenas um grau de liberdade, no caso, também a temperatura.

Na elaboração dos modelos numéricos para a análise termoestrutural também se segue a mesma estratégia adotada em Rigobello (2007), em que foram utilizados quatro tipos de elementos finitos: o SOLID45 para modelar o tubo de aço e o SOLID185 para modelar o concreto, conforme Figura 7, bem como os elementos de contato TARGE170 e CONTA174, para representar o contato entre os materiais aço e concreto. O SOLID45 possui oito nós, com três graus de liberdade em cada nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais). O SOLID185 possui oito nós, com três graus de liberdade em cada nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z.

#### **Modelos constitutivos adotados**

As relações constitutivas “ $\sigma \times \epsilon$ ” adotadas para representar o comportamento dos materiais aço e concreto basearam-se nas prescrições do EUROCODE. No caso do aço foi utilizado o EN 1993-1-2:2005, para temperaturas variando de 20 a 1100°C. A Figura 8 esquematiza o diagrama “ $f_y \times \epsilon$ ” para o aço.

As relações constitutivas adotadas para o concreto foram adaptadas daquelas apresentadas no EN 1992-1-1:2004, em que se considera, como simplificação, regime plástico perfeito após a ruptura, tanto para tração quanto para compressão. As Figuras 9 e 10 esquematizam os diagramas “ $f_c \times \epsilon$ ” para o concreto solicitado à tração e à compressão, respectivamente, com temperatura em °C e tensão em  $N/m^2$ .

#### **Carregamento e restrições**

Na face inferior (base) do modelo que representa o pilar misto curto, os deslocamentos foram impedidos nas três direções X, Y e Z, enquanto na face superior foram permitidos apenas os deslocamentos na direção Z (vertical). Optou-se ainda por acoplar os nós da seção superior do pilar na direção Z, possibilitando atribuir um nó de referência (chamado nó mestre). A força de compressão é aplicada no nó mestre, de tal modo que todos os nós acoplados na seção apresentem o mesmo deslocamento.

Nas direções X e Y os deslocamentos foram impedidos. O impedimento do deslocamento nas direções X e Y teve por objetivo simular o forte atrito entre as faces do corpo-de-prova com os apoios, comumente observado nos experimentos realizados em laboratório.

#### **Análise Térmica – Resultados Obtidos**

O pacote computacional ANSYS é reconhecido por seu grande potencial quando aplicado em análises de interesse por meio da aplicação do Método dos Elementos Finitos. É importante ressaltar, porém, que o mesmo não foi construído especificamente para análise térmica, razão pela qual se faz necessária a validação dos seus resultados, em campo térmico, para adequada calibração e análise dos modelos de pilares a serem aqui analisados.

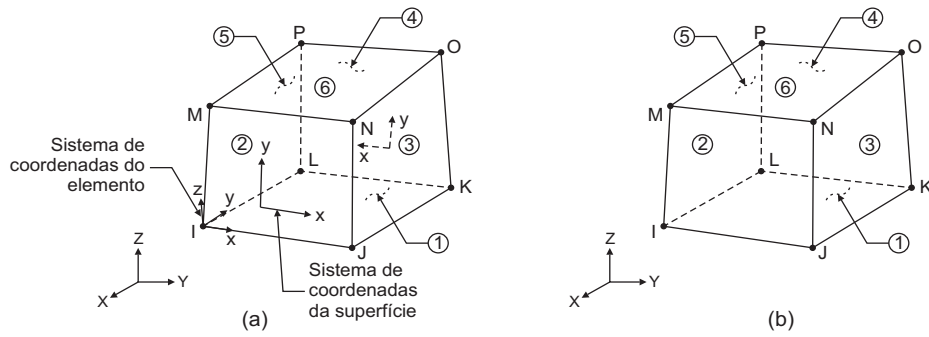


Figura 7 Elementos finitos utilizados: (a) SOLID45 e (b) SOLID185.

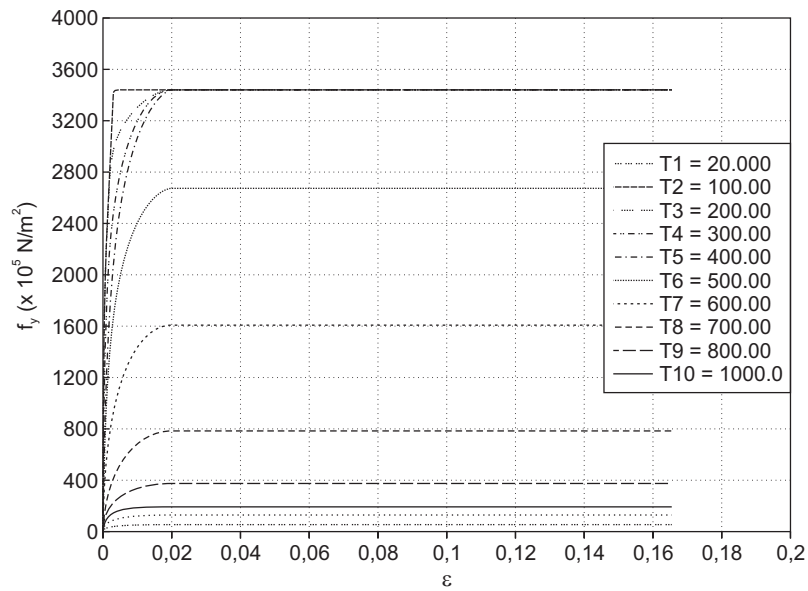


Figura 8 Relações “tensão × deformação” para aço, em função da temperatura.

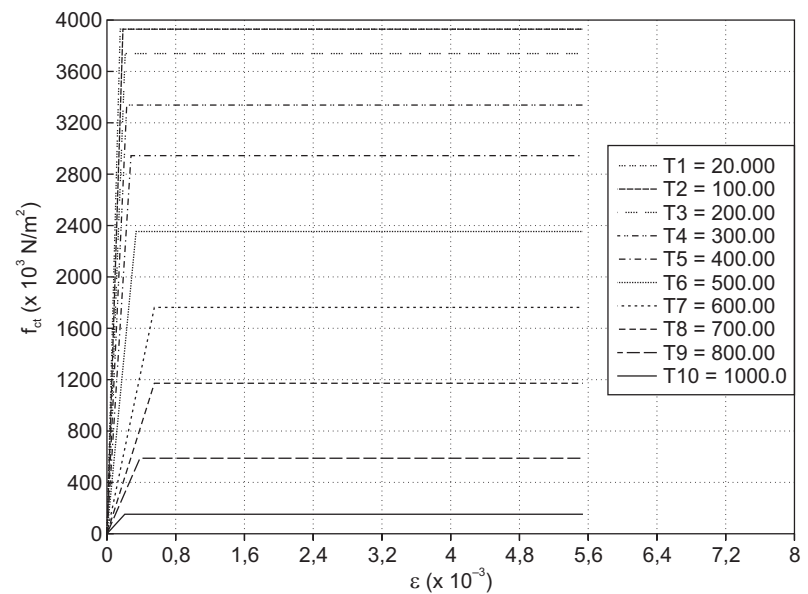


Figura 9 Relação “tensão × deformação” para o concreto tracionado em função da temperatura.

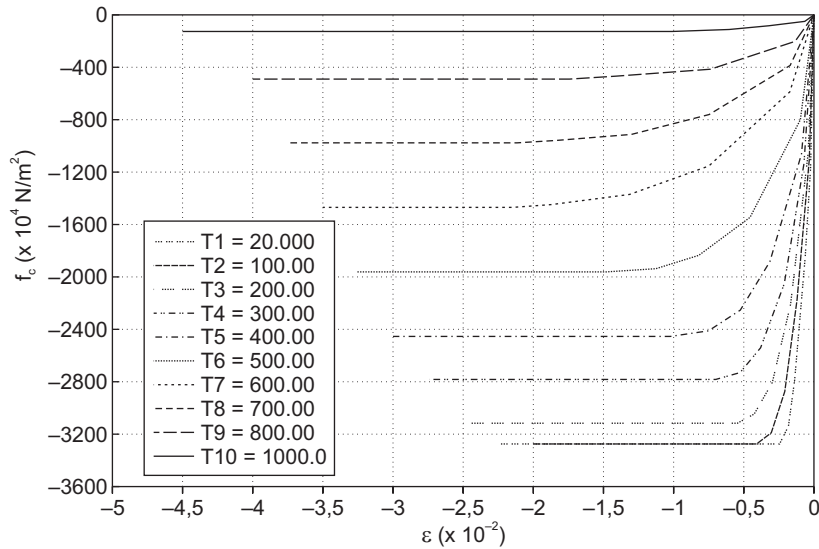


Figura 10 Relação “tensão × deformação” para o concreto comprimido, em função da temperatura.

Para a validação do campo térmico, o mesmo modelo de pilar misto foi analisado via ANSYS v9.0 e via TCD v5.5, em ambos os casos submetido ao incêndio-padrão. A Figura 11 mostra a distribuição da temperatura na seção transversal do pilar misto, para um TRRF igual a 60 minutos. Vale destacar que os resultados obtidos via TCD foram gentilmente cedidos por Valdir Pignatta e Silva, atualmente professor da Escola Politécnica da USP.

Outra forma de comparar os resultados obtidos entre ambos os códigos é por meio do gráfico apresentados na Figura 12, o qual representa a elevação da temperatura na seção transversal para tempos (TRF) iguais a 15, 30 e 60 minutos.

As Figuras 11 e 12 permitem constatar que os valores de temperatura (campo térmico) obtidos com o ANSYS e com o TDC resultaram muito próximos e, portanto, em concordância com as necessidades da análise termoestrutural apresentada no item a seguir.

### Análise Termoestrutural – Resultados Obtidos

A análise termoestrutural (*análise acoplada*) consiste basicamente em aplicar uma carga axial de compressão no modelo de pilar misto curto e, após a aplicação do referido carregamento, acoplar o campo térmico, determinando o tempo de ruptura para a força aplicada bem como o deslocamento axial do pilar misto em função da elevação da temperatura.

A análise acoplada que será realizada permite determinar o “tempo crítico” (ou temperatura crítica) para cada nível de carregamento aplicado e, com isso, apresentar uma dada curva referente ao fator de redução da força resistente do pilar misto curto, aqui definido

pelo parâmetro  $K_{PM}$ , obtido em função do tempo de incêndio.

Na Figura 13 é apresentado o gráfico de “deslocamento axial x tempo” para vários níveis de carregamento aplicados, com o qual passa a ser possível determinar o tempo de ruptura do pilar misto para cada nível de carregamento e, com isso, construir o gráfico da curva de redução de resistência ( $K_{PM}$ ) analisado e aqui denominado Modelo PMC-19.

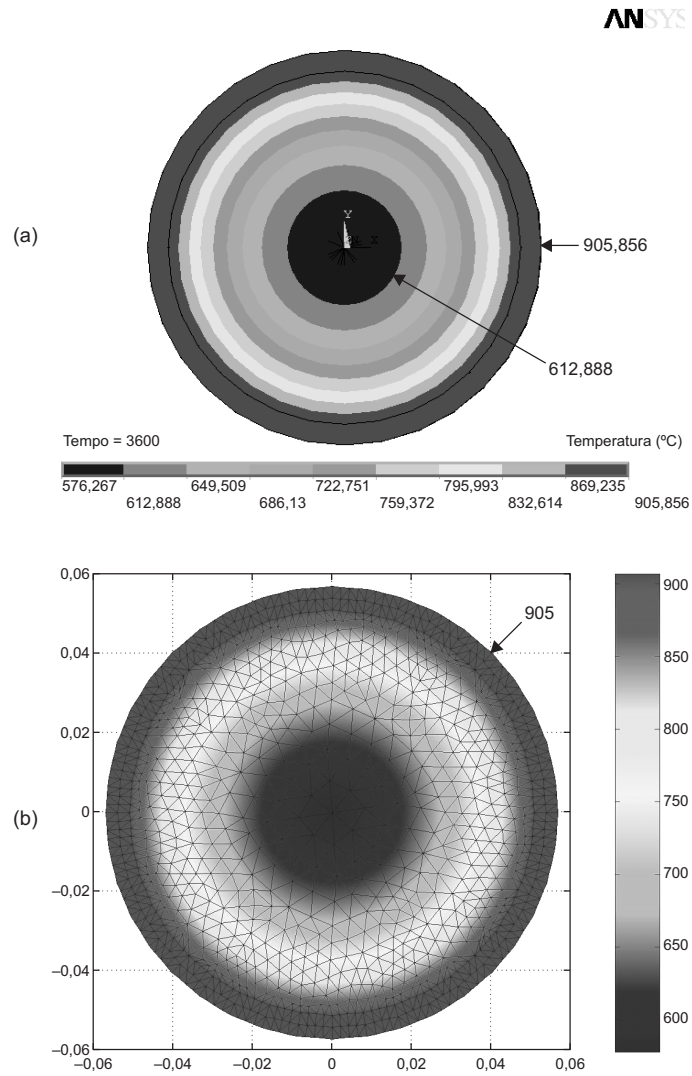
O tempo crítico (máximo) de exposição ao incêndio para cada nível de carregamento, utilizado na construção do gráfico “ $K_{PM}$  x tempo”, foi adotado como sendo aquele correspondente ao último passo de carga alcançado durante o processamento do modelo numérico em análise. Como é possível observar nos gráficos da Figura 13, para os últimos passos de carga os valores de deslocamento apresentam comportamento assintótico.

Na Figura 14 é apresentado um gráfico referente à relação entre a força crítica em incêndio ( $F_{c,ti}$ ) e a força crítica em temperatura ambiente ( $F_{c,ta}$ ), conforme equação (2), aqui denominada fator de redução de força resistente ( $K_{PM}$ ) do elemento em situação de incêndio.

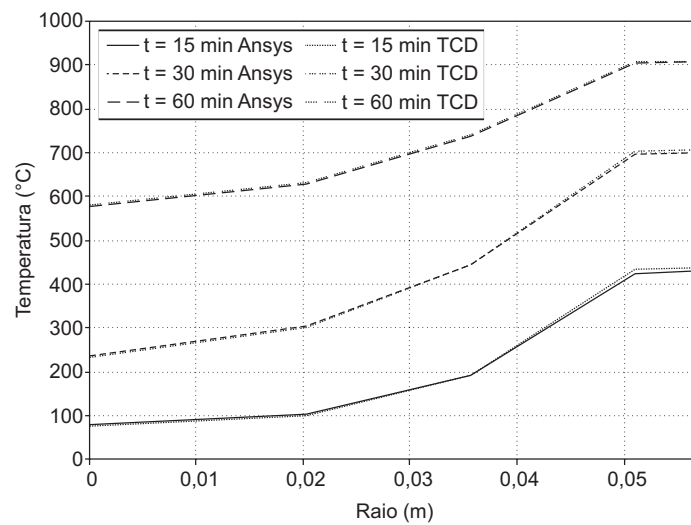
$$K_{PM} = \frac{F_{c,ti}}{F_{c,ta}} \quad (2)$$

Na Figura 14 ainda são comparados os resultados obtidos pelo TCD, agora utilizado também para fins de análise termoestrutural, com os resultados obtidos pelo ANSYS, permitindo determinar o tempo crítico do pilar misto para certo carregamento. Para fins de ilustração, a Figura 15 apresenta a configuração deformada final para o Modelo PMC-19 obtida via ANSYS, para  $K_{PM} = 0,75$  e tempo de 17 minutos.





**Figura 11** Distribuição da temperatura na seção transversal: (a) via ANSYS e (b) via TCD.



**Figura 12** Elevação da temperatura na seção transversal.

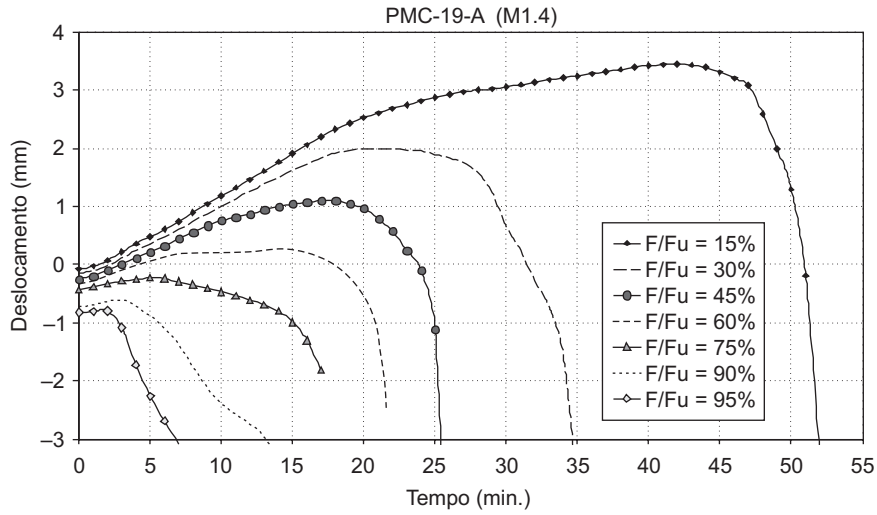


Figura 13 Gráfico de “deslocamento × tempo” para vários níveis de carregamento aplicados, referente ao Modelo PMC -19.

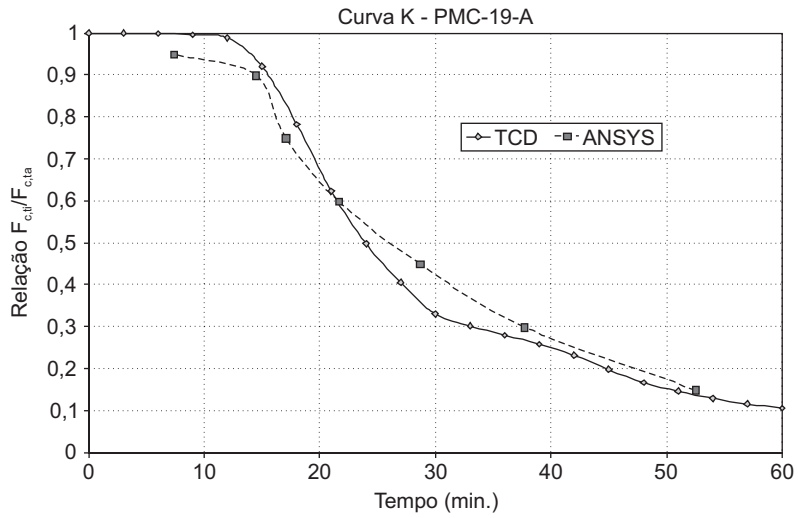


Figura 14 Curvas de redução de força resistente, para o Modelo PMC-19, obtidas via ANSYS e via TCD.



Figura 15 Configuração deformada para níveis de deformação do Modelo PMC-19, para  $K_{PM}$  igual a 0,75 e tempo de exposição ao fogo igual a 17 minutos.



Com base nos resultados obtidos e apresentados no gráfico da Figura 14 constata-se concordância bastante satisfatória dos resultados obtidos por meio do ANSYS quando comparados àqueles obtidos por meio do programa TCD.

### Considerações e Conclusões

Com relação à análise térmica, a comparação dos resultados obtidos no ANSYS e no TCD se mostra bastante satisfatória, indicando a potencialidade do código ANSYS para a análise do campo térmico de pilares mistos, fato já constatado em estudos realizados em Rigobello (2007).

A identificação do tempo de colapso do pilar (tempo crítico) para os vários níveis de carregamento considerados possibilitou a construção da Curva de Redução de Força Resistente para o Modelo PMC-19, denominada curva  $K_{PM}$ , a qual determina o tempo de colapso do pilar misto em função do nível de carregamento aplicado, cujos resultados obtidos pelas análises acopladas utilizando o ANSYS foram comparados com os resultados obtidos via TCD, e foram praticamente coincidentes. Vale lembrar que, nessa etapa, foi considerada carga térmica uniforme ao longo de todo o contorno da seção transversal do pilar analisado.

Tendo em vista a boa representatividade da curva de redução de força resistente do elemento em situação de incêndio (curva  $K_{PM}$ ) do ANSYS, quando comparada com a curva do TCD, e sua fácil utilização, fica simples a determinação do tempo de ruptura para certo carregamento em situação de incêndio com a proposta de modelagem aqui sugerida. Tal aspecto ainda sugere o fato de as instabilidades locais não resultarem pronunciadas em pilares curtos, quando da análise dos modelos no ANSYS, tendo em vista o fato de o TCD não considerar esse mesmo fenômeno em seu equacionamento.

Diante do exposto pode-se afirmar que a proposta de modelagem numérica aqui apresentada, com o uso do pacote computacional ANSYS, mostra-se adequada para o estudo de modelos numéricos de pilares mistos curtos de seção circular de aço preenchido com concreto em situação de incêndio, quando empregada para a análise térmica e termoestrutural. No entanto, vale lembrar que o modelo não permite a identificação adequada do efeito do confinamento, aspecto que deverá ser melhor estudado em trabalhos futuros.

### Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq e ao Departamento de Engenharia de Estruturas pelo auxílio e apoio à pesquisa aqui desenvolvida.

### Referências Bibliográficas

- ANSYS INC. *Ansys Release 9.0* – Documentation. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 14323*: dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – procedimento. Rio de Janeiro, 1999.
- DE NARDIN, S. et al. *Pilares mistos aço-concreto*: novos procedimentos e recomendações normativas no Brasil. Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural, Campinas, São Paulo, 2006.
- DING; WANG Y.C. Realistic modelling of thermal and structural behaviour of unprotected concrete filled tubular columns in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EN 1992-1-1*: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules General and rules for building e Wangs. Brussels, Belgium, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EN 1992-1-2*: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels, Belgium, 2004.
- HAN, L. H.; ZHAO, X. L.; YANG, Y. F.; FENG, J. B. Experimental study and calculation of fire resistance of concrete-filled hollow steel columns. *Journal of Structural Engineering* © ASCE, v. 129, n. 3, p. 346-356, 2003.
- OLIVEIRA, W. L. A. *Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular*. 2008. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- RIGOBELLO, R. *Modelagem numérica da elevação de temperatura em seções transversais de elementos estruturais com base em modelo de incêndio-padrão*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SILVA, V. P. O comportamento de sistemas estruturais básicos de aço em situação de incêndio. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta Del Este. *Anais...* Punta Del Este, 2000.

