



AValiação DO CAMPO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DE PILARES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

ALMEIDA, Thamyrys Morgana Pontes¹

MARQUES, Severino Pereira Cavalcanti²

¹ Eng^a Civil, Mestranda, Pós-graduação em Engenharia Civil - Estruturas, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas, thamy.mpa@gmail.com.

² Eng^o Civil, M.Sc., Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil - Estruturas, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas, smarques@ctec.ufal.br.

³ Trabalho que subsidiará dissertação de mestrado.

Resumo. *Estruturas de concreto armado (CA) estão cada vez mais sendo utilizadas devido ao número de vantagens que proporcionam sobre outros materiais de construção. Por ser incombustível e apresentar baixa condutividade térmica, é considerado um material resistente ao fogo. No entanto, casos de incêndios com colapso estrutural mostram a necessidade de se estudar as estruturas de concreto submetidas à altas temperaturas. Uma vez que os pilares formam o principal componente de suporte de carga de uma estrutura, este trabalho apresenta uma abordagem para analisar a distribuição do campo de temperatura da seção transversal, quando expostos ao fogo. Foram analisados os campos de temperatura utilizando os valores das propriedades térmicas do concreto variando com a temperatura e valores simplificados sugeridos em normas. A ação térmica externa é assumida como espacialmente simétrica, uma vez que o trabalho avalia pilares de seção retangular e as análises foram feitas através de um modelo térmico transiente bidimensional. Foi utilizado o Método das Diferenças Finitas (MDF) para a solução numérica do problema e sua implementação foi realizada por meio do programa computacional MATLAB.*

Palavras-chave: *Pilares, Concreto armado, Estruturas, Incêndio.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto armado vem sendo considerado o material mais utilizado nos sistemas estruturais devido ao número de vantagens que proporcionam sobre outros materiais. Os pilares por sua vez, formam o principal componente de suporte de carga de uma estrutura, assim, os pilares de concreto armado devem satisfazer aos requisitos de resistência ao fogo especificados nas normas de construção, uma vez que, quando outras medidas para conter o incêndio falharem, a integridade estrutural torna-se a principal linha de defesa.

É uma tendência internacional exigir que todos os materiais e sistemas construtivos, sejam analisados e testados do ponto de vista da segurança contra incêndio. Na estabilidade de uma estrutura, os pilares podem ser considerados como o principal elemento, uma vez que detêm todo o carregamento gerado pelos outros elementos estruturais. Para uma avaliação de estruturas durante e após uma situação de incêndio, é de fundamental importância conhecer a

evolução do campo de temperatura em sua seção transversal. Essa avaliação é importante, pois em alguns casos os elementos submetidos ao incêndio podem ter sofrido alterações significativas nas suas propriedades mesmo sem apresentar danos visíveis na superfície.

2 O INCÊNDIO

Um incêndio é modelado por meio de curvas temperatura-tempo, de modo que elas associam a elevação da temperatura em função do tempo de duração do incêndio, permitindo estimar a máxima temperatura dos gases quentes no ambiente em chamas. O incêndio real se caracteriza pelo crescimento e decréscimo da temperatura ao longo de sua duração. Através da sua curva temperatura-tempo, observa-se suas três fases distintas. Na ignição (primeira fase), o incremento de temperatura acontece de forma lenta, quase sem influência das características do ambiente e sem risco à vida humana ou ao patrimônio por colapso estrutural. Pouco antes da segunda fase, ocorre o crescimento brusco da temperatura, o instante a partir do qual todo o compartimento é tomado pelas chamas é conhecido como *flashover*, onde a inflamação é generalizada. Na terceira fase, ocorre o decaimento gradual da temperatura, caracterizada pelo resfriamento.

O incêndio padrão possui apenas um ramo ascendente, admitindo que a temperatura dos gases sempre cresça com o tempo, independentemente assim, da carga do incêndio e das características do compartimento. Vale ressaltar que as informações fornecidas baseadas nessa curva devem ser cuidadosamente analisadas, uma vez que não representam um incêndio real, sendo associadas a tempos padronizados para fornecer parâmetros de projetos. Uma comparação entre as curvas de um incêndio real e um incêndio padrão é mostrada na Fig. 1.

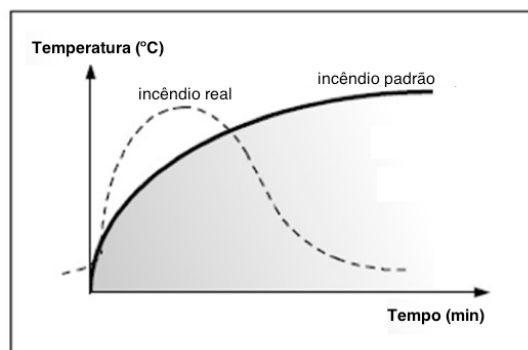


Figura 1. Comparação entre um incêndio real e um incêndio padrão. Fonte: SILVA (2004).

Diversas normas nacionais, internacionais e estudos científicos utilizam a recomendação da *International Organization for Standardization* - ISO 834:1975 relaciona por meio de uma curva logarítmica, a elevação da temperatura com o tempo de incêndio para materiais celulósicos, conforme a Eq. 1.

$$\theta_g = 345 \log(8t + 1) + \theta_0 \quad (1)$$

onde: θ_0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento [°C], normalmente tomada igual a 20°C; θ_g é a temperatura dos gases no instante t [°C]; t é o tempo em [min.].

3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Segundo Costa (2008), no concreto, o calor se propaga, elevando a temperatura gradualmente ao longo da seção do elemento e originando elevados gradientes térmicos. No aço, o calor se propaga mais rápido e a temperatura elevada tende a se uniformizar ao logo da pequena seção das barras das armaduras.

Na Tabela 1, são apresentados os valores simplificados das propriedades térmicas sugeridos pelas normas NBR 15200:2002 e o Eurocode 2 (EN 1992-1-2-2004), para o concreto e pelas normas NBR 14323:2013 e Eurocode 4 (EN 1994-1-2-2005), para o aço. Os valores para as mesmas propriedades térmicas em função da temperatura, podem ser determinados por meio de equações citadas nas mesma normas.

Tabela 1. Valores simplificados sugeridos por normas.

Propriedade térmica	Símbolo	Concreto	Aço
Condutividade térmica	$\lambda_{,\theta}$	1.3 W/m °C	45 W/m °C
Calor específico	$c_{,\theta}$	1000 J/kg °C	600 J/kg °C
Massa específica	$\rho_{,\theta}$	2400 kg/m ³	7850 kg/m ³

4 MODELO NUMÉRICO

Conhecer a distribuição de temperaturas no interior de um elemento estrutural, é de grande importância para se compreender o efeito do incêndio na estrutura. A evolução do campo de temperatura nos elementos estruturais é a base para estudos que visam entender a mudança das propriedades dos materiais quando expostos em altas temperaturas.

Um modelo para análise térmica de estruturas bidimensionais utilizando o método das diferenças finitas será apresentado. Sua formulação foi implementada utilizando o *software* Matlab, versão R2015a.

4.1 Equações diferenciais básicas

A determinação do campo de temperatura da seção transversal de uma estrutura pode ser realizada pela Equação Diferencial de Transferência de Calor. A equação foi reduzida para uma análise bidimensional em regime transiente e é descrita pela Eq. 2. Com essa equação, pode-se obter a distribuição de temperaturas T(x,y) na seção transversal como uma função do tempo.

$$\rho_{i,k}^j \cdot c_{i,k}^j \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{i,k}^j \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{i,k}^j \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

onde: T é a temperatura [°C]; ρ é a densidade do material [Kg/m³]; c é o calor específico do material [J/kg°C]; λ é a condutividade térmica do material [W/m °C]; t é o tempo [seg.]; x e y são os eixos cartesianos usuais; i é a discretização espacial em relação ao eixo y; k é a discretização espacial em relação ao eixo x; j é a discretização temporal.

4.2 Discretização em diferenças finitas

Segundo Hoffman (2001), o método de diferenças finitas é um procedimento numérico que resolve equações diferenciais parciais (EDP), por discretização do domínio físico contínuo em uma malha discreta finita, aproximando cada derivada parcial na EDP por aproximações de diferenças algébricas finitas. Ao substituir essas aproximações na EDP, será obtida uma equação algébrica de diferenças finitas para a variável dependente.

As derivadas parciais na EDP para cada ponto da malha são aproximadas nos valores vizinhos pelo uso do teorema de Taylor. No método de diferenças finitas, temos para as diferenciais de primeira e segunda ordem as Eq. 3 e Eq. 4 respectivamente

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (4)$$

5 ANÁLISES E RESULTADOS

A equação governante se origina do desenvolvimento da Eq. 2 e foi utilizada na construção de um algoritmo computacional. As análises foram realizadas em pilares de seção quadrada (40cm x 40cm), para um número pré-determinado de discretizações espaciais (Δx e $\Delta y = 4$ cm) e discretização temporal ($\Delta t = 30$ seg.). Para o incêndio, foi considerado um incêndio-padrão com duração de uma hora, em que a temperatura da fonte se comportava conforme a curva ISO 834 e agia diretamente nas superfícies do pilar.

Na análise dos resultados, foram coletados os valores da temperatura no ponto A da seção transversal do pilar (Fig. 2). Serão analisados os campos de temperatura utilizando os valores das propriedades térmicas do concreto variando com a temperatura e valores simplificados sugeridos em normas.

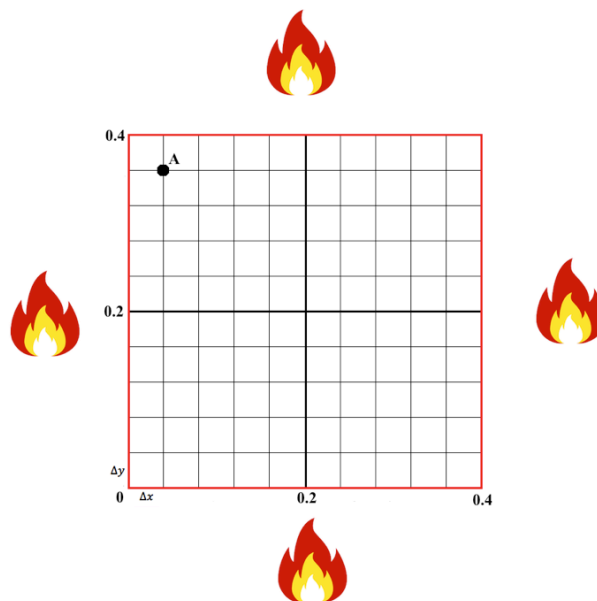


Figura 2. Incêndio padrão ISO 834 nas superfícies de um pilar central.

Na Tabela 2, são apresentados alguns valores de temperatura coletados no ponto A para os dois casos analisados. Na Fig. 3 pode-se comparar graficamente o comportamento das curvas em ambos os casos.

Tabela 2. Valores simplificados sugeridos por normas.

Tempo (min.)	Propriedades térmicas constantes (°C)	Propriedades térmicas variáveis (°C)	Diferença percentual relativa (%)
0.0	20.00	20.00	0.0%
0.5	24.75	24.25	2.1%
1.0	26.49	25.32	4.6%
2.5	28.99	26.52	9.3%
5.0	30.97	27.25	13.7%
10	32.98	27.86	18.4%
20	35.01	28.39	23.3%
30	36.20	28.69	26.2%
40	37.05	28.91	28.2
50	37.71	29.09	29.6%
60	38,24	29,24	30,8%

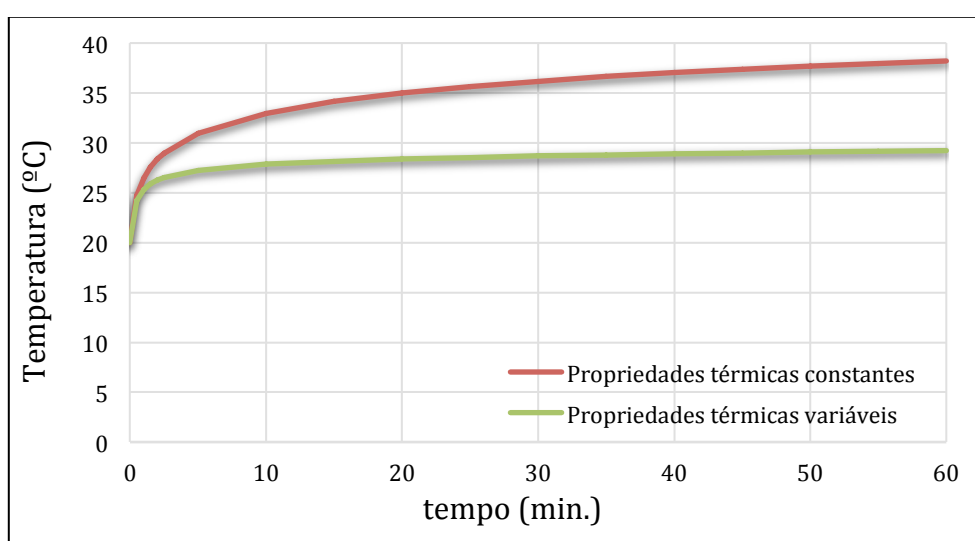


Figura 3. Comparação entre curvas temperatura x tempo para as propriedades térmicas do concreto constantes e variáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que os valores de temperatura obtidos variam com o passar do tempo. Inicialmente, nos 30 segundos iniciais de incêndio, a diferença entre os valores de temperatura apresenta uma diferença relativa de 2.1% em relação aos valores das propriedades térmicas variando com a temperatura. Essa diferença aumenta ainda mais com o passar o tempo, chegando em 30.8% para um incêndio com duração de uma hora.

Faz-se necessário análises em pilares com outras dimensões e outras durações para o incêndio, afim de se obter uma convergência dos resultados. Porém, com os resultados já obtidos, aconselha-se que sejam utilizados os valores das propriedades obtidos por meio das equações encontradas nas normas, uma vez que estes se aproximam mais do comportamento real.

Agradecimentos

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio dado a esta pesquisa e ao LCCV – Laboratório de Computação Científica e Visualização da UFAL, pela disponibilidade do espaço para estudo e edição deste texto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, C. N.; ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Dimensionamento de Elementos de Concreto Armado em Situação de Incêndio, 2008. 724p, il. Tese (Doutorado).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Brussels: CEN, 2005.

HOFFMAN, Joe. D. Numerical Methods for Engineers and Scientists. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2001. 838p, il.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO834**: Fire Resistance Testes: Elements of Building Construction: Part 1. General Requirements. Geneva, 1975.

SILVA, Valdir Pignatta. Estruturas de Aço em Situação de Incêndio. 1. ed. São Paulo: Editora Zigate, 2004. 237p, il.