

ESTUDO DA CAPACIDADE PORTANTE DE VIGAS METÁLICAS ISOLADAS A ALTAS TEMPERATURAS GERADAS POR INCÊNDIO

Luiz Pinheiro da Guia

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Estruturas, Belo Horizonte, MG.

E-mail: guia@dees.ufmg.br

Nelson Szilard Galgoul

Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Niterói, RJ, Brasil. E-mail: guia@civil.uff.br

Resumo

As principais vantagens de se construir utilizando o aço são a rapidez da obra, estruturas mais leves etc. Comparado com outros materiais utilizados na construção, o aço tem um alto coeficiente de condutibilidade térmica, ocasionando perda de resistência e rigidez da estrutura como um todo quando submetido a altas temperaturas. Esta é uma grande desvantagem na hora de se fazer a escolha do aço como material que será empregado na construção. Na maioria dos países que utilizam aço em suas construções essa desvantagem é compensada por técnicas construtivas avançadas, intensa pesquisa e grande investimento em sistemas de proteção, feito pelas empresas da construção civil e siderúrgicas. No Brasil, esta tecnologia tem sido importada, sendo aos poucos nacionalizada.

Palavras-chave: Estrutura metálica, incêndio, temperatura, viga e aço.

1. INTRODUÇÃO

O incêndio de um edifício pode ser entendido como a combustão descontrolada dos materiais que o constituem e daqueles contidos em seu interior atingindo e pondo em risco vidas e bens.

Para a elaboração do projeto de um edifício seguro, o incêndio deve ser encarado como um fenômeno passível de ocorrer durante a vida útil do mesmo. Sendo assim, a quantificação das solicitações atuantes durante o incêndio, bem como sua consideração na elaboração do projeto, devem ser tratadas com a mesma preocupação relativa ao dimensionamento de uma forma em geral.

A fim de solucionar esta questão e muitas outras, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) instalou oficialmente, em 21 de junho de 1996, a Comissão de Estudo CB-24:301.06 (Proteção contra incêndios de estruturas) que começou a elaborar uma Norma Regulamentadora sob aspecto da proteção contra a ação do fogo de estruturas de edifícios em geral.

A expectativa em torno da norma em elaboração é no sentido de que esta venha coibir os abusos de segurança dos Corpos de Bombeiros estaduais, decorrentes de sua ignorância em relação à real capacidade de resistência de uma estrutura metálica submetida a altas temperaturas, ao mesmo tempo em que proverá metodologia prática permitindo que a resistência supra citada passe a ser demonstrada a nível de projeto.

2. PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO

As propriedades do aço de interesse ao problema são: o limite de escoamento, a resistência última, a tração módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, a densidade, o calor específico e a condutividade térmica. Com exceção da densidade, todas as outras propriedades são influenciadas pela temperatura. Incêndios afetam estruturas de aço de duas formas básicas: modificando as propriedades termo - físicas do aço, geralmente degenerando grandezas associadas à resistência mecânica; gerando novos esforços, decorrentes da característica que a maioria dos materiais apresenta, de dilatarem-se à medida que sua temperatura aumenta. As expressões matemáticas descritas por Boring, 1979, para relacionar o limite de escoamento, módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica com a temperatura, são as seguintes:

Limite de escoamento - A equação (1) apresenta a variação da tensão de escoamento (f_y) com a temperatura para o aço USI-FIRE-490, um aço resistente ao fogo fabricado pela USIMINAS. O limite de escoamento é um parâmetro utilizado, muitas vezes, em projeto, para determinar a resistência do material.

$$f_y = f_{y,0} (1 - 0,78\theta - 1,89\theta^4) \text{ para } \theta < 0,63 \quad (1)$$

Onde:

f_y = Tensão de escoamento à temperatura de trabalho, em MPa;

$f_{y,0}$ = Tensão de escoamento à temperatura de 20 °C, em MPa;

θ = Temperatura do material, em °C dada por:

$$\theta = \frac{T - 20}{1000} \quad (2)$$

Onde:

T = Temperatura do aço, em °C.

Módulo de elasticidade - A equação (3) apresenta a variação do módulo de elasticidade (E) com a temperatura, do aço USI-FIRE-490. A deterioração de E com o aumento de temperatura significa que, para um mesmo esforço aplicado, ocorrerão maiores deformações / deslocamentos no elemento para temperaturas mais elevadas.

$$E = E_0 (1 - 2,04\theta^2) \text{ para } \theta < 0,63 \quad (3)$$

Onde;

E = Tensão de escoamento à temperatura de trabalho, em MPa;

E_0 = Tensão de escoamento à temperatura de 20 °C, em MPa;

θ = Temperatura do material, em °C dada por;

$$\theta = \frac{T - 20}{1000} \text{ para } \theta < 0,63 \quad (4)$$

3. O MODELO

Considera-se que o incêndio tem início em um ponto no interior do compartimento, liberando para o meio energia e gases provenientes da combustão. São feitas as seguintes suposições para simplificar o modelo: 1.a combustão é completa e se processa totalmente dentro do compartimento; 2.a temperatura é uniforme dentro do compartimento, e não há variação em qualquer direção; 3.o coeficiente de transferência de calor por condução é único para piso, parede e teto; 4.o fluxo de calor através do contorno do compartimento é unidimensional, a influência dos cantos é ignorada; 5.a fonte de calor é constante. A temperatura resultante do compartimento será resolvida através da solução do balanço de energia, conforme a Figura 1:

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (5)$$

Onde:

\dot{q}_C = Taxa de calor produzida devido à combustão;

\dot{q}_L = Taxa de calor perdida devido à troca entre os gases quentes e o meio externo;

\dot{q}_W = Taxa de calor perdida através de parede, piso e teto;

\dot{q}_R = Taxa de calor perdida por radiação através de aberturas;

\dot{q}_B = Taxa de calor armazenada no volume do gás (ignorada).

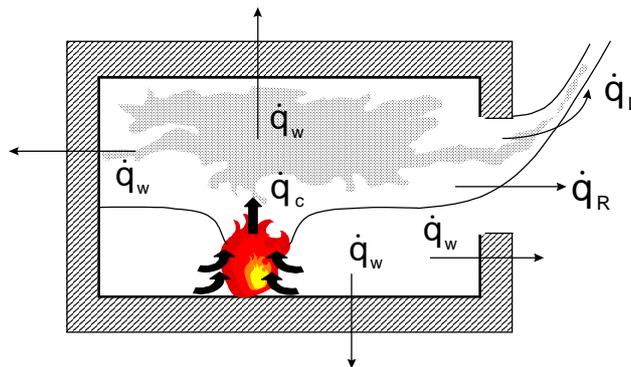


Figura 1 - Modelo de compartimento com perdas de energia

A descrição dos termos da equação (5) são os seguintes:

\dot{q}_C - O calor gerado devido à combustão dos materiais no interior do compartimento será aqui admitido como constante, desde $t = 0$ até que o combustível tenha sido consumido. Peterson et al, 1976, adota o critério da ventilação controlada. Assim, a relação de Kawagoe, 1958, pode ser utilizada, ou seja, a taxa de queima está associada ao fator de abertura:

$$\dot{m} = 5,5A_w \sqrt{H} \quad (6)$$

Onde:

H = Altura da abertura

No entanto, os incêndios podem ocorrer sob o controle do combustível. Desta forma pode-se estar superestimando a taxa de queima. Nas pesquisas desenvolvidas por Thomas e Heselden, 1972, eles revelaram que esta relação é válida apenas para uma faixa restrita do fator de abertura. A interpretação convencional admite que dentro desta faixa a taxa de queima é controlada pela ventilação através de uma taxa de ar que flui para dentro do compartimento; daí a expressão “ventilação controlada”. Aqui serão adotadas como combustível as pilhas de madeira com a seguinte expressão para a taxa de queima:

$$\dot{m} = 0,12A_w \sqrt{H} \quad (7)$$

A expressão para o calor gerado devido à combustão é a seguinte:

$$\dot{q}_c = 0,12A_w \sqrt{H} \Delta H_c \quad (8)$$

Onde:

$$\Delta H_c = \text{Calor de combustão do combustível}$$

Nesta pesquisa esta-se considerando a combustão de materiais celulósicos mais precisamente a madeira, assim, o calor de combustão da madeira comum é 12.000 kJ/kg.

\dot{q}_R - A expressão para o calor perdido por radiação através das aberturas é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann;

$$\dot{q}_R = A_w \varepsilon_F \sigma (T_g^4 - T_0^4) \quad (9)$$

Onde:

$$\dot{q}_R = \text{Calor perdido por radiação (kW);}$$

$$A_w = \text{Área total da aberturas (portas e janelas)(m}^2\text{);}$$

$$T_g = \text{Temperatura do gás dentro do compartimento (}^\circ\text{K);}$$

$$T_0 = \text{Temperatura do meio ambiente (externa ao compartimento) (}^\circ\text{K);}$$

$$\sigma = \text{Constante de Boltzmann;}$$

$$\varepsilon_F = \text{Emissividade dos gases dentro do compartimento.}$$

A emissividade resultante, pode ser calculada como:

$$\varepsilon_F = 1 - \exp(-Kx_F) \quad (10)$$

Onde:

$$x_F = \text{Altura da chama (m);}$$

$$K = \text{Coeficiente de emissão (m}^{-1}\text{).}$$

O coeficiente de emissão é obtido conforme a Tabela 1 para vários tipos de madeira. Petterson et al, 1976, utilizam o valor de 1,1 m⁻¹ para o coeficiente de emissão. Este coeficiente é um valor empírico e deve ser utilizado com critério.

Tabela 1 - Coeficiente de emissão K
(An Introduction to Fire Dynamics, 1986, p. 75)

| Material | K (m ⁻¹) | Pesquisador |
|--------------|----------------------|--------------------------|
| Poliestireno | 1,2 | Yuen e Tien, 1977 |
| Madeira | 0,8 | Hägglund e Persson, 1976 |
| Madeira | 1,1 | Petterson et all, 1976 |

Não se dispõe de informação de ensaios para que se possa explicitar valores da altura da chama, mas, observando a Tabela 2. que de acordo com o fator de abertura pode-se calcular a altura da chama adotando o procedimento de Hasemi e Tokunaga, 1984 modificado.

Tabela 2 - Valores da emissividade

| Fator de ventilação (m ^{1/2}) | Altura da chama, x_F (m) | Emissividade, ϵ_F |
|---|----------------------------|----------------------------|
| 0,03 | 0,17 | 0,1706 |
| 0,05 | 0,20 | 0,1975 |
| 0,06 | 0,24 | 0,2320 |

Como $T_g \gg T_0$ a equação (9) pode ser rescrita como:

$$\dot{q}_R = A_w \epsilon_F \sigma T_g^4 \quad (11)$$

\dot{q}_L - A perda de calor por convecção é dada segundo a expressão:

$$\dot{q}_L = \dot{m}_F c_p (T_g - T_0) \quad (12)$$

Onde:

\dot{m}_F = Taxa de gases que saem para o meio externo;

c_p = Calor específico a pressão constante do ar.

Ignorando a volatilização de combustível, pode-se assumir que $\dot{m}_F \approx \dot{m}_{air}$. Desta forma, de acordo com Brabrauskas e Williamson, 1978, e Prahl e Emmons, 1975 a \dot{m}_{air} pode ser aproximada para:

$$\dot{m}_{air} = 0,52 A_w \sqrt{H} \quad (13)$$

Onde:

\dot{m}_{air} = Taxa de ar que entra no compartimento.

Assim a equação (12) torna-se:

$$\dot{q}_L = 0,52 c_p (T_g - T_0) A_w \sqrt{H} \quad (14)$$

\dot{q}_w - Taxa de calor perdida através de paredes, teto e piso, depende da temperatura do gás dentro do compartimento, da temperatura da superfície interna e da temperatura do meio externo. Neste caso a transferência de calor é predominantemente por condução e precisa ser resolvida numericamente. As paredes, laje e piso são divididos em n camadas, sendo cada uma com espessura Δx , conforme a Figura 2 (através de paredes, piso ou laje).

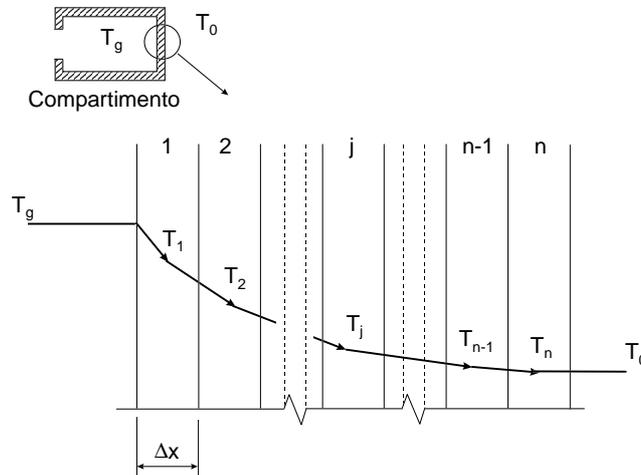


Figura 2 - Condução de calor em regime transiente

(An Introduction to Fire Dynamics, 1986 p. 302)

Uma série de equações podem ser escritas para representar cada camada de acordo com o método das diferenças finitas. As equações de diferença finita são resolvidas numericamente para cada passo de tempo, e correspondentes valores de \dot{q}_w são calculados da equação (15).

$$\dot{q}_w = \frac{(A_t - A_w)(T_g - T_i)}{\left(\frac{1}{\gamma_i} + \frac{\Delta x}{2k_1}\right)} \quad (15)$$

Onde:

A_t = Área total do compartimento (incluindo área das aberturas).

Agora que os termos do balanço de energia foram identificados pode-se substituir cada parcela na equação (5) e, desta forma, calcular a temperatura do incêndio em função do tempo. A perfeita escolha dos intervalos de tempo deverá estar de acordo com o critério de transferência de calor unidimensional por condução. Uma vez que os incrementos espaciais (Δx). A equação (17) mostra que o fator M nada mais é do que o inverso do módulo de Fourier.

$$M = \frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} \quad (16)$$

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (17)$$

O módulo de Fourier compara uma dimensão característica do corpo com a profundidade de penetração dos efeitos térmicos para um dado intervalo de tempo. O incremento de tempo é determinado, e este valor não pode ser alterado sem que seja mudado o valor de Δx ou M . De acordo com Holman, 1983, o fator M para condução unidimensional deve ser maior que 2, caso contrário será gerada uma condição que viola a segunda lei da termodinâmica.

4. CÁLCULO DA TEMPERATURA NO COMPARTIMENTO - TIJOLO

Devido à escassez de informações provenientes de ensaios realizados no Brasil, serão adotados três níveis de taxa de calor. A fim de modelar a composição de paredes tetos e pisos será adotado um tipo de material, tijolo refratário. Apesar de não representar adequadamente o compartimento, os cálculos realizados fornecerão os resultados para que se possa analisar o comportamento do elemento estrutural. O programa recebeu a denominação de CTCPC(Cálculo da temperatura de compartimento para PC's) e foi escrito na linguagem FORTRAN. O compartimento é admitido como composto de tijolo de construção comum de espessura 20 cm, com área interna medindo $45,72 \text{ m}^2$ e área total das aberturas de $1,08 \text{ m}^2$ com temperatura inicial do gás no interior do compartimento de $26 \text{ }^\circ\text{C}$ as taxas de calor admitidas foram as seguintes: árvores de Natal secas com 7 kg - 650 kW; televisores de 40 kg - 290 kW; caixas descartáveis de polietileno - 13 kW. Conforme mostrado na figura Figura 3.

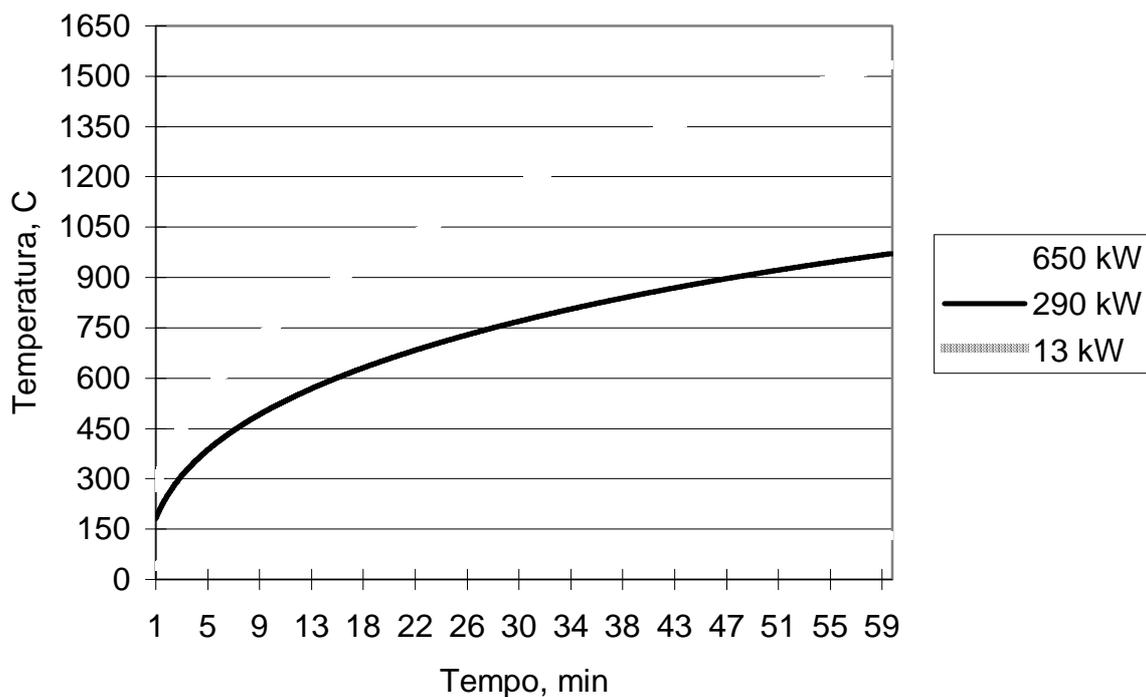


Figura 3 - Comparação dos três exemplos com tijolo comum

Através dos resultados obtidos do programa, pode-se avaliar os níveis de resistência de uma viga quando submetida a estes níveis de temperatura.

4.1. ESTUDO DOS CASOS

Para o primeiro caso será utilizada a formulação sugerida no item 3 para calcular a temperatura do elemento estrutural supondo que este possui a mesma temperatura do gás no

interior do compartimento, combinada com a formulação de Boring para relacionar o limite de escoamento e o módulo de elasticidade com a temperatura,

No segundo caso, será utilizada a curva tempo-temperatura da NBR 5628 para se obter a temperatura desejada, calculando em seguida, com a formulação de Malhotra, a temperatura do elemento estrutural. Finalmente, será utilizada a formulação de Boring para relacionar o limite de escoamento e o módulo de elasticidade com a temperatura,

No terceiro caso, será utilizada a formulação sugerida no item 3 para calcular a temperatura do gás no interior do compartimento. Em seguida, com a formulação de Malhotra, será calculada a temperatura do elemento estrutural. Finalmente, utilizando a formulação de Boring, será feito relacionamento do limite de escoamento e do módulo de elasticidade com a temperatura.

A avaliação será feita por meio de uma viga sujeita a uma carga permanente de 50 kN e uma carga acidental de 170 kN, de aço ASTM A-36, módulo de elasticidade de 201000 MPa e limite de escoamento de 250 MPa, conforme mostramos nas Figura 4 e Figura 5.

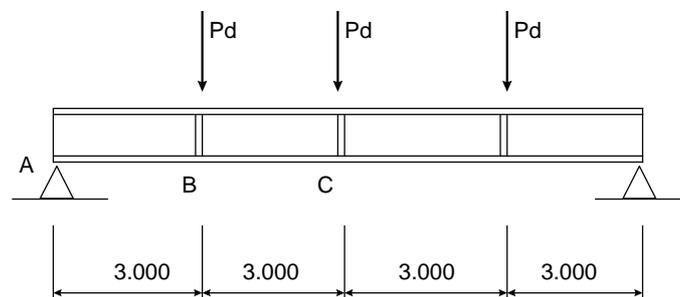


Figura 4 - Viga bi-apoiada

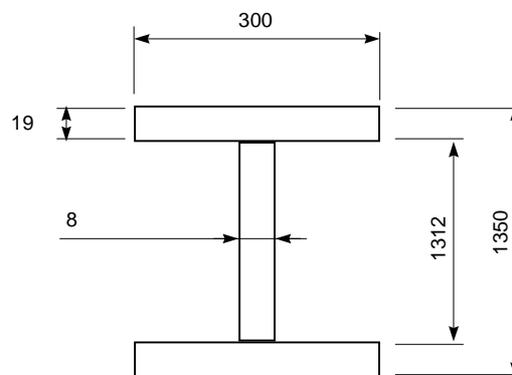


Figura 5 - Detalhe da viga

CASO 1 - A temperatura escolhida foi de 554 °C, conforme a Figura 3, o que fornece, com as equações (1) a (3), o módulo de elasticidade de 85.423,12 MPa e o limite de escoamento de 106,24 MPa. Ocorre a diminuição das propriedades mecânicas do aço, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Diminuição das propriedades mecânicas

| Propriedades à temperatura ambiente, Mpa | | Propriedades à temperatura de 274 °C, MPa | | Percentual de redução | |
|--|--------|---|--------|-----------------------|--------|
| f_y | E, | f_y | E, | f_y | E, |
| 250 | 201000 | 106 | 85.423 | 57,60% | 57,50% |

De acordo com o procedimento adotado pela NBR 8800, o elemento suporta o carregamento a temperatura ambiente, mas quando se calcula o mesmo elemento submetido a nova temperatura, observa-se que ocorre falha por flambagem lateral com torção. Há uma diminuição significativa dos níveis de resistência, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência de cálculo

| Resistência de cálculo, kN.cm | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura ambiente | Temperatura de 554 °C | Percentual de redução |
| 235.865,35 | 95.133,92 | 59,66% |

CASO 2 - O tempo do caso 1 foi de 300 segundos, assim, a temperatura, conforme a NBR 5628, é de 607 °C, o que nos fornece, com as equações (1) a (3), o módulo de elasticidade de 62804,75 MPa e o limite de escoamento de 78,11 MPa. Ocorre a diminuição das propriedades mecânicas do aço, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Diminuição das propriedades mecânicas

| Propriedades à temperatura ambiente, MPa | | Propriedades à temperatura de 607 °C, MPa | | Percentual de redução | |
|--|--------|---|-------|-----------------------|--------|
| f_y | E, | f_y | E, | f_y | E, |
| 250 | 201000 | 78 | 62804 | 68,80% | 68,75% |

De acordo com o procedimento adotado pela NBR 8800, o elemento suporta o carregamento a temperatura ambiente, mas quando se calcula o mesmo elemento submetido a nova temperatura, observa-se que ocorre falha por flambagem lateral com torção. Há uma diminuição significativa dos níveis de resistência, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência de cálculo

| Resistência de cálculo, kN.cm | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura ambiente | Temperatura de 607 °C | Percentual de redução |
| 235.865,35 | 70006,65 | 70,31% |

CASO 3 - A temperatura calculada do elemento estrutural foi de 344 °C. Em seguida, será utilizada as equações (1) a (3), o módulo de elasticidade de 145.430,791 MPa e o limite de

escoamento de 180,88 MPa. Ocorre a diminuição das propriedades mecânicas do aço, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Diminuição das propriedades mecânicas

| Propriedades à temperatura ambiente, Mpa | | Propriedades à temperatura de 344 °C, segundo Malhotra, MPa | | Percentual de redução | |
|--|--------|---|---------|-----------------------|--------|
| f_y | E, | f_y | E, | f_y | E, |
| 250 | 201000 | 180 | 145.430 | 28,00% | 27,64% |

De acordo com o procedimento adotado pela NBR 8800, o elemento suporta o carregamento a temperatura ambiente, mas quando se calcula o mesmo elemento submetido a nova temperatura, observa-se que ocorre falha por flambagem lateral com torção. Há uma diminuição significativa dos níveis de resistência, conforme mostra na tabela 8.

Tabela 8 - Resistência de cálculo

| Resistência de cálculo, kN.cm | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura ambiente | Temperatura de 344 °C | Percentual de redução |
| 235.865,35 | 161.536,51 | 31,51% |

Nos três casos calculados observa-se que ocorreu flambagem lateral por torção, o que evidencia a perda da resistência na viga estudada.

Tabela 9 - Comparação em os três casos

| Resistência de cálculo, kN.cm | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura Ambiente | caso 1 | caso 2 | caso 3 |
| | Temperatura de 554 °C | Temperatura de 607 °C | Temperatura de 344 °C |
| 235.865,35 | 95.133,92 | 70006,65 | 161.536,51 |

5. CONCLUSÕES

1°. Por ser a carga de incêndio uma característica do tipo de ocupação do edifício, são frequentes os trabalhos de outros países associadas a esse tipo de ocupação ou atividade a faixas de carga de incêndio, obtidas através de levantamentos realizados em vários edifícios. No Brasil tal informação não existe, e deve vir a ser objeto de pesquisa.

2°. A queima de materiais celulósicos é realizada de forma complexa, pois é uma mistura de polímeros naturais de alto peso molecular, o mais importante é a celulose \cong 50%, hemicelulose \cong 25% e lignina \cong 25%, Modorsk, 1964, daí a importância de um estudo criterioso sobre a taxa de queima de objetos que envolvam a madeira como base principal e além disto o estudo deve levar em consideração a conjugação da madeira com outros materiais onde a taxa de queima não é conhecida no Brasil.

4°. A representação das ligações estruturais é outro assunto de grande relevância para se colocar em pauta nesta discussão. Conexões viga-coluna reais mostraram sofrer significativa influência nos períodos de resistência a incêndio. As ligações metálicas sofrem deformações consideráveis a elevadas temperaturas, embora mantenham significativa resistência (Planck, 1996). Diante disto, serão necessárias investigações experimentais para avaliar o comportamento de ligações metálicas.

6. REFERÊNCIAS

- ABCEM-ABIPE, **Revista Aço na Construção**, número 3, janeiro, (1989).
- DRYSDALE, D., **An Introduction to Fire Dynamics**, John Wiley & Sons Inc, Chichester, (1985).
- HOLMAN, J.P., **Heat Transfer**, McGraw-Hill, Inc., New York, (1983).
- HOLMAN, J.P., **Thermodynamics**, McGraw-Hill, Inc. , New York, (1980).
- IISI - **Fire Engineering Design for Steel Structures** - International Iron and Steel Institute, (1993).
- KAWAGOE, K., SEKINE, T., **Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms**, B.R.I. Occasional Report n °. 11, Building Research Institute, Ministry Of Construction, Tóquio, (1963).
- LIE, T.T., HARMANTY, **Fire Study n °. 28**, National Research Council of Canada, Ottawa, (1972).
- LIE, T.T., STANZAK, W.W., **Eng. J. Amer.**, Inst. Steel Const., 3rd Qtr., (1973).
- MALHOTRA, H. L., **Design of Fire-Resisting Structures**, Chapman and Hall, (1982).
- NBR 5628, **Componentes Construtivos Estruturais Determinação da Resistência ao Fogo**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1980).
- NBR 8800, **Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1986).
- PETERSSON, O., MAGNESSON, S., THOR, J., **Bulletin 52**, Lund Institute of Technology, Lund, (1976).
- SFPE - **Handbook Fire Protection Engineering**, Society of Fire Protection Engineers, (1988).
- SSRC - **Stability Problems in Designing, Construction and Rehabilitation of Metal Structures** - 5th International Colloquium on Structural Stability, COPPE/UFRJ, (1996).
- THOMAS. P. H. , **The Size of Flames from Natural Fires**, 9 th Int. Combustion Symposium, (1983).
- VAN Wylen, Gordon John, **Fundamentals of Classical Thermodynamics**, John Wiley & Sons Inc, Chichester, (1976).
- VINNAKOTA, S., **Calculation of the Fire Resistance of Structural Steel Members**, ASCE Spring Meeting, (1978).