

# **ANÁLISE DE LAJES MACIÇAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELO MÉTODO TABULAR DA NBR 15200:2012 E PELO MÉTODO DE HERTZ**

Rodrigo Gustavo Delalibera (Professor Doutor e Universidade Federal de Uberlândia) E-mail:delalibera@ufu.br  
Salatiel Leonardo Rasia da Silva (Engenheiro Civil)

Salatiel Leonardo Rasia da Silva (Mestrando em Engenharia Civil e Universidade Federal de Uberlândia  
(Professor Doutor e Universidade Federal de Uberlândia)

Antônio de Paulo Peruzzi (Professor Doutor e Universidade Federal de Uberlândia)

**Resumo:** Neste trabalho apresenta-se uma análise de lajes maciças de concreto armado em situação de incêndio, utilizando o método tabular da ABNT NBR 15200:2012 e o método de Hertz. Foram discutidos os conceitos principais necessários à compreensão do tema, como os conceitos de incêndio-padrão e tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Também foram abordadas as propriedades do concreto e do aço em situação de incêndio. Baseando-se nesses conceitos foi feito um exemplo de aplicação, dimensionando-se uma laje maciça de concreto armado, por meio dos métodos supracitados.

**Palavras-chave:** Análise de estruturas. Concreto armado. Incêndio.

## **ANALYSIS OF SLABS UNDER FIRE CONDITIONS BY ABNT NBR 15200: 2012 TABULAR METHOD AND THE HERTZ METHOD**

**Abstract:** An analysis of slabs of reinforced concrete under fire conditions using the ABNT NBR 15200: 2012 tabular method and the Hertz method was presented. The key concepts those was required to understand the topic are studied, such as standard fire and time required to fire resistance (TRRF). Also, the concrete and steel properties under fire conditions are examined. Based on those concepts, an application pattern was developed, designing a solid slab of reinforced concrete through the aforementioned methods.

**Keywords:** Analysis of structures. Reinforced concrete. Fire.

### **1. INTRODUÇÃO**

No Brasil, a norma técnica que apresenta critérios para o dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio é a ABNT NBR 15200:2012, que possui como objetivos gerais limitar o risco à vida humana, o risco para os edifícios limítrofes e para a sociedade e o risco da propriedade exposta ao fogo. Para alcançar esses objetivos, essa norma expõe uma série de requisitos que devem ser seguidos pelo engenheiro na elaboração do projeto estrutural para a proteção contra o fogo.

A consideração destes requisitos visa reduzir o risco de incêndio, controlar o fogo nos estágios iniciais, limitar a área exposta ao fogo (compartimentando-a), criar rotas de fuga, facilitar as operações de combate ao incêndio e evitar a ruína prematura da estrutura.

No caso das estruturas de concreto armado, deve-se garantir que ela mantenha, durante certo tempo, as funções corta-fogo e de suporte. Assim garante-se que a estrutura mantenha a sua capacidade de suporte como um todo ou de cada uma de suas partes, evitando o colapso global ou o colapso local progressivo. Ou ainda, garante-se que o fogo não ultrapasse ou que o calor atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial.

Nesse trabalho, foi dado ênfase à comparação entre o dimensionamento de lajes maciças em situação de incêndio pelo método tabular da ABNT NBR 15200:2012 e pelo método de Hertz, também permitido por essa norma, mas não apresentado de forma explícita.

## 2. INCÊNDIO PADRÃO

Um dos itens básicos para a compreensão do tema é o incêndio-padrão que, segundo a ABNT NBR 14432:2001, é a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, dada pela equação [1]:

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

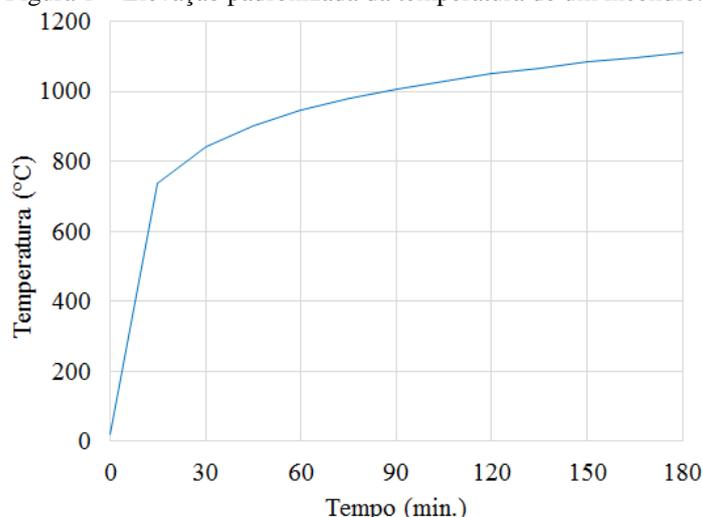
Onde:

- $t$ : é o tempo, em minutos;
- $\theta_0$ : é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C;
- $\theta_g$ : é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante  $t$ .

De acordo com Silva (2014), este modelo é simplificado, pois não fornece os valores reais da elevação da temperatura em função do tempo. Logo, trata-se de um tempo fictício, utilizado pelos laboratórios de pesquisa, para a realização de ensaios em altas temperaturas em forno, com a finalidade de pesquisar o comportamento de vigas e lajes de concreto armado em situação de incêndio.

A equação [1] é representada por meio de um gráfico, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Elevação padronizada da temperatura de um incêndio.



Fonte: SILVA, 2014

## 3. TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

A ABNT NBR 14432:2001 define, no item 3.27, o Tempo requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), como sendo o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio padrão, sendo esse tempo fictício.

A mesma norma, em seu item 3.24, define a resistência ao fogo como sendo propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período, mantendo a sua segurança estrutural, sua estanqueidade e seu isolamento térmico, onde aplicável.

O principal objetivo do isolamento térmico é evitar o início do incêndio na face oposta do elemento estrutural. Ele é obtido limitando-se a temperatura, no lado oposto à face exposta ao fogo, de incrementos de temperatura superiores a 140 °C na média dos pontos de medida ou em 180 °C, em qualquer ponto de medida, segundo as normas ABNT NBR 5628:2003 e ABNT NBR 10636:1989. Já a estanqueidade, de acordo com a mesma referência, é a capacidade de um elemento construtivo de impedir a ocorrência de rachaduras ou aberturas, com o objetivo de impedir a passagem de chamas e gases quentes.

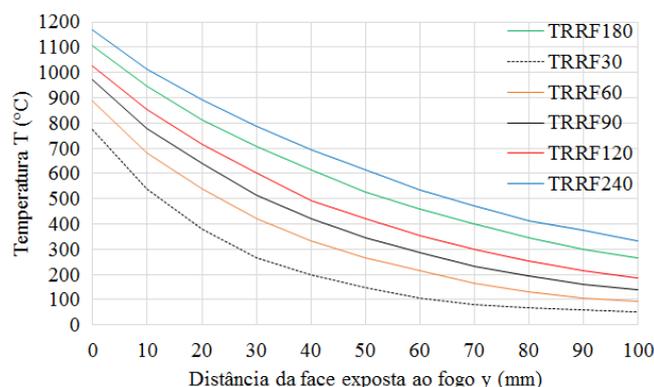
Silva (2014) cita que o TRRF é definido com base no uso da edificação e da sua altura. A Tabela A.1 do anexo A da ABNT NBR 14432:2001 fornece os TRRF para os diversos usos e alturas de edificações.

O referido autor destaca que há determinados elementos estruturais em que o TRRF é diferenciado, sendo independente do valor desse parâmetro para toda a edificação. Como exemplo, citam-se os elementos de compartição<sup>1</sup> em geral e os elementos de compartimentação de escadas e elevadores de emergência.

Por fim, Silva (2014) destaca que o TRRF, mesmo apresentando unidade de tempo, não tem relação nenhuma com a duração real do incêndio ou o tempo de desocupação da edificação. É apenas um parâmetro de projeto que, em conjunto com a curva de incêndio-padrão, diminui a probabilidade de colapso estrutural.

Por meio da Figura 2 apresenta-se um gráfico com a distribuição da temperatura em uma laje para vários TRRF.

Figura 2 – Distribuição da temperatura em uma laje



Fonte: ARAÚJO (2014)

#### 4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO EM INCÊNDIO

As propriedades mecânicas do concreto armado decrescem com o aumento da temperatura, sendo esse decréscimo função da taxa de aquecimento e do tempo em que a estrutura está exposta ao fogo (ISAIA et al., 2011).

Segundo Araújo (2014), para a maioria das análises, as propriedades mecânicas mais importantes do concreto armado, para fins de dimensionamento em situação de incêndio, são: a resistência à compressão e a tensão de escoamento da armadura passiva.

<sup>1</sup> Segundo consta na ABNT NBR 14432:2001, compartimentação é a mediada de proteção passiva (que faz parte da edificação), feita por meio de vedação fixa ou móvel, destinada a evitar ou minimizar a propagação do fogo, calor e gases, interna ou externamente à edificação, no mesmo ou para outros pavimentos e até para edificações vizinhas.

O referido autor explana que a redução na resistência à compressão do concreto em situação de incêndio é feita por meio da aplicação de um coeficiente redutor  $k_c$ , dado pela Equação [2]:

$$k_c = \frac{f_{ck,T}}{f_{ck}} \quad [2]$$

Onde:

-  $f_{ck,T}$ : é a resistência característica na temperatura T °C (grau Celsius), cuja unidade é o MPa (Mega Pascal).

-  $f_{ck}$ : é a resistência característica na temperatura de 20 °C (graus Celsius), cuja unidade é o MPa (Mega Pascal).

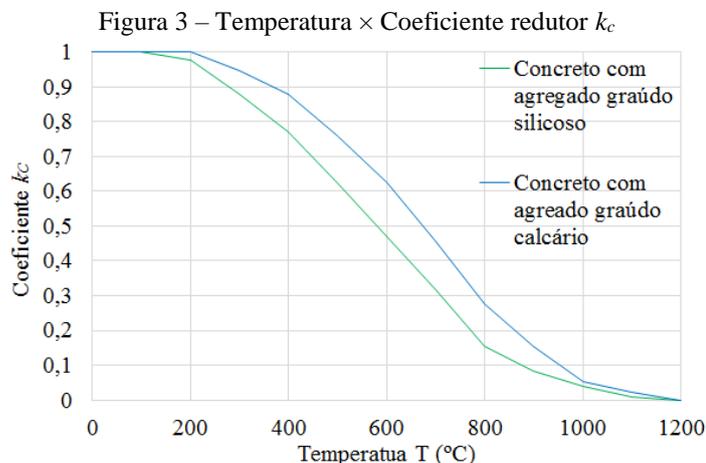
É importante destacar, também, que o comportamento do concreto depende do método de ensaio utilizado, principalmente em relação ao sistema de carregamento aplicado durante o aumento da temperatura.

De acordo com Abrams (1973 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014), ensaios com corpos-de-prova de concreto mostraram que, para a faixa de resistência à compressão entre 23 e 45 MPa, a resistência original do concreto teve pouca influência sobre o percentual da resistência à compressão residual (após a exposição ao fogo). Contudo, observou-se que o módulo de elasticidade do concreto decrescia rápido com o aumento da temperatura, quando comparado com a resistência à compressão. Isso ocorre devido à microfissuração na zona de transição, que tem um efeito mais danoso sobre o módulo de elasticidade.

No que se refere ao aço, em princípio ele estaria protegido pelo concreto no seu entorno. Mas, dependendo da existência de pequeno cobrimento das armaduras, da ocorrência de deslocamento explosivo, (chamado de *spalling*<sup>2</sup>) e do tempo de exposição ao fogo, o aço também apresenta alterações em suas propriedades mecânicas (ISAIA *et al.*, 2011).

Abrams (1973 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014) cita que, assim como no caso do concreto, essas propriedades, para o aço, decrescem com o aumento da temperatura, também sendo função da taxa de aquecimento e do tempo em que a estrutura está exposta ao fogo.

Na ilustração da Figura 3 apresenta-se um gráfico com as variações do coeficiente  $k_c$ .



Fonte: ABNT NBR 15200:2012

<sup>2</sup>Tendência das camadas externas da peça de concreto, que estão mais quentes, de se separarem por deslocamento das camadas mais frias do interior da peça.

BRITZ (2011 *apud* ISAIA et al., 2011) enfatiza que não há nenhuma norma que descreva o comportamento do agregado basalto, muito utilizado em nosso país. Por isso, o gráfico da Figura 3 deverá ser utilizado com precaução, pois são apresentados resultados apenas para agregados do tipo calcário e silicoso.

Em relação ao aço, Araújo (2014) afirma que o coeficiente de redução da sua tensão de escoamento,  $k_{s,\theta}$ , é expresso pela Equação [3]:

$$k_c = \frac{f_{yk,T}}{f_{yk}} \tag{3}$$

Onde:

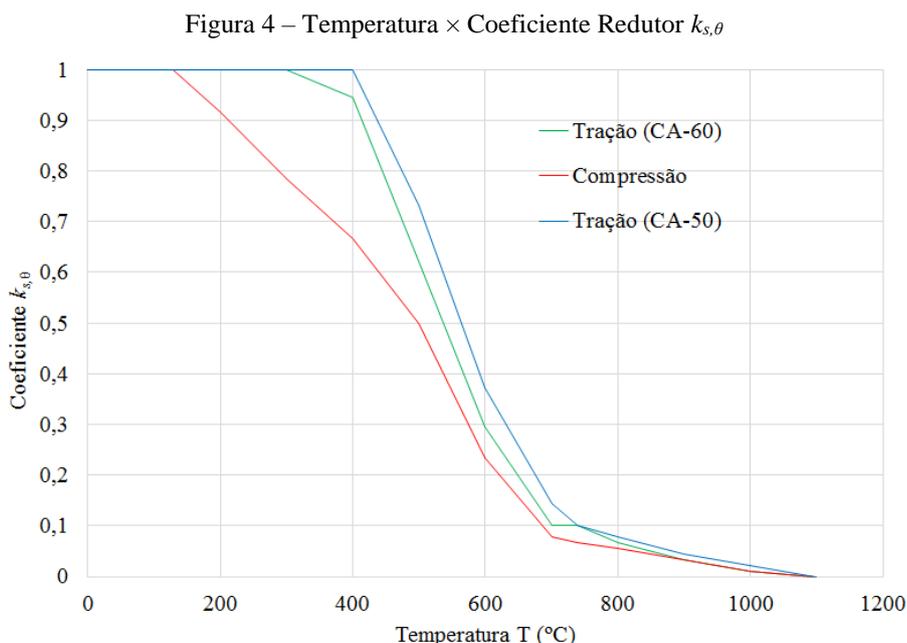
-  $f_{yk,T}$ : é a resistência ao escoamento característica na temperatura T °C (grau Celsius), cuja unidade é o MPa (Mega Pascal).

-  $f_{yk}$ : é a resistência ao escoamento característica na temperatura de 20 °C (grau Celsius), cuja unidade é o MPa.

A redução das propriedades mecânicas residuais do aço é maior quanto maior for o diâmetro da barra de aço e maior ainda se o tipo de resfriamento do material for “ao ar livre”, sem o uso dos jatos de água geralmente usados pelo Corpo de Bombeiros (CABRITA NEVES, RODRIGUES, LOUREIRO, 1996; HOLMES *et al.*, 1992 *apud* ISAIA et al., 2011).

Já Costa, Figueiredo e Silva (2002 *apud* ISAIA et al., 2011) citam que, em situação de incêndio, o fogo geralmente não atinge a temperatura de 1550 °C, que é a temperatura de fusão do aço. Sua densidade, que em condições normais é de 7850 kg/m<sup>3</sup> (quilos por metro cúbico), não é afetada pelas altas temperaturas, mantendo-se nesse valor.

Na Figura 4 é ilustrado um gráfico com as variações de  $k_{s,\theta}$ , de acordo com a ABNT NBR 15200:2012.



Fonte: ABNT NBR 15200:2012

## 5. MÉTODO TABULAR

Pelo método tabular da ABNT NBR 15200:2012, é suficiente que a peça de concreto atenda a dimensões mínimas, em função do tipo de elemento estrutural e do TRRF. Essas dimensões, que também devem respeitar os valores mínimos especificados pela ABNT NBR 6118:2014, são necessárias para que a estrutura atenda uma das suas funções estruturais em caso de incêndio, que é a função corta-fogo. Para atender a função de suporte às solicitações de cálculo no caso de fogo, o método tabular especifica valores mínimos para a distância entre o centro geométrico da armadura até a face da peça exposta ao fogo.

No referido método é considerada somente a armadura de flexão, pois os ensaios demonstram que as peças sob a ação do fogo apresentam ruptura, geralmente, por ação de momento fletor e força normal e não por força cortante.

No caso de lajes maciças convencionais, a ABNT NBR 15200:2012 permite considerar o revestimento no cálculo das distâncias de “ $c_1$ ”, com a prescrição de que se forem usados revestimentos aderentes de argamassa de cal e areia, esses terão uma eficiência de 67 % em relação ao concreto; se forem aderentes de cimento e areia, terão eficiência de 100 % em relação a esse material.

A ABNT NBR 15200:2012, que explica o método tabular em seu item 8.2, é aplicável a concretos com até 50 MPa de resistência à compressão, com massa específica seca entre 2000 e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

## 6. MÉTODO DE HERTZ

Além do Método Tabular, o item 8.4 da ABNT NBR 15200:2012 permite o uso de métodos analíticos (simplificados) para o cálculo de estruturas de concreto em situação de incêndio, mas não aprofunda nos desenvolvimentos teóricos.

O objetivo desse item é apresentar os fundamentos teóricos do método de Hertz, recomendado pelo EUROCODE 2 para o dimensionamento de vigas e lajes de concreto armado submetidas à flexão simples. Esse método baseia-se na redução da área superficial da peça, pois considera que, em função do incêndio, o concreto da periferia da peça não tem utilidade, por perder a sua função estrutural, devido à queda da resistência provocada pelas altas temperaturas.

Segundo Costa e Silva (2005), o melhor modo de se evitar o colapso prematuro da estrutura é limitar a temperatura da armadura em 500 °C. Essa temperatura é função da distância das barras de aço até a face da peça exposta ao fogo e das dimensões da seção transversal do elemento de concreto.

Para as lajes simplesmente apoiadas, basta considerar a redução da resistência do aço das barras de flexão, através do coeficiente  $k_{s,\theta}$ , obtido pelo gráfico da Figura 4. Isso se deve ao fato de parte do concreto aquecido encontrar-se na região tracionada da peça, podendo-se, dessa forma, desprezar-se a resistência à tração minorada, da mesma forma que se despreza essa parcela no Estado Limite Último (ELU), para as ações normais (COSTA; SILVA, 2005).

Na verificação no ELU em situação de incêndio, não há redução na largura da laje ( $b = 100$  cm). O momento resistente da seção é, de acordo com Costa e Silva (2005), dado pela seguinte Equação [4], para momentos positivos e negativos, respectivamente.

$$M_{R,fi} = \begin{cases} A_s \cdot f_{yd,T} \cdot \left(d - \frac{0,8 \cdot x_{fi}}{2}\right) \\ A_s \cdot f_{yd} \cdot \left(d_{fi} - \frac{0,8 \cdot x_{fi}}{2}\right) \end{cases} \quad [4]$$

Onde:

- $A_s$ : área de aço calculada na temperatura ambiente, em  $\text{cm}^2/\text{m}$ .
- $f_{y,d,T} = f_{y,k,T} / \gamma_s = k_{s,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_s$ : resistência de cálculo do aço, à temperatura  $T$  °C, em MPa.
- $d$ : altura útil da seção, em metros.
- $d_{fi}$ : altura útil da seção em situação de incêndio, com a zona comprimida aquecida (COSTA, 2008).
- $x_{fi}$ : profundidade da linha neutra em situação de incêndio, em metros.

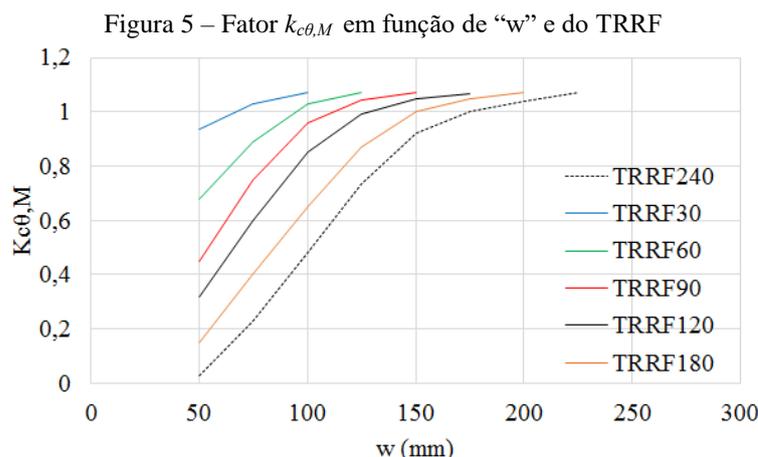
O método de Hertz é aplicável a elementos estruturais situados em ambientes secos (interiores de edifícios) e para concretos de densidade normal e com resistências usuais (COSTA; SILVA, 2005; COSTA, 2008).

A redução da seção de concreto é obtida utilizando a espessura fictícia “ $a_z$ ”, que para as lajes é função de sua espessura “ $w$ ” e do TRRF, a partir da face exposta ao fogo. A área reduzida representa a região da superfície do concreto em que se pode adotar uma temperatura uniforme, igual à temperatura do centro da seção (HERTZ, 1999 apud COSTA; SILVA, 2005; COSTA, 2008). Dessa forma, nas regiões periféricas do elemento estrutural com temperaturas maiores que a do meio da seção, a uniformização das tensões de compressão é obtida por meio da redução da espessura, aplicando-se o coeficiente “ $a_z$ ”. Isso compensa a baixa resistência do concreto nos pontos onde o valor desse parâmetro é inferior à resistência característica do concreto à compressão à temperatura elevada.

Deve-se fazer a redução da seção e, também, das propriedades mecânicas do aço e do concreto, por meio dos coeficientes  $k_{s,\theta}$ ,  $k_{sE,\theta}$  e  $k_{c,\theta}$ , em função da temperatura atuante na peça.

Convém lembrar que os coeficientes de minoração da resistência do concreto e do aço, em situação de incêndio (situação excepcional), são menores que os utilizados em situação normal de projeto.

Pelo diagrama da Figura [5], extraído do EUROCODE 2 (2004 apud Costa; Silva, 2005), obtém-se o coeficiente  $k_{c,\theta,M}$  (fator de redução da resistência do concreto), no meio da seção, função da altura “ $w$ ” da laje e do TRRF, para elementos usuais, utilizando o método de Hertz:



Fonte: EUROCODE 2 (2004 apud COSTA; SILVA, 2005)

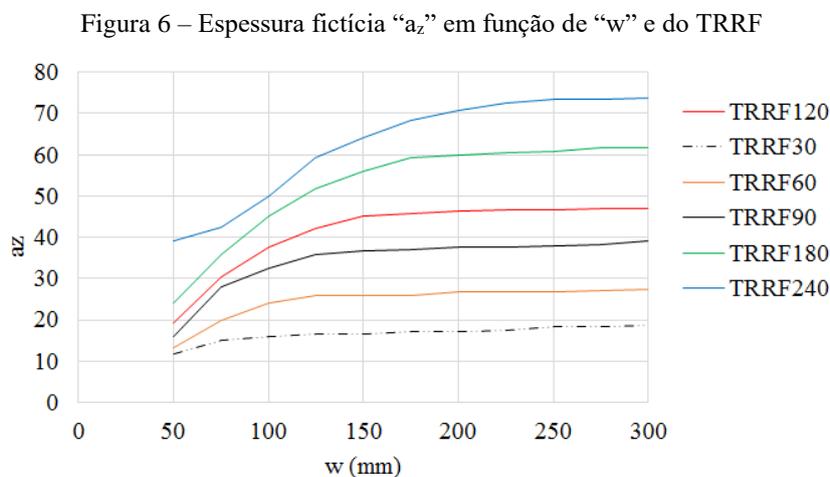
Dessa forma, a resistência à compressão do concreto no ponto médio da seção é obtida pela Equação [5]:

$$\begin{cases} f_{ck, TM} = k_{c\theta, M} \cdot f_{ck} \\ f_{cd, TM} = \frac{f_{ck, TM}}{\gamma_c} \end{cases} \quad [5]$$

Onde:

- $f_{ck, TM}$  : resistência característica do concreto à compressão, à temperatura elevada  $T_M$  (°C), no ponto médio da seção, em MPa (Mega Pascal).
- $f_{cd, TM}$  : resistência de cálculo do concreto à compressão, à temperatura elevada  $T_M$  (°C), no ponto médio da seção, em MPa (Mega Pascal).
- $k_{c\theta, M}$  : fator de redução da resistência do concreto, função da temperatura  $T_M$  (°C) no ponto médio da seção (adimensional).

Já pelo diagrama da Figura [6], também extraída do EUROCODE 2, é possível obter a espessura fictícia “ $a_z$ ”, para reduzir a seção transversal da laje, em função de sua espessura real e do TRRF:



Fonte: EUROCODE 2 (2004 apud COSTA; SILVA, 2005)

Convém lembrar que o método é válido para a elevação padronizada de temperatura em função do tempo (incêndio padrão).

Considerando o concreto solicitado no domínio 3 e assumindo o diagrama tensão-deformação retangular, a posição da linha neutra pode ser determinada aplicando a Equação [6], para momentos positivos e negativos, respectivamente:

$$x_{fi} = \begin{cases} \frac{(k_{s,\theta} \cdot f_{yd}) \cdot A_s}{0,85 \cdot b \cdot (k_{c\theta,M} \cdot f_{cd})} \\ \frac{f_{yd} \cdot A_s}{0,85 \cdot b \cdot (k_{c\theta,M} \cdot f_{cd})} \end{cases} \quad [6]$$

Onde:

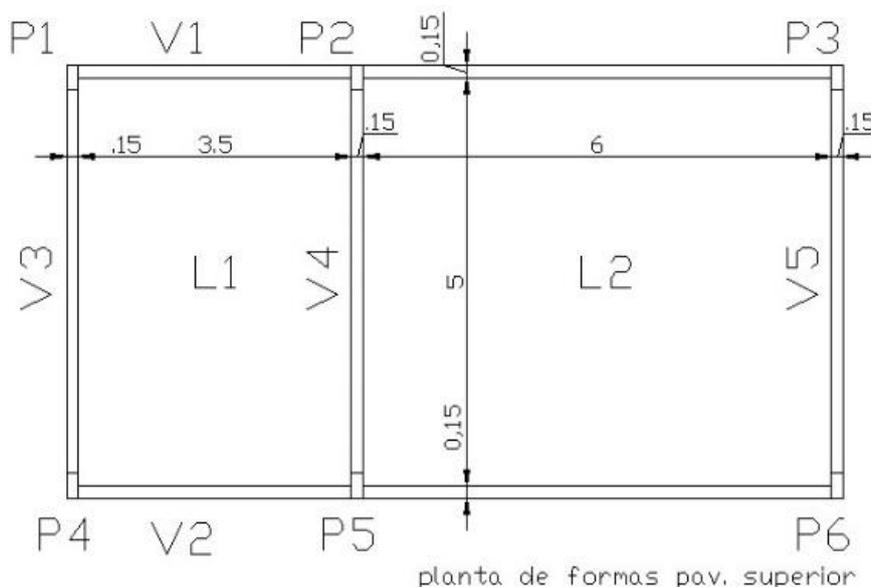
- $f_{cd, TM} = k_{c\theta, M} \cdot f_{cd}$ : resistência de cálculo do concreto à compressão, à temperatura elevada  $T_M$  (°C), em MPa (Mega Pascal).
- $k_{c\theta, M}$ : fator de redução da resistência do concreto, função da temperatura no meio da seção (adimensional).
- $k_{s, \theta}$ : fator de redução da resistência do aço, função da elevação de temperatura (adimensional).
- $A_s$ : Área de aço, em centímetros quadrados (cm<sup>2</sup>), calculada à 20 °C.

### 7. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Nesse exemplo, a edificação modelo abrigará um depósito de madeira no pavimento térreo e, no pavimento superior, estarão situadas duas salas que serão destinadas a escritórios. Cada pavimento foi considerado com pé-direito igual a três metros.

Foi feita a análise estrutural da laje L1 em situação de incêndio, admitindo as armaduras de flexão positivas e negativas calculadas pela teoria das placas, com áreas das barras de aço iguais a 1,82 cm<sup>2</sup>/m e 3,65 cm<sup>2</sup>/m. Na Figura 7 apresenta-se a laje analisada:

Figura 7 – Estrutura analisada para o dimensionamento de L1



Fonte: AUTORES (2015)

A edificação do exemplo será construída na cidade de Natal/RN. A resistência característica do concreto à compressão adotada no projeto foi igual  $f_{ck} = 30$  MPa e o aço foi o CA-50. Adotou-se uma espessura inicial de 12 cm para L1 e o valor de  $d' = 4,45$  cm ( $d'$ , é a distância do centro de gravidade da armadura tracionada até a face mais próxima da laje).

## 7.1 PELO MÉTODO TABULAR

A tabela A.1 da ABNT NBR 14432:2001 especifica o TRRF em função do uso da edificação e de sua altura. Nesse trabalho, como se trata de um depósito de madeira com altura de até seis metros, a referida norma especifica um TRRF de 60 minutos.

Portanto, de acordo com a tabela 6 da ABNT NBR 15200:2012, é necessário que a laje L1 tenha uma espessura mínima de oito centímetros, para atender a função corta-fogo. Como ela tem doze centímetros, esta função está garantida para um TRRF de 60 minutos, pelo método tabular.

A razão entre a maior e a menor dimensão para a laje L1 é  $5,15/3,65 = 1,41 \leq 1,5$ . Pela tabela 6 da referida norma, a distância mínima  $d'$  entre o centroide da armadura e a face exposta ao fogo deve ser de, pelo menos, 1 cm. O valor de  $d'$  adotado foi de 4,45 cm, bem maior que o valor de 1 cm especificado.

Conclui-se, portanto, que a função portante da laje L1 também está garantida, para o TRRF de 60 minutos, pelo método tabular.

## 7.2 PELO MÉTODO DE HERTZ

Para a aplicação do método de Hertz, a laje deve ser dividida em cinco partes iguais, a fim de obter-se as temperaturas no centro de cada uma delas, em função da distância  $y$  até a face exposta ao fogo e, com isso, obter-se os respectivos coeficientes redutores da resistência do concreto ( $k_{c\theta,i}$ ), pelas Figuras 2 e 3 (para agregado graúdo silicioso). Os valores podem ser visualizados na tabela seguinte (Tabela 1):

Tabela 1: Temperaturas e coeficientes redutores em L1

Faixa	y (m)	Temperatura (°C)	$k_{c\theta,i}$
1	12	650	0,38
2	36	375	0,78
3	60	200	0,95
4	84	110	0,98
5	108	80	1,00

Fonte: AUTORES (2015)

O fator médio de redução da resistência à compressão do concreto a ser utilizado, de acordo com Costa (2008), é obtido pela Equação [7]:

$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{n}\right)}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_{c\theta,i} \quad [7]$$

Onde:

- $n$ : número de faixas em que foi dividida a peça (tabela 1).
- $k_{c\theta,i}$ : coeficiente redutor de cada camada (tabela 1).

$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{5}\right)}{5} \cdot (0,38 + 0,78 + 0,95 + 0,98 + 1) = 0,79$$

O valor da espessura a ser desprezada pode ser obtido da Figura 6 e também da Equação [8]:

$$a_z = w \cdot \left(1 - \frac{k_{c,m}}{k_{c\theta,M}}\right) \quad [8]$$

Onde:

- $w$ : é a espessura da laje, em metros.
- $k_{c,m}$ : fator médio de redução da resistência à compressão do concreto – adimensional.
- $k_{c\theta,M}$ : fator de redução da resistência à compressão do concreto no meio da seção - adimensional.

No exemplo,  $k_{c\theta,M} = 0,95$  corresponde à faixa 3, conforme a Tabela 1. Sendo assim, de acordo com a Equação [8]:

$$a_z = 0,12 \cdot \left(1 - \frac{0,79}{0,95}\right) = 0,0202m = 20,2mm$$

Dessa forma, para a resistência característica à compressão de 30 MPa e considerando o coeficiente de minoração do concreto para situação excepcional  $\gamma_c = 1,2$ , tem-se, para a resistência de cálculo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{3}{1,2} = 2,5KN/cm^2$$

O valor da resistência de cálculo reduzida, no meio da seção, devido à temperatura elevada, usando  $k_{c\theta,M}$  é:

$$f_{cd,T} = 0,95 \cdot 2,5 = 2,38KN/cm^2$$

As temperaturas no centro geométrico das armaduras tracionadas, tanto a positiva quanto a negativa, de acordo com a Figura 2 (para barras tracionadas - CA-50) situam-se abaixo dos 400°C. Dessa forma, consultando-se a Figura 4, obtém-se o coeficiente de redução da tensão de escoamento  $k_{s,\theta} = 1$ .

Para o método de Hertz, a posição da linha neutra para as armaduras positivas é calculada através da equação 6, em que 1,82 cm<sup>2</sup> é a área de aço calculada para a situação normal:

$$x_{fi} = \frac{(k_{s,\theta} \cdot f_{yd}) \cdot A_s}{0,85 \cdot b \cdot (k_{c\theta,M} \cdot f_{cd})} = \frac{1,50 \cdot 1,82}{0,85 \cdot 100 \cdot 2,38} = 0,45cm$$

Para as armaduras positivas, conforme já calculado, a altura útil adotada foi  $d = 7,55$  cm. O momento resistente de acordo com a Equação 4 é:

$$M_{R,fi} = 1,82 \cdot 1,50 \cdot \left( 7,55 - \frac{0,8 \cdot 0,450}{2} \right) \cdot 0,01$$

$$M_{R,fi} = 6,71 \text{ KN.m/m}$$

A combinação de ação excepcional atuante pode ser expressa pela Equação [9]:

$$F_{di} = \sum_{i=1}^n \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,28 \cdot F_{Q,k} \quad [9]$$

Onde:

- $F_{Gi,k}$ : Valor característico das ações permanentes diretas.
- $F_{Q,exc}$ : Valor característico das ações térmicas decorrentes do incêndio.
- $F_{Q,k}$ : Valor característico das ações variáveis decorrentes do uso e ocupação da edificação.
- $\gamma_g$ : Valor do coeficiente de ponderação para as ações permanentes diretas.

De acordo com a tabela 4 da ABNT NBR 14323: 2013,  $\gamma_{gi} = 1,2$  quando se consideram as ações permanentes diretas agrupadas (somatório de todas as ações permanentes diretas) e para variações decorrentes do uso e ocupação que não passem de  $5 \text{ KN/m}^2$ , ou seja, a maioria dos edifícios residenciais e comerciais.

Calculando-se  $F_{di}$  de acordo com a Equação [9], considerando o peso próprio de  $3 \text{ KN/m}^2$ , revestimento de  $1 \text{ KN/m}^2$  e sobrecarga de  $1,5 \text{ KN/m}^2$ , obtém-se:

$$F_{di} = 1,2 \cdot 4 + 0,28 \cdot 1,5 = 5,22 \text{ KN/m}^2$$

O valor dos momentos positivos atuantes de cálculo nas direções x e y são (5,51 e 2,25 são coeficientes obtidos da teoria das placas e 3,65 é o menor vão da laje):

$$m_{xd} = 5,51 \cdot \frac{5,22 \cdot (3,65)^2}{100} = 3,83 \text{ KN.m/m}$$

$$m_{yd} = 2,25 \cdot \frac{5,22 \cdot (3,65)^2}{100} = 1,56 \text{ KN.m/m}$$

Como  $M_{R,fi} = 6,71 \text{ KN.m/m} \geq m_{xd} = 3,83 \text{ KN.m/m}$  e  $m_{yd} = 1,56 \text{ KN.m/m}$ , L1 atende a verificação de incêndio para as armaduras positivas, pelo método de Hertz, para o TRRF de 60 minutos.

Para a borda considerada engastada, a posição da linha neutra é, de acordo com a Equação [6]:

$$x_{fi} = \frac{50 \cdot 3,65}{0,85 \cdot 100 \cdot 2,38} = 0,902 \text{ cm}$$

Para o momento no engastamento, a altura útil adotada foi de  $7,55$  cm. Porém, para o momento negativo, deve ser descontada desse valor a espessura fictícia calculada  $a_z = 2,02$  cm.

Dessa forma, a altura útil a ser considerada será  $d_{fi} = 7,55 - 2,02 = 5,53$  cm. O momento resistente será, de acordo com a Equação [4] para momentos negativos:

$$M_{R,fieng} = -3,65 \cdot 50 \cdot \left( 5,53 - \frac{0,8 \cdot 0,902}{2} \right) \cdot 0,01$$
$$M_{R,fieng} = -9,43 \text{ KN.m / m}$$

O momento atuante de cálculo no engaste, em situação de incêndio, é (10,92 é o coeficiente obtido da teoria das placas):

$$X_{xd} = -10,92 \cdot \frac{5,22 \cdot (3,65)^2}{100} = -7,59 \text{ KN.m / m}$$
$$|M_{R,fieng}| = 9,43 \text{ KN.m / m} \geq |X_{xd}| = 7,59 \text{ KN.m}$$

L1 atende a verificação de incêndio para o engaste, pelo método de Hertz, para o TRRF de 60 minutos.

## CONCLUSÃO

Partindo da premissa de que a laje L1 do exemplo de aplicação já estava dimensionada no ELU em situação ambiente, efetuou-se a verificação de L1 em situação de incêndio, pelos métodos Tabular e de Hertz. Para o primeiro método, que é uma simples aplicação de tabelas, L1 atendeu aos requisitos da ABNT NBR 15200: 2012. O mesmo ocorreu em relação ao método de Hertz, pois o momento resistente foi bem maior que o atuante, principalmente no caso dos momentos positivos.

Cabe salientar que os métodos simplificados permitem verificar apenas a capacidade de suporte às solicitações de cálculo, no caso de fogo. Para a verificação da função corta-fogo, pode-se lançar mão do próprio método tabular, conforme visto nesse trabalho, ou analisar a estrutura através de métodos analíticos, como os encontrados em ARAÚJO (2014).

Para a análise de uma estrutura sob a ação do fogo, é importante usar o método tabular e, pelo menos, um dos métodos simplificados permitidos pela ABNT NBR 15200: 2010, para verificar a ocorrência de valores discrepantes nas dimensões da peça.

O estudo mais aprofundado do agregado graúdo basalto se faz necessário, pois ele é muito utilizado em algumas regiões do país, mas não está incluído nos estudos das normas internacionais que tratam de estruturas sob a ação do fogo, e também pouco conhecido no Brasil, quando se trata de suas propriedades térmicas.

Por fim, é aceitável, em situação de incêndio, que ocorram na estrutura danos localizados e colapsos locais. Ela poderá até ser reutilizada, porém deverá passar antes por uma perícia, para aferir as suas propriedades após o sinistro. A demolição só deve ocorrer em último caso.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. v.2, 4.ed., Rio Grande: Ed. Dunas, 2014.

\_\_\_\_\_. **Curso de Concreto Armado**. v.4, 4.ed., Rio Grande: Ed. Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. 238 p. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 14323:** projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. 66 p. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 14432:** exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. 14 p. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 15200:** projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 48 p. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 10636:** Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio. 7 p. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 5628:** Papel e cartão - Determinação da resistência à flexão por métodos estáticos - Princípios gerais. 11 p. 2004.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio.** 2008. 724 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/>>. Acesso em: 08-11-2015.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. Métodos simplificados para o dimensionamento de estruturas de concreto sujeitas à flexão simples, em situação de incêndio. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 47., 2005, Olinda. Anais. São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, Geraldo Cechella et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** v.2, 1.ed., São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2.ed., São Paulo: IBRACON, 2014.

SILVA, Valdir Pignatta. **Segurança contra Incêndio em Edifícios:** Considerações para o Projeto de Arquitetura, São Paulo: Blucher, 2014.