

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO POR MÉTODO SIMPLIFICADO

Lillian Gonçalves Baptista (FURG) E-mail: engcivil.lgb@gmail.com
Mauro de Vasconcellos Real (FURG) E-mail: mvrealgm@gmail.com
Marcelo Mesquita do Amaral (FURG) E-mail: mesquita.amaral@gmail.com

Resumo: Atualmente, ao considerar os efeitos de um incêndio em vigas de concreto armado, softwares de projeto de estruturas, em geral, limitam-se apenas às verificações com base no método tabular da ABNT NBR-15200 (2012), pois é o único realmente detalhado na norma brasileira. Porém, a verificação por esse método, dependendo da distribuição das barras, pode resultar em soluções excessivamente a favor ou contra a segurança. O objetivo principal deste artigo é propor um método simplificado de verificação de vigas de concreto armado em situação de incêndio que permita a implementação em softwares comerciais de projeto. Tal método proposto pretende conciliar segurança estrutural, facilidade de aplicação e economia na execução. A validação do modelo de cálculo foi feita através de um estudo comparativo com valores encontrados na literatura, bem como com calculados pelo método da isoterma 500 °C, e com resultados obtidos utilizando o método de elementos finitos no software ANSYS. Verificou-se que o método simplificado proposto apresenta resultados muito semelhantes aos obtidos pelo método da isoterma de 500°C, cuja variação máxima do momento resistente em situação de incêndio foi de 5%, a favor da segurança. Ao comparar os valores obtidos pelos métodos simplificados encontrados na bibliografia, em geral, os resultados são semelhantes, porém, em alguns casos, os valores diferiram um pouco mais em função das diferentes temperaturas encontradas. Em resumo, o método simplificado proposto geralmente apresenta valores satisfatórios e a favor da segurança.

Palavras-chave: Dimensionamento, viga, concreto armado, incêndio, método simplificado.

FIRE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY SIMPLIFIED METHOD

Abstract: Currently, when considering the effects of fire on reinforced concrete beams, the design software is generally limited to the ABNT NBR-15200:2012 tabular method-based verification since it is the only method detailed by the Brazilian standard. However, depending on the reinforcement arrangement, this design method could produce solutions excessively in favor or against safety. This paper's main objective is to propose a simplified method to verification reinforced concrete beams in fire situations, which allows easy implementation in commercial design software. Such a method combines structural safety, ease of application, and economical construction. The calculation model validation was accomplished through a comparative study with values found in literature and calculations by the 500 °C isothermal method and results from the finite element method in the ANSYS software. It was verified that the proposed simplified method presents very similar results to those obtained by the 500°C isothermal method, whose maximum variation of the resistant moment in fire situation was 5%, in favor of safety. When comparing the values obtained by the simplified methods found in the bibliography, in general, the results are similar, however, in some cases, the values differed a little more due to the different temperatures found. In summary, the proposed simplified method generally presents satisfactory values in favor of safety.

Keywords: Design, beam, reinforced concrete, fire, simplified method.

1. Introdução

O projeto de estruturas de concreto em temperatura ambiente consiste na determinação das dimensões das peças e da quantidade e disposição das armaduras, para que não seja atingido um estado limite. A estrutura não deve atingir nem um estado limite último, que corresponderia à ruína ou ao colapso; nem um estado limite de serviço, que tornaria inviável a sua utilização (ARAÚJO, 2014).

Atualmente, ao considerar os efeitos de um incêndio em vigas de concreto armado, softwares comerciais de projeto de estruturas, em geral, limitam-se apenas às verificações com base no método tabular, conforme a ABNT NBR 15200 (2012), sem levar em consideração os esforços solicitantes e resistentes, deixando ao projetista a necessidade de alterar o dimensionamento da seção de concreto. Este fato não estimula a utilização de softwares comerciais baseados no método tabular por não apresentar soluções econômicas, conforme Costa et al. (2016).

Além disso, segundo Silva e Pierin (2015), usar o método tabular, apesar de expedito, pode levar a resultados, a depender do número de barras, a favor ou contra a segurança. Em virtude disso, surgem métodos mais trabalhosos, como o método gráfico detalhado em Albuquerque (2014) e Silva (2012) ou programas de computador que conduzem a resultados mais precisos.

O objetivo principal desse artigo é propor um método simplificado de verificação de vigas de concreto armado em situação de incêndio que permita a implementação em softwares comerciais de projeto, com soluções analíticas, e além disso, apresente resultados favoráveis à segurança, e em alguns casos, mais econômicos do que o método tabular.

2. Fundamentação teórica

Segundo a ABNT NBR 15200 (2012), em condições usuais, as estruturas são projetadas à temperatura ambiente e, dependendo de suas características e uso, devem ser verificadas em situação de incêndio. Existem muitos métodos para se fazer essa verificação, sendo que a norma brasileira aceita os seguintes métodos: método tabular; método simplificado de cálculo; método avançado de cálculo; e método experimental.

Conforme Albuquerque (2012), o método tabular é o único realmente detalhado, na norma brasileira, por ser bastante prático e simples. Quanto aos outros, apenas são apresentadas diretrizes para aplicação, pois demandam programas de computador específicos ou a realização de ensaios em laboratório.

Entretanto, nesse artigo será proposto um método simplificado que permita a verificação de vigas em situação de incêndio, com cálculos manuais, de forma relativamente simples, sem o auxílio de gráficos ou de programas computacionais sofisticados.

2.1. Método tabular

Para garantir a segurança estrutural em situação de incêndio, pelo método tabular, basta que as vigas atendam às dimensões mínimas tabeladas, em função do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), determinado conforme ABNT NBR 14432 (2001), ou pelo Método do Tempo Equivalente, conforme a ABNT NBR 15200 (2012). Tais dimensões mínimas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Dimensões mínimas para vigas biapoiadas

TRRF	Combinações de b_{min} / c_1				b_{wmin}
	1	2	3	4	
30	80/25	120/20	160/15	190/15	80
60	120/40	160/35	190/30	300/25	100
90	140/60	190/45	300/40	400/35	100
120	190/68	240/60	300/55	500/50	120
180	240/80	300/70	400/65	600/60	140

Tabela 2. Dimensões mínimas para vigas contínuas ou vigas de pórticos

TRRF	Combinações de b_{min} / c_1				b_{wmin}
	1	2	3	4	
30	80/15	160/12	-	-	80
60	120/25	190/12	-	-	100
90	140/37	250/25	-	-	100
120	190/45	300/35	450/35	500/30	120
180	240/60	400/50	550/50	600/40	140

Onde:

b_{min} – largura mínima da seção transversal;

b_{wmin} – largura mínima da alma de seção transversal de viga com largura variável;

c_1 – distância entre o eixo da armadura longitudinal (CG) e a face do concreto exposta ao fogo.

A ABNT NBR 15200 (2012) estabelece algumas prescrições importantes para a aplicação do método tabular, dentre elas, destaca-se o caso de armaduras em uma camada.

Em vigas com somente uma camada de armaduras e largura não superior ao b_{min} indicado na coluna 3 da Tabela 1, e coluna 2 da Tabela 2, conforme o TRRF, a distância c_{1u} (conforme Figura 1) no fundo das vigas deve ser 10 mm maior do que o c_1 dado pela referida tabela.

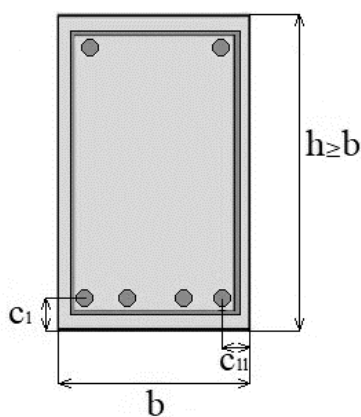


Figura 1 – Distâncias c_1 e c_{1u}

Esse ajuste se faz necessário, visto que junto às bordas da face inferior da viga há concentração de temperatura. Como alternativa para concreto armado, a fim de se manter iguais os cobrimentos das armaduras tanto em relação à face inferior quanto à lateral da viga, deve-se especificar barras de canto com um diâmetro imediatamente superior ao calculado.

2.2. Método simplificado

Diferentemente do método tabular, que consiste em uma verificação, para determinado TRRF, das dimensões mínimas das vigas, os métodos simplificados avaliam a resistência ao fogo, por analisar os esforços tanto solicitantes quanto resistentes, para determinado TRRF.

Assim, a ação do incêndio se traduz, usualmente, apenas na redução da resistência dos materiais e na capacidade dos elementos estruturais e a verificação usual da segurança da estrutura em situação de incêndio é garantida quando a equação (1) é satisfeita:

$$S_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (1)$$

Onde:

$S_{d,fi}$ – valor de cálculo do esforço solicitante em situação de incêndio;

$R_{d,fi}$ – valor de cálculo do esforço resistente em situação de incêndio.

2.2.1. Momento solicitante em situação de incêndio

Para calcular o momento solicitante, em situação de incêndio, pode-se empregar a equação (2).

$$M_{Sd,fi} = (1,2M_{gk} + 0,7\psi_2M_{qk}) \quad (2)$$

Onde:

$M_{Sd,fi}$ – momento solicitante de cálculo, em situação de incêndio [kNm];

M_{gk} – momento característico referente à ação permanente, à temperatura ambiente [kNm];

ψ_2 – fator de redução de combinação quase permanente para ELS, conforme ABNT NBR-6118 (2014) [adimensional];

M_{qk} – momento característico referente à ação variável, à temperatura ambiente [kNm].

Alternativamente, por simplificação, pode-se utilizar a equação (3).

$$M_{Sd,fi} = 0,7M_{Sd} \quad (3)$$

Onde:

M_{Sd} – momento solicitante de cálculo à temperatura ambiente [kNm].

Destaca-se que tais equações independem do tipo de incêndio ou do tempo de exposição ao fogo.

3. Metodologia

Para se calcular Momento Resistente em Situação de Incêndio pelo Método Simplificado Proposto, pode-se utilizar a equação (4):

$$M_{Rd,fi} = f_{yk} k_{s,m} A_s \left(d - \frac{f_{yk} A_s}{2 f_{ck} b} \right) \quad (4)$$

Onde:

f_{yk} – resistência característica à tração do aço, à temperatura ambiente [kN/cm²];

$k_{s,m}$ – fator médio de redução da resistência do aço [adimensional];

A_s – área total da seção transversal da armadura longitudinal [cm²];

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto, à temperatura ambiente [kN/cm²];

b – largura da seção da viga de concreto [cm].

Todos os dados da equação (4) são conhecidos com o dimensionamento à temperatura ambiente, exceto o $k_{s,m}$. Dessa forma, a grande incógnita do problema é o $k_{s,m}$ e seu valor está diretamente relacionado com as temperaturas de cada barra de aço.

Essas por sua vez podem ser calculadas, com uma simplificação razoável, pelo método de Wickström (1986), em função apenas do tempo de exposição ao fogo, e da profundidade de cada barra com coordenadas x_i e y_i , conforme expressa pela equação (5):

$$\theta_{c,xy} = [n_w(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y] \theta_g \quad (5)$$

Onde n_w , n_x , n_y , e θ_g , são dados pelas seguintes equações:

$$n_w = 1 - 0,0616t^{-0,88} \quad (6)$$

$$n_x = 0,18 \ln \left(\frac{t}{x_i^2} \right) - 0,81 \quad (7)$$

$$n_y = 0,18 \ln \left(\frac{t}{y_i^2} \right) - 0,81 \quad (8)$$

$$\theta_g = 345 \log_{10}(480t + 1) + \theta_0 \quad (9)$$

Onde:

t – tempo [horas];

x_i – coordenada cartesiana horizontal da barra de aço i [m];

y_i – coordenada cartesiana vertical da barra de aço i [m];

θ_g – temperatura média dos gases no ambiente em chamas, dada pela curva de incêndio padrão ISO 834 (1975) [°C];

θ_0 – temperatura dos gases no instante $t = 0$, geralmente admitida 20 °C.

O método de Wickström (1986) é particularmente fácil de usar quando o fogo padrão ISO 834 e as propriedades normais do concreto são assumidos. A capacidade de carga de um elemento de concreto em um incêndio diminui à medida que a resistência das barras de aço é reduzida com o aumento da temperatura. O método aqui proposto

permite obter boas temperaturas nas armaduras, em função da distância à superfície exposta e do tempo de exposição ao fogo.

As fórmulas são obtidas por comparação com cálculos computacionais de elementos finitos mais elaborados e a verificação do método pode ser encontrada em Amaral (2018), justificando a escolha da equação de Wickström (1986) como o método de cálculo empírico mais representativo para vigas de concreto com parâmetros de acordo com a padrão brasileiro.

Conhecidas as temperaturas de cada barras de aço, determina-se o fator de redução da resistência médio $k_{s,m}$, pela média ponderada dos $k_{s,\theta i}$, em função da área de aço de cada barra de aço i , conforme a equação (10):

$$k_{s,m} = \frac{\sum k_{s,\theta i} A_{s,i}}{\sum A_{s,i}} \quad (10)$$

Onde:

$A_{s,i}$ - área da seção transversal da barra i da armadura longitudinal [cm^2];

$k_{s,\theta i}$ - fator de redução da resistência, à temperatura θ , da barra de aço i , que pode ser calculado conforme a equação (11):

$$\begin{aligned} k_{s,\theta i} &= 1 && \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 400^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 1 - 0,0022(\theta_s - 400) && \text{para } 400^\circ\text{C} < \theta_s \leq 500^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,78 - 0,0031(\theta_s - 500) && \text{para } 500^\circ\text{C} < \theta_s \leq 600^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,47 - 0,0024(\theta_s - 600) && \text{para } 600^\circ\text{C} < \theta_s \leq 700^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,23 - 0,0012(\theta_s - 700) && \text{para } 700^\circ\text{C} < \theta_s \leq 800^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,11 - 0,0005(\theta_s - 800) && \text{para } 800^\circ\text{C} < \theta_s \leq 900^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,06 - 0,0002(\theta_s - 900) && \text{para } 900^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1000^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,04 - 0,0002(\theta_s - 1000) && \text{para } 1000^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1100^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0,02 - 0,0002(\theta_s - 1100) && \text{para } 1100^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1200^\circ\text{C} \\ k_{s,\theta i} &= 0 && \text{para } \theta_s > 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (11)$$

Assim como no método tabular, nesse método simplificado proposto não são considerados os efeitos eventuais de spalling (lascamentos do concreto) ou restrições à deformação térmica.

Além dessa simplificação, visto que em situações mais críticas (temperaturas das barras de aço elevadas), a resistência média à tração do aço decai mais do que a resistência média a compressão do concreto, ou seja, $k_{s,m} < k_{c,m}$ (fator médio de redução da resistência do concreto), consequentemente $\left(\frac{k_{s,m}}{k_{c,m}}\right) < 1$; portanto, visto que o $k_{c,m}$ é de difícil determinação, a fim de simplificar a determinação do momento resistente em

situação de incêndio, a favor da segurança, considerou-se: $\left(\frac{k_{s,m}}{k_{c,m}}\right) = 1$.

Mais informações sobre o método simplificado proposto podem ser encontradas em Amaral (2018).

4. Verificação do método simplificado proposto

A verificação do procedimento de cálculo do momento resistente em situação de incêndio do método simplificado proposto foi feita através de comparação com os resultados encontrados em bibliografia, com calculados conforme o método da isoterma 500 °C, proposto pelo Eurocode 2 parte 1-2 (2004), e com valores determinados utilizando o método de elementos finitos conforme Moaveni (2015), através do software ANSYS (2009), conforme apresentado em Amaral (2018).

Foram analisadas seis seções transversais de vigas já estudadas por fontes comparativas, submetidas a diferentes tempos de exposição ao fogo, conforme mostra a Figura 2.

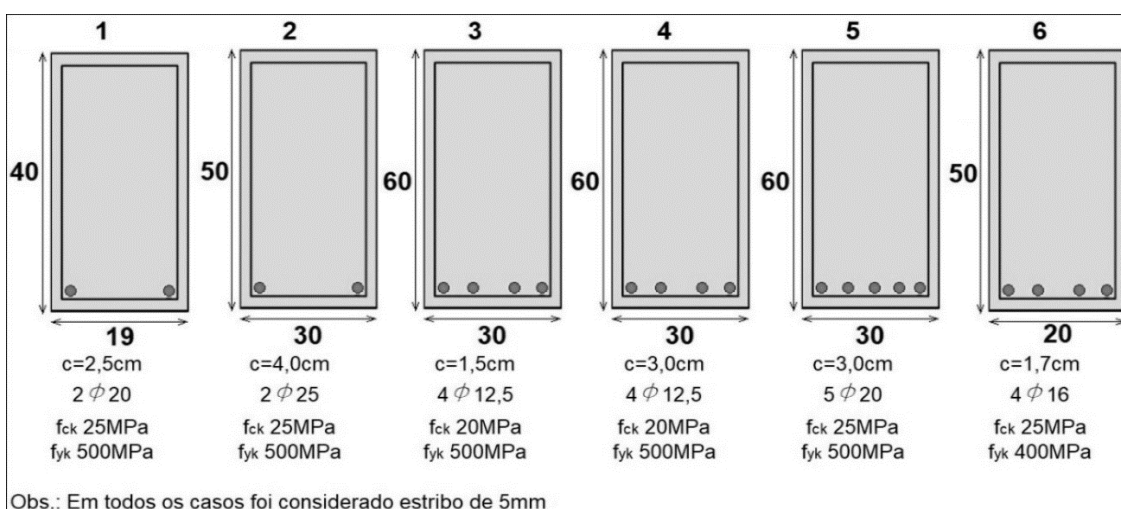


Figura 2 – Representação sem escala das seções analisadas, dimensões em [cm]

O comparativo dos valores dos momentos resistentes de cálculo em situação de incêndio pode ser observado na Tabela 3. Destaca-se que a grande vantagem na determinação dos momentos resistentes de cálculo, em situação de incêndio, através do método simplificado proposto, é que tais valores são obtidos manualmente, a partir de equações simples, sem dependência de tabelas, gráficos, ou sofisticados programas de computador.

Tabela 3. Comparativo Momento Resistente de cálculo em situação de incêndio

Viga/ Seção (Figura 2)	Tempo do Incêndio Padrão [min]	Fonte Comparativa	Momento Resistente de Cálculo em Situação de Incêndio ($M_{Rd,fi}$) [kNm]			
			Valor Referencial da Fonte Comparativa	Temp. do Aço ANSYS	Temperatura do aço Eq. de Wickström [10]	
				Método Utilizando ANSYS	Método da Isoterma 500°C	Modelo Simplificado Proposto
1	90	Albuquerque (2012)	45,3	46,0	38,2	36,4
2	120	Albuquerque (2012)	138,3	137,0	109,4	107,0

3	30	Soares (2003)	127,6	128,4	125,5	125,5
3	60	Soares (2003)	79,7	82,0	81,8	81,0
3	90	Soares (2003)	31,1	47,9	44,7	43,7
3	120	Soares (2003)	21,3	28,7	24,1	23,5
4	30	Soares (2003)	132,1	131,7	131,7	132,1
4	60	Soares (2003)	115,3	120,9	116,4	116,6
4	90	Soares (2003)	78,2	92,7	88,7	88,2
4	120	Soares (2003)	60,8	64,6	60,5	59,6
5	60	Sousa e Silva (2015)	378,4	381,7	367,5	371,8
6	30	Gonçalves (2007)	139,0	139,6	136,8	137,9
6	60	Gonçalves (2007)	94,0	110,6	89,8	88,7
6	90	Gonçalves (2007)	43,0	62,0	47,1	45,3
6	120	Gonçalves (2007)	22,0	32,9	24,8	23,6

Através desse comparativo, pode-se fazer as seguintes observações:

- O método simplificado proposto apresenta resultados muito similares aos obtidos pelo método da isoterma 500°C, que é um método aceito pelo código europeu. A variação máxima verificada foi de 5%, a favor da segurança.

- Quando comparados, os valores obtidos pelo método simplificado proposto com os encontrados na bibliografia, observa-se valores bem próximos. Em geral, os resultados são semelhantes, porém, em alguns casos, os valores diferiram um pouco mais. A razão para as diferenças é que as temperaturas encontradas pelos autores são diferentes daquelas obtidas pelo ANSYS ou pela equação de Wickström (1986).

- Conforme a Tabela 3, o método simplificado proposto, em apenas um dos resultados apresentou valor maior do que o método utilizando o software ANSYS, que se baseia no método dos elementos finitos e que faz uma análise mais rigorosa e representativa da realidade, pois considera a redução da resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do aço com o aumento da temperatura, conforme apresentado em Amaral (2018). A diferença, nesse caso, foi inferior a 1,0 kNm, ou seja, desprezível. Em todos os demais resultados, obtiveram-se momentos inferiores aos do ANSYS, indicando que o método simplificado proposto, em geral, apresenta valores a favor da segurança.

5. Exemplo de aplicação comparativo

A seguir será demonstrado com exemplo numérico, para fins de comparação, como se aplicam os métodos tabular e o método simplificado proposto, considerando uma viga com TRRF igual a 60 min.

A partir do dimensionamento da viga, considerando os esforços à temperatura ambiente, segundo a ABNT NBR-6118 (2014), têm-se definidos os parâmetros, conforme Figura 3.

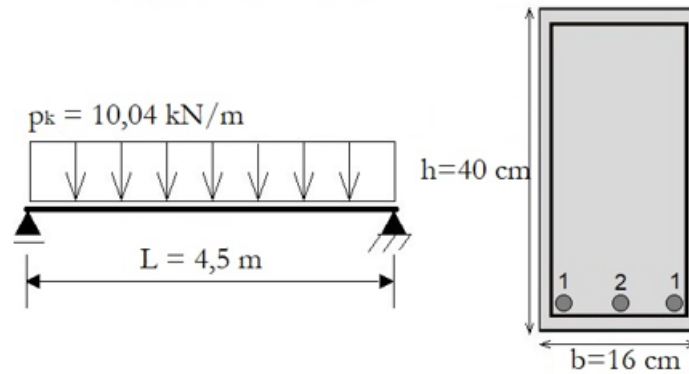


Figura 3 – Parâmetros da viga exemplo

Onde:

\varnothing_t = armadura transversal de 5 mm;

c = cobrimento da armadura de 25 mm;

$A_{s,ef} = 2,36 \text{ cm}^2$ (armadura longitudinal igual a 3 barras de 10mm);

$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;

$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$;

$A_{s,calc} = 2,36 \text{ cm}^2$.

5.1. Método tabular

O primeiro passo é a determinação da distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo (c_1). Nesse caso, pode ser calculado conforme segue:

$$c_1 = c + \varnothing_t + \frac{\varnothing}{2} = 25 + 5 + \frac{10}{2} \therefore c_1 = 35 \text{ mm}$$

Após isso, determina-se o c_{1min} , através da Tabela 1, para o TRRF, nesse caso 60 min. Então, pela simples leitura da tabela, $c_{1min} = 35 \text{ mm}$. Embora o método tabular seja bastante expedito, há algumas alternativas e cuidados a serem tomados que talvez não sejam tão imediatos.

Conforme mencionado no item 2.1, em seções com apenas uma camada de armadura e largura não superior, conforme o TRRF, ao b_{min} indicado na coluna 3 da Tabela 1, algumas mudanças em projeto devem ser realizadas. Esse é o caso da seção em estudo, em que as 3 barras de 10 mm estão distribuídas em apenas uma camada e a largura de 160 mm não é superior à 190 mm, conforme coluna 3 da Tabela 2.1 para TRRF de 60 min.

Em vista disso, a distância entre o eixo da armadura longitudinal de canto e a face lateral do concreto exposta ao fogo c_{1l} deve ser 10 mm maior que o c_{1min} encontrado pelo método tabular. Ou seja, para garantir a segurança estrutural, c_{1l} deve ser maior

que $c_{1min} = c_{1min} + 10$ mm. Nesse caso, $c_{1min} = 35 + 10 = 45$ mm. Portanto, nesse caso, não há segurança, pois:

$$c_{1l} = 35 \text{ mm} < c_{1min} = 45 \text{ mm}.$$

Caso nenhuma alternativa seja tomada, segundo Albuquerque (2012), o Tempo de Resistência ao Fogo (TRF) deve ser calculado, considerando-se, a favor da segurança, c_1 reduzido em 10 mm. Nesse caso, $c_1 = 35 - 10 = 25$ mm.

Calcula-se o TRF da peça, por interpolação linear dos valores indicados na Tabela 1, conforme segue:

Se para $b_{min} = 160$ mm e $c_{1min} = 15$ mm, o TRF é igual a 30 min; e para $b_{min} = 160$ mm e $c_{1min} = 35$ mm, o TRF é igual a 60 min;

Portanto, para $b = 160$ mm e $c_1 = 25$ mm, o TRF, por interpolação, é igual a 45 min;

De modo que, nesse caso, não há segurança, pois:

$$\text{TRF} = 45 \text{ min} < \text{TRRF} = 60 \text{ min}.$$

Portanto, em resumo, a viga desse exemplo, com as mesmas características do dimensionamento à temperatura ambiente, não apresenta segurança estrutural em situação de incêndio, conforme o método tabular normativo.

5.2. Método simplificado proposto

Em primeiro lugar é necessário calcular o momento solicitante característico, à temperatura ambiente. Visto que se trata de uma viga biapoiada, pode-se calcular da seguinte forma:

$$M_{Sk} = \frac{p_k L^2}{8} = \frac{10,04 \times 4,5^2}{8} \therefore M_{Sk} = 25,41 \text{ kNm}$$

O momento solicitante de cálculo à temperatura ambiente, pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_{Sd} = 1,4 \times M_{Sk} \therefore M_{Sd} = 35,58 \text{ kNm}$$

Nesse exemplo, considerando $M_{Sd,fi} = 0,7M_{Sd}$, o momento solicitante de cálculo em situação de incêndio pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_{Sd,fi} = 24,91 \text{ kNm}$$

Após determinar a solicitação, prossegue-se com o cálculo da resistência. Para isso, calcula-se as temperaturas das barras, para o tempo de exposição ao incêndio padrão igual ao TRRF, nesse exemplo, 60 min. Pela equação de Wickström (1986), conforme a equação (5), a temperatura das barras de canto será igual:

$$\theta_{c,xy1} = [0,938(0,397 + 0,397 - 2 \times 0,397 \times 0,397) + 0,397 \times 0,397]945 =$$

$$\therefore \theta_{s1} = \theta_{c,xy1} = 574 \text{ }^\circ\text{C};$$

A temperatura das barras do centro será igual:

$$\theta_{c,xy2} = [0,938(0,099 + 0,397 - 2 \times 0,099 \times 0,397) + 0,099 \times 0,397]945 =$$

$$\therefore \theta_{s2} = \theta_{c,xy2} = 407 \text{ }^\circ\text{C};$$

A partir da temperatura das barras é possível calcular os fatores de redução da resistência do aço, $k_{s,\theta i}$, conforme a equação (11):

$$\text{Para } \theta_{s1} = 574^\circ\text{C}, k_{s,\theta 1} = 0,78 - 0,0031(574 - 500) = 0,5506.$$

$$\text{Para } \theta_{s2} = 407^\circ\text{C}, k_{s,\theta 2} = 1 - 0,0022(407 - 400) = 0,9846.$$

Sendo assim o fator de redução de resistência médio ($k_{s,m}$), pode ser calculado, considerando a área de cada barra ($A_{si} = A_{s1} = A_{s2} = 0,7854 \text{ cm}^2$), conforme a equação (10):

$$k_{s,m} = \frac{2 \times 0,5506 \times 0,7854 + 0,9846 \times 0,7854}{3 \times 0,7854} = 0,6953$$

Por último, aplicando-se a equação (4), determina-se o momento fletor resistente de cálculo, em situação de incêndio, pelo método simplificado proposto:

$$M_{Rd,fi} = 50 \times 0,6953 \times (3 \times 0,7854) \left[36,5 - \frac{50 \times (3 \times 0,7854)}{2 \times 3,0 \times 16} \right] = 28,89 \text{ kNm}$$

Por último, é verificada se a condição de segurança, conforme a equação (1), é satisfeita. Nesse caso, a segurança estrutural em situação de incêndio é garantida, pelo método simplificado proposto, pois:

$$M_{Rd,fi} = 28,89 \text{ kNm} > M_{Sd,fi} = 24,91 \text{ kNm}$$

6. Comparativo de resultados

Conforme verificado no exemplo anterior, há casos em que o método tabular apresenta soluções antieconômicas. Por outro lado, dependendo da distribuição das barras o mesmo método tabular apresenta resultados desfavoráveis a segurança. A seguir serão apresentados alguns resultados que demonstram tais afirmações.

Para permitir uma comparação mais efetiva, selecionaram-se vigas com $A_{s,calc} = A_{s,ef}$ e $M_{Sd,fi} = 0,7M_{Sd}$ (mesmo critério utilizado pelo método tabular).

Outra observação a ser mencionada é que vigas dimensionadas à temperatura ambiente, conforme a ABNT NBR-6118 (2014), respeitando os cobrimentos mínimos exigidos por ela, em função da classe de agressividade, possuem TRF mínimo de 30 min independente de sua largura. Sendo assim, pode-se afirmar que a verificação de vigas em situação de incêndio com TRRF igual a 30 min é dispensável; portanto, os comparativos a seguir foram feitos apenas com vigas para 60, 90, 120 e 180 min de TRRF, com parâmetros definidos conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros das vigas biapoiadas de concreto armado para comparação dos métodos tabular e simplificados

Vig a	TRR F	b	h	L	p _k	c	Armadura
----------	----------	---	---	---	----------------	---	----------

	[min]	[cm]	[cm]	[m]	[kN/m]	[mm]	
1	60	16	40	4,5	10,04	25	3Ø10 (1 camada)
2	90	19	50	5,0	10,19	40	3Ø10 (1 camada)
3	120	24	60	6,0	11,47	45	4Ø10 (1 camada)
4	180	30	60	6,0	30,21	60	5Ø10 (1 camada)
5	90	30	60	6	23,19	25	2Ø20 (1 camada)

Em todos os casos considerou-se vigas com estribo de 5 mm e f_{ck} igual a 30 MPa e f_{vk} igual a 500 MPa.

Onde:

b – largura da seção transversal da viga [cm];

h – altura da seção transversão da viga [cm];

L – comprimento do vão da viga [m];

p_k – valor característico do carregamento uniformemente distribuído [kN/m];

c – cobrimento da armadura [mm].

A partir desses parâmetros comparou-se a condição de segurança estrutural dessas vigas em situação de incêndio tanto pelo método tabular, pelo método simplificado proposto, bem como pelo método da isoterma 500 °C. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo dos resultados de TRF obtidos, via métodos tabular, simplificado proposto, e da isoterma 500 °C, para diferentes modelos de vigas biapoiadas de concreto armado

Vig a	TRRF	b	Método Tabular				Método Simplificado Proposto			Método Isoterma 500 °C	
			c_l	c_{lmin}	c_{ll}	c_{llmin}	TRF	$M_{Sd,fi}$	$M_{Rd,fi(TRRF)}$	TRF	TRF
			[min]	[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[kNm]	[kNm]	[min]
1	60	16	35	35	35	45	50	24,91	28,89	67	67
2	90	19	50	45	50	55	80	31,21	38,85	105	105
3	120	24	55	60	55	70	94	50,58	55,65	129	129
4	180	30	70	70	70	80	140	61,48	67,44	191	191
5	90	30	40	40	40	40	90	102,27	60,47	68	68

Informa-se que os valores de TRF determinados com os métodos simplificados proposto e da isoterma 500 °C foram obtidos por iteração, alterando-se o tempo de exposição ao fogo até atingir a condição limite $M_{Rd,fi} = M_{Sd,fi}$.

A partir da Tabela 5 podemos verificar que:

- As Vigas 1 a 4 embora não satisfaçam a condição de segurança estrutural pelo método tabular ($c_{ll} < c_{llmin}$ e $TRF < TRRF$), pelos métodos simplificados apresentam segurança estrutural ($M_{Rd,fi} > M_{Sd,fi}$, $TRF > TRRF$). Podemos concluir que nesses

exemplos o dimensionamento pelo método simplificado proposto resultará em economia na execução quando comparado com o dimensionamento pelo método tabular.

- A Viga 5, por outro lado, embora satisfaça a condição de segurança estrutural pelo método tabular ($c_{1l} > c_{1lmin}$ e TRF > TRRF), pelos métodos simplificados não apresenta segurança estrutural ($M_{Rd,fi} < M_{Sd,fi}$, TRF < TRRF). Podemos concluir que nesse exemplo o dimensionamento pelo método tabular resultará em uma condição de risco da segurança, conforme demonstrado pelos métodos simplificados. Entende-se que essa viga deveria ser redimensionada.

- O motivo principal dessas diferenças de resultados entre o método tabular e o simplificado é a distribuição das barras, pois o método tabular considera apenas se as barras estão em uma ou mais camadas, porém, não pondera a maneira em que estas barras estão distribuídas. De modo que, pelo método tabular, casos com várias barras centradas na viga conduzem a resultados excessivamente do lado da segurança, conforme Vigas 1 a 4; por outro lado casos com armadura apenas nos cantos (2 barras), podem conduzir a resultados contra a segurança, conforme demonstrado pela Viga 5.

7. Conclusões

Neste artigo verificou-se que os resultados pelo método simplificado proposto e pelo método da isoterma 500°C são muito próximos; porém, o método simplificado proposto tem como vantagem a facilidade do cálculo, pois, através de algumas simplificações, não há a necessidade de determinar a largura da seção reduzida do concreto, em função da isoterma 500°C.

Outra observação importante é que, quando comparados os momentos resistentes em situação de incêndio, calculados pelo método simplificado proposto com os obtidos utilizando o método dos elementos finitos no software ANSYS, observou-se que os determinados pelo método proposto apresentaram, em geral, resultados inferiores aos obtidos com a simulação numérica no ANSYS, indicando que o método proposto apresenta valores a favor da segurança.

Sendo assim, a grande vantagem do método simplificado proposto é que o cálculo pode ser feito manualmente, de forma relativamente simples (mais fácil que o método da Isoterma 500 °C), sem a necessidade de gráficos ou de programas computacionais sofisticados.

A verificação dos modelos de cálculo dos momentos fletores resistentes em situação de incêndio foi feita através de um estudo comparativo com valores encontrados na literatura, bem como com os calculados pelo método da isoterma 500°C e com o auxílio do software ANSYS.

Através de um exemplo numérico, demonstrou-se a aplicação prática dos métodos tabular e simplificados. Além disso, realizou-se um comparativo de resultados entre os métodos tabular, simplificado proposto e da isoterma 500 °C, sendo os resultados apresentados pelos métodos simplificados, em geral, mais econômicos do que aqueles provenientes do método tabular.

Além disso, verificou-se que dependendo da distribuição de barras, o método tabular pode gerar resultados a favor ou contra a segurança, confirmando Silva e Pierin (2015).

Portanto, acredita-se que o método simplificado proposto, se implementado, poderia permitir uma melhoria em softwares comerciais de projeto, visto que atualmente, no

mercado em geral, tais ferramentas limitam-se a realizar apenas uma verificação com base no método tabular, sem levar em consideração os esforços solicitantes e resistentes, deixando ao projetista, muitas vezes, a necessidade de aumentar a seção das vigas de concreto. Tal fato, por não apresentar vantagem econômica, não estimula a utilização da ABNT NBR 15200 (2012), conforme Costa et al. (2016).

Em resumo, pode-se concluir, que o método simplificado proposto, além de ser um método de fácil aplicação, apresenta resultados a favor da segurança e, mesmo assim, permite resultados, em geral, mais econômicos que o método tabular. Deste modo, recomenda-se para uma futura revisão da ABNT NBR 15200 (2012), a inclusão detalhada de um método simplificado, econômico e seguro, de dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Dessa forma, os projetistas serão estimulados a utilizar a norma brasileira.

Referências

- ALBUQUERQUE, G. B. M. L. *Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- ALBUQUERQUE, G. B. M. L. *Reinforced concrete beams fire design: Standardized and alternative methods*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 262 p.
- ANSYS Version 12.0. ANSYS Inc., Canonsburg, PA. 2009.
- AMARAL, M. M. *Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado de Estruturas Portuárias em Situação de Incêndio*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.
- ARAÚJO, J.M. *Curso de Concreto Armado*. 4 vols. Rio Grande, Editora Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*. NBR-15200. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento*. NBR-14432. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto*. NBR-6118. Rio de Janeiro, 2014.
- COSTA, C. R. G. da; AJALA, G. R.; JÚNIOR, S. A. V.; OLIVEIRA, M. B. de; MILLER, C. P. *Estudo comparativo da utilização da ABNT NBR 15200:2012 e da ABNT NBR 6118:2014*. Revista Interdisciplinar do pensamento científico, v.2, n. 1, p 65-79, 2016.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EN 1992-1-2: Eurocode 2: design of concrete structures - part 1.2: general rules - structural fire design*. Brussels: CEN, 2004.
- GONÇALVES, M. J. C. R. *Comportamento ao fogo de elementos estruturais de betão: análise numérica e metodologia*. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2007.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 834: Fireresistance tests: elements of building construction - part 1.1: general requirements for fire resistance testing*. Geneva, 1999. [Revision of first edition (ISO 834:1975)]
- MOAVENI, S. *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS*. 4. ed. Pearson Education, Edinburgh Gate, England, 2015.
- SILVA, V. P. *Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio conforme ABNT NBR 15200:2012*. Editora Blücher, São Paulo, 2012.
- SILVA, V. P.; PIERIN, I. *Sobre a distância mínima entre armadura e face aquecida de vigas de concreto em situação de incêndio*. 3º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndio – CILASCI. Porto Alegre, 2015.
- SOARES, E. M. P. *Verificação de peças usuais de concreto armado em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

SOUSA, D. A. de; SILVA, G. P. *Estruturas de concreto em situação de incêndio*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Goiás, 2015.

WICKSTRÖM, U. *A very simple method for estimating temperatures in fire-exposed structures*. In Grayson, S.J., Eds., *New Technology to Reduce Fire Losses and Costs*. London: Elsevier Applied Science, 1986.