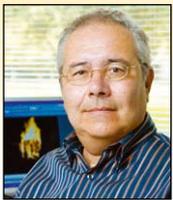


## Fire design of reinforced concrete columns. An alternative to the tabular method presented by the Brazilian standard NBR 15200:2004

### *Dimensionamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio. Uma alternativa ao método tabular da nbr 15200:2004*



V. P. SILVA <sup>a</sup>  
valpigss@usp.br

#### Abstract

The Brazilian standard ABNT NBR 15200:2004 - Fire design of concrete structures gives a tabular method to the fire design of concrete columns, which associates the load level and the minimal dimensions of the cross-section and the place of the reinforcement centroid to the required time of fire resistance. This paper presents the theory of those tables and a study as a contribution to a future review of NBR 15200. A structural design more optimized, more correct and economic than the tabular method given by the Brazilian standard can be attained using alternative methods.

**Keywords:** fire, columns, concrete, standartization

#### Resumo

A ABNT NBR 15200:2004 "Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio" apresenta um método tabular de dimensionamento de pilares em situação de incêndio. O método associa o nível do carregamento e as dimensões mínimas da seção transversal e da posição da armadura na seção, ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Neste trabalho, é apresentada a base teórica que permitiu a construção dessas tabelas e um estudo para contribuir com a futura revisão da NBR 15200. Um dimensionamento estrutural mais otimizado, mais preciso e econômico, se comparado ao método tabular da norma brasileira, pode ser obtido com o uso de métodos alternativos.

**Palavras-chave:** incêndio, pilares, concreto, normatização

<sup>a</sup> Professor Doctor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – [valpigss@usp.br](mailto:valpigss@usp.br)  
Av. Prof. Almeida Prado, trav2, n271, Edifício da Engenharia Civil – Cidade Universitária – 05508-900 São Paulo, Brasil

## 1. Introdução

O objetivo deste trabalho é contribuir com a normatização e o meio técnico brasileiros, divulgando processos simplificados para dimensionamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio tendo por base o Eurocode 2 [1]. Esses métodos podem ser empregados como alternativas mais precisas e econômicas ao método tabular apresentado na ABNT NBR 15200:2004 [2]. Tendo por base procedimentos europeus, deduziu-se uma expressão e uma tabela simplificadas, que se propõe incluir na futura revisão da NBR15200. A norma brasileira é recente e ainda está sendo avaliada e compreendida pela comunidade técnica. Este trabalho procura possibilitar um avanço em relação à abordagem da norma.

## 2. Abordagem da norma brasileira ABNT NBR 15200:2004

A norma brasileira ABNT NBR 15200:2004 [2] estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Em alguns Estados (São Paulo [3], Minas Gerais [4] e Goiás [5], por exemplo), há legislação específica a ser seguida e essa norma é citada como referência. Os objetivos gerais da verificação de estruturas em situação de incêndio são: limitar o risco à vida humana; limitar o risco da vizinhança e limitar o risco da propriedade exposta ao fogo. Como plastificações, ruínas e até colapsos locais são aceitos, a estrutura só pode ser reutilizada após um incêndio se for vistoriada, tiver sua capacidade remanescente verificada e sua recuperação for projetada e executada. Em condições usuais, as estruturas são projetadas em temperatura ambiente e, dependendo das suas características e uso, devem ser verificadas em situação de incêndio. Essa verificação poderá ser feita apenas no ELU para a combinação excepcional correspondente.

A ação correspondente ao incêndio pode ser representada por um intervalo de tempo de exposição à uma elevação padronizada de temperatura conhecida como incêndio-padrão (ABNT NBR 5628:2001 [6], ISO 834 [7]). Esse intervalo de tempo chamado tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é definido na ABNT NBR 14432:2000 [8] a partir das características da construção e do seu uso. O calor transmitido à estrutura nesse intervalo de tempo (TRRF) gera em cada elemento estrutural, função de sua forma e exposição ao fogo, uma certa distribuição de temperatura. Esse processo gera a redução da resistência dos materiais, além de esforços solicitantes decorrentes de alongamentos axiais ou de

gradientes térmicos. A ABNT NBR 15200:2004 [2] aceita que os esforços gerados pelo aquecimento possam, em geral, ser desprezados, em vista de a rigidez das peças diminuir e a capacidade de adaptação plástica crescer com o aquecimento.

Assim, a verificação usual da estrutura em situação de incêndio se reduz a demonstrar a condição da eq. 1.

$$S_{d,fi} = Y_{g,fi} F_{gk} + Y_{q,fi} \sum_2^n \psi_{2j} F_{qjk} \leq R_{d,fi} [f_{ck}(\theta), f_{yk}(\theta)] \quad (1)$$

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

$Y_{g,fi}$ ,  $Y_{q,fi}$ ,  $\psi_{2j}$  – coeficientes de ponderação e de combinação na presença de ação excepcionais, incêndio, no presente caso

$F_{gk}$ ,  $F_{qk}$  – valores característicos das ações permanente e variável respectivamente

$f_{ck}(\theta)$ ,  $f_{yk}(\theta)$  – valores característicos reduzidos das resistências do concreto e aço, respectivamente, à temperatura  $\theta$ .

Por simplicidade, a NBR 15200 permite que as solicitações de cálculo em situação de incêndio ( $S_{d,fi}$ ) possam ser admitidas iguais a 70% das solicitações de cálculo em situação normal (eq. 2), qualquer que seja a combinação de ações considerada. A eq. 2 despreza qualquer solicitação gerada pelas deformações impostas em situação de incêndio.

$$S_{d,fi} = 0,70 S_d \quad (2)$$

Para a verificação da eq. 1, a NBR 15200 aceita métodos tabulares, métodos simplificados ou gerais de dimensionamento e métodos experimentais.

No caso de pilares, o método tabular explicitado pela NBR 15200 fixa as dimensões mínimas dos pilares em situação de incêndio, conforme tabela 1.

onde:

$b_{min}$  é a menor dimensão do pilar

$c_{1min}$  é a menor distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo

Tabela 1 – Recomendações da ABNT NBR 15200:2004

TRRF (min)	Combinações de $b_{min}/c_{1min}$ (mm/mm)			
	Mais de uma face exposta			Uma face exposta
	$\mu_n = 0,2$	$\mu_n = 0,5$	$\mu_n = 0,7$	$\mu_n = 0,7$
30	190/25	190/25	190/30	140/25
60	190/25	190/35	250/45	140/25
90	190/30	300/45	450/40	155/25
120	250/40	350/45	450/50	175/35

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Sd,fi}}{N_{Rd}}$$

$N_{Sd,fi}$  é o valor de cálculo da força normal solicitante em situação de incêndio, calculada por meio da combinação excepcional de ações

$N_{Rd}$  é o valor de cálculo da força normal resistente em situação normal, considerando-se as excentricidades decorrentes da não-linearidade (segunda ordem) em situação normal

TRRF é o tempo requerido de resistência ao fogo conforme a ABNT NBR 14432:2000 [8]

A NBR 15200 teve por base o Eurocode 2 [1].

### 3. Abordagem do EUROCODE 2

A NBR 15200 permite o emprego de métodos mais precisos do que aqueles utilizados para a construção da Tabela 1.

O Eurocode 2 [1] apresenta dois métodos simplificados para o dimensionamento de pilares em situação de incêndio. O método A devido ao professor Jean-Marc Franssen da Universidade de Liège e o método B desenvolvido pelo Eng. Jose Maria Izquierdo (Informação obtida em reunião com o Eng. Izquierdo em 2006, em Madri).

O método A é um método analítico que permite determinar o tempo de resistência ao fogo (TRF) em função de vários parâmetros, entre os quais  $b_{min}$  e  $c_1$ . Limitando-se os valores de alguns parâmetros intervenientes no método A é possível construir uma tabela de dimensões mínimas. Essa tabela é apresentada no Eurocode 2 [1] e é similar à tabela 1, extraída da ABNT NBR 15200:2004 [2].

O método B é um método tabular com base nos mesmos procedimentos do dimensionamento de pilares à temperatura ambiente, com as devidas reduções de resistência dos materiais decorrentes da alta temperatura.

Ambos os métodos têm por hipótese que os pilares são de nós fixos em situação de incêndio. Deve ser lembrado que, segundo a ABNT NBR 8681:2003 [9], o efeito do vento pode ser desconsiderado na presença da ação térmica. Esses métodos, portanto, poderão ser empregados nos casos em que os deslocamentos provenientes da não-linearidade (segunda ordem) devido ao desaprumo, mesmo em estruturas regulares com  $\gamma_z$  pouco maior do que 1,1, não sejam consideráveis. O autor sugere que em qualquer caso  $\gamma_z \leq 1,3$  à temperatura ambiente.

#### 3.1 Método A

O método "A" fornecido pelo Eurocode 2 [1] para o projeto de pilares de concreto em situação de incêndio teve por base as propostas de Franssen [10], apresentadas no SiF 2000 – First International Workshop Structures in Fire (Primeiro Workshop Internacional "Estruturas em Incêndio"), realizado em Copenhague, em 2000.

O método A resultou de um programa experimental integrado, envolvendo experimentos físicos e numéricos, realizado pelas Universidades de Liège e de Gent (Bélgica), de Braunschweig (Alemanha) e pelo laboratório de Ottawa "Fire Research Station" (Canadá). Ao todo, 82 pilares foram ensaiados, tomando-se por referência as dimensões padronizadas do método tabular apresentado na versão de 1995 do Eurocode 2 ([9]). Os ensaios numéricos foram realizados com auxílio do programa de computador SAFIR.

Os ensaios demonstraram que as dimensões padronizadas do

Eurocode 2 de 1995 [11] conduziam a resultados contra a segurança, pois o diâmetro e a quantidade de barras da armadura e a esbeltez do pilar afetavam a resistência do pilar em situação de incêndio. Além disso, o método tabular de 1995 não era de uso tão imediato, como dava a entender. Era necessário calcular

a relação  $\mu_{fi} = \frac{N_{Sd,fi}}{N_{Rd,fi}(0)}$ , capacidade resistente em situação de

incêndio na iminência do incêndio ( $t = 0$ ). Assim, o cálculo analítico da resistência em situação de incêndio era necessário para usar um método que deveria ser expedito, de aplicação imediata. Além disso, quando a relação " $\mu_{fi}$ " apresentava resultados diferentes daqueles tabelados, a resistência precisava ser determinada por meio de uma interpolação linear dupla, entre os valores geométricos da seção do pilar, possível de atender à resistência requerida, pois havia necessidade de se determinar o momento resistente em incêndio.

Os pilares, cujos diâmetros das armaduras eram da ordem de 25 mm, apresentavam um desempenho bem menor do que o esperado, comparados aos pilares com diâmetros da ordem de 16 mm. A redução da resistência ao fogo deveu-se à incidência de lascamentos ("spalling") ao longo do comprimento nos cantos vivos da seção bem maior, quando o pilar continha barras de diâmetros grandes (Franssen [10]; Aldea et al. (1997), apud Costa [12]; Franssen (2001) apud Costa [13].

Os ensaios também confirmaram a influência do nível do carregamento, da esbeltez e das dimensões da seção transversal sobre a capacidade resistente do pilar em situação de incêndio (Franssen [10]).

Com base em resultados experimentais e numéricos, um novo modelo de cálculo foi estabelecido, parametrizado por: nível de carregamento e taxa mecânica de armadura, pela distância  $c_1$ , pelo comprimento de flambagem, dimensões da seção transversal e quantidade de barras distribuídas na seção. O tempo de resistência ao fogo do pilar pode ser avaliado por meio da eq. 3, a qual foi incorporada ao Eurocode 2, nas versões posteriores a 1995.

$$TRF = 120 \left( \frac{R_{\mu} + R_a + R_L + R_b + R_n}{120} \right)^{1,8} \quad (3)$$

Onde:

$$R_{\mu} = 83 \left[ 1 - \mu_{fi} \left( \frac{1 + \omega}{\frac{0,85}{\alpha_{cc}} + \omega} \right) \right]$$

$$R_a = 1,60 (c_1 - 30), c_1 \text{ em mm}$$

$$R_L = 9,60 (5 - \ell_{0,fi})$$

$$R_b = 0,36 b'$$

$$R_n = 0 \text{ para } n = 4, \text{ sendo } n \text{ o número de barras longitudinais}$$

$$R_n = 12 \text{ para } n > 4$$

Sendo:

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} \text{ a taxa mecânica}$$

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Sd,fi}}{N_{Rd}}$$

$N_{Sd,fi}$  é o valor de cálculo da força axial em situação do incêndio  
 $N_{Rd}$  é o valor de cálculo da força normal resistente do pilar à temperatura ambiente calculado de acordo com ABNT NBR 6118:2004 [14], com  $\gamma_m$  para temperatura ambiente, incluindo os efeitos da não-linearidade geométrica (2a. ordem) e uma excentricidade inicial igual à excentricidade de  $N_{Sd,fi}$ .

$c_{1min}$  é a menor distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo

$\ell_{0,fi}$  o comprimento efetivo (flambagem) do pilar em situação de incêndio em metro

$b' = 2 A_c / (b+h)$

$A_c$  é a área da seção transversal do pilar em milímetro quadrado

$b$  é a menor dimensão da seção transversal do pilar em milímetro

$h$  é a maior dimensão da seção transversal do pilar em milímetro

A eq. 3 está condicionada aos seguintes limites:

-  $A_s/A_c \leq 0,04$

-  $25 \text{ mm} \leq c_1 \leq 80 \text{ mm}$

-  $200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$

-  $h \leq 1,5 b$

-  $e \leq 0,15 b$  (excentricidade de primeira ordem)

-  $\ell_{0,fi} \leq 6 \text{ m}$

Onde

$A_s$  é a área total das armaduras

"e" é a excentricidade de primeira ordem da aplicação da força normal

### 3.1.1 Sobre a determinação de $R_{\mu}$

A partir da equação geral eq. 4 e da equação particular eq. 5, para  $\alpha_{cc} = 0,85$ , é possível deduzir a eq. 6.

$$N_{Rd\alpha} = f_{yd} A_s + \alpha_{cc} f_{cd} A_c \quad (4)$$

$$N_{Rd} = f_{yd} A_s + 0,85 f_{cd} A_c \quad (5)$$

$$\frac{N_{Rd\alpha}}{N_{Rd}} = \frac{1 + \omega}{\frac{0,85}{\alpha_{cc}} + \omega} \quad (6)$$

Admitindo-se  $\alpha_{cc} = 0,85$  (efeito deletério das cargas de longa duração, mais conhecido como efeito Rüschi, maturação do concreto e forma dos corpos de prova) a eq. 6 se simplifica e  $R_{\mu}$  pode ser calculado como  $R_{\mu} = 83 (1 - \mu_{fi})$ . Ressalte-se que a tabela 1 extraída da NBR 15200 foi construída a partir do Eurocode 2 que considerou  $\alpha_{cc} = 1,0$ , portanto, na próxima revisão da norma brasi-

leira os valores tabelados devem ser adaptados para a realidade brasileira, ou seja,  $\alpha_{cc} = 0,85$ .

A NBR 15200 sugere que  $N_{Sd,fi}$  possa ser avaliado por  $0,70 \times N_{Sd}$ . Dessa forma,  $\mu_{fi}$  será igual a  $0,70 \times N_{Sd}/N_{Rd}$ . Considerando-se, a favor da segurança,  $N_{Sd} = N_{Rd}$ , encontra-se  $\mu_{fi} = 0,7$  e finalmente a eq. 7.

$$R_{\mu} = 24,9 \quad (7)$$

### 3.1.2 Sobre a determinação de $R_a$

$c_1$  é a menor distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo. Quando as barras da armadura forem dispostas em camadas,  $c_1$  toma o valor da distância média à face do concreto ( $c_{1m}$ ). O valor de  $c_{1m}$  deve sempre ser o menor entre os seguintes valores:

$$c_{1m} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum c_{1xi} A_{si}}{\sum A_{si}} \\ \frac{\sum c_{1yi} A_{si}}{\sum A_{si}} \end{array} \right.$$

Onde  $c_{1xi}$  e  $c_{1yi}$  são as distâncias da barra  $i$ , de área  $A_{si}$ , à face aquecida mais próxima

No exemplo da figura 1, admitindo-se fogo nas quatro faces, tem-se:

$$c_{1xm} = \frac{c_{1x1} A_{s1} + c_{1x2} A_{s2} + c_{1x1} A_{s3}}{A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}}$$

$$e \quad c_{1ym} = \frac{(c_{1y1} + c_{1y2})(A_{s1} + A_{s2} + A_{s3})}{2(A_{s1} + A_{s2} + A_{s3})}$$

Se todos os diâmetros das armaduras forem iguais, resulta:

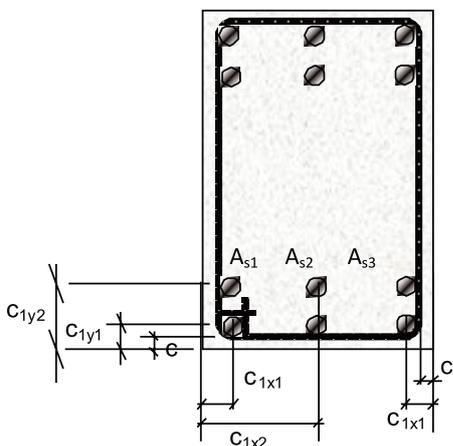
$$c_{1xm} = \frac{2 c_{1x1} + c_{1x2}}{3} \quad e \quad c_{1ym} = \frac{c_{1y1} + c_{1y2}}{2}$$

### 3.1.3 Sobre a determinação de $R_f$

O comprimento efetivo de um pilar em situação de incêndio  $\ell_{0,fi}$  pode ser suposto igual ao comprimento efetivo (flambagem) à temperatura ambiente  $\ell_0$  em todos os casos. Para as estruturas contraventadas de edifícios cujos andares sejam compartimentados, em que o TRRF seja maior do que 30 min, o comprimento efetivo  $\ell_0$  pode ser tomado como  $0,5 \ell$  para andares intermediários e  $0,7 \ell$  para o andar superior, onde  $\ell$  é o comprimento real (centro a centro) do pilar conforme figura 2 (Eurocode 2 [1]).

Portanto, para os pilares de edifícios de múltiplos andares, em que se supõe que o trecho pertencente ao compartimento em chamas está engastado nos andares frios superior e inferior e que o pilar do último andar tenha uma reserva estrutural superior aos demais andares,

**Figura 1 - Distância entre centro geométrico (CG) das armaduras e a face do concreto exposta ao fogo**



pode-se admitir que  $\ell_{0,fi} = \ell/2$  para todos os andares e, portanto, de forma simplificada,  $R_f$  pode ser calculado conforme a eq. 8.

$$R_f = 48 - 4,8 \ell \tag{8}$$

Onde  $\ell$  é o comprimento real do pilar em metro. Apesar de o biengastamento perfeito dos pilares nos andares frios ter sido contestado por pesquisadores internacionais (Wang [15];

Gomes et al. [16]; Rodrigues et al. [17]), resolveu-se manter essa simplificação neste texto, em vista de o Eurocode, base das principais normas brasileiras de estruturas, ainda o manter.

**3.1.4 Sobre a determinação de  $R_b$**

$R_b$  pode ser reescrito como:  $0,36 A_c/u$ , onde  $u$  o perímetro da seção transversal do pilar em milímetro. Seguindo-se as limitações para o uso da eq. 3, segundo o Eurocode 2 [1], a expressão para cálculo de  $R_b$  deve respeitar simultaneamente os limites das ineqs. 9.

$$50 \text{ mm} \leq A_c/u \leq 112,5 \text{ mm} \tag{9a}$$

$$h \leq 1,5 b \tag{9b}$$

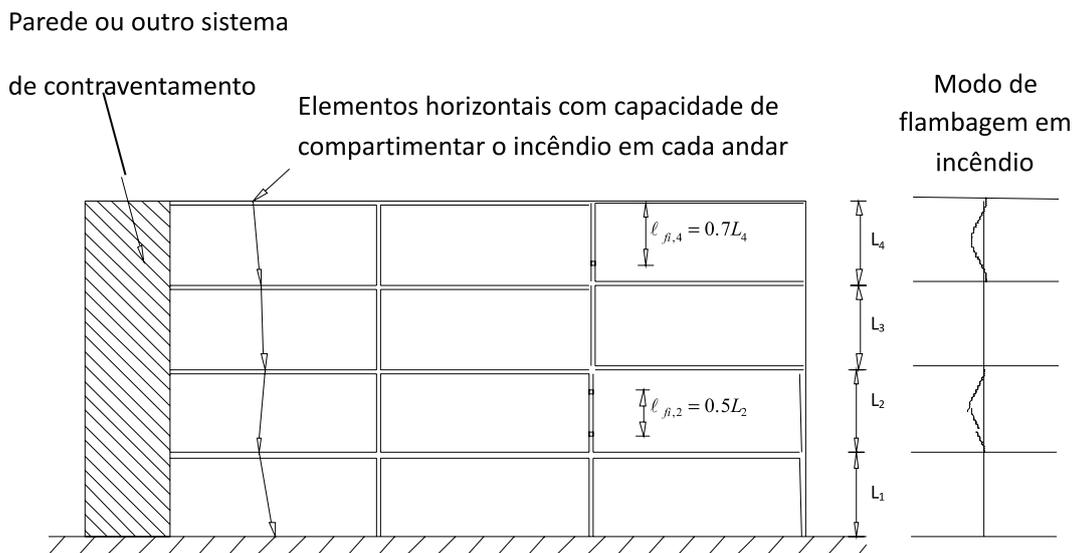
A inequação 9a pode ser reescrita sob a forma da inequação 10.

$$100 (b + h) \leq b h \leq 225 (b + h) \tag{10}$$

A inequação 9b pode ser reescrita sob a forma da inequação 11.

$$R_b \leq 0,108 b \tag{11}$$

**Figura 2 - Pilares de pavimento compartimentado engastado nos andares frios**



Separando-se a inequação 10, tem-se:

– Para  $100 \leq b \leq 200$ ,

$$h \geq \frac{100b}{b-100} \text{ e } h \geq \frac{225b}{b-225} \text{ a última inequação é automaticamente respeitada, visto que } h \text{ deve ser positivo. Então, basta verificar a primeira inequação, que pode ser reescrita da forma: } R_b \geq 18 \text{ mm}$$

– Para  $200 < b \leq 225$ ,

$$h \geq \frac{100b}{b-100} \text{ e } h \geq \frac{225b}{b-225} \text{ a primeira inequação é sempre respeitada visto que, por definição, } h \text{ é maior ou igual a } b \text{ e a segunda inequação é automaticamente respeitada visto que } h \text{ deve ser positivo.}$$

– Para  $225 < b \leq 375$ ,

$$\frac{100b}{b-100} \leq h \leq \frac{225b}{b-225} \text{ . Esse intervalo é sempre verificado em vista de que, } b \leq h \leq 1,5b.$$

– Para  $b > 375$ ,

$$\frac{100b}{b-100} \leq h \leq \frac{225b}{b-225} \text{ o limite inferior é sempre verificado em vista de } h \text{ ser, por definição, maior ou igual a } b. \text{ Então, basta verificar o limite superior que pode ser reescrito da forma: } R_b \leq 40,5 \text{ mm.}$$

Essa análise pode ser compreendida de forma gráfica na figura 3, em que a área hachureada representa o limite  $h \times b$  para a determinação de  $R_b$ .

Portanto, uma maneira mais simples de se apresentar o cálculo de  $R_b$  e suas limitações, seria da forma indicada pela ineq. 12.

$$18 \text{ mm} \leq R_b = 0,36 A_c/u \leq 40,5 \text{ mm or } 0,11 b \text{ (the smallest)} \quad (12)$$

Para  $b \geq 200$  mm, o limite inferior da eq. 12 sempre será respeitado. Para  $h = b = 190$  mm, valor comum no Brasil, o limite inferior dará 17,1 mm. O autor acredita que essa pequena variação no limite inferior não prejudica o uso do método.

### 3.2 Método B

A partir do método direto de dimensionamento de pilares de concreto, Izquierdo (ver início do item 3) construiu as tabelas 2 a 10, que estão inseridas no Eurocode 2 (2004). Essas tabelas indicam as dimensões mínimas e distância ( $c_s$ ) do eixo das barras à borda mais próxima para pilares de concreto armado, com seção retangular ou circular exposto ao fogo em mais de um lado.

Em pilares onde  $A_s \geq 0,02 A_c$ , é necessário uma distribuição uniforme das armaduras ao longo dos lados da seção para TRRF  $\geq 90$  min.

Nas tabelas 2 a 10 utilizam-se os seguintes símbolos:

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} \text{ – taxa mecânica de armadura}$$

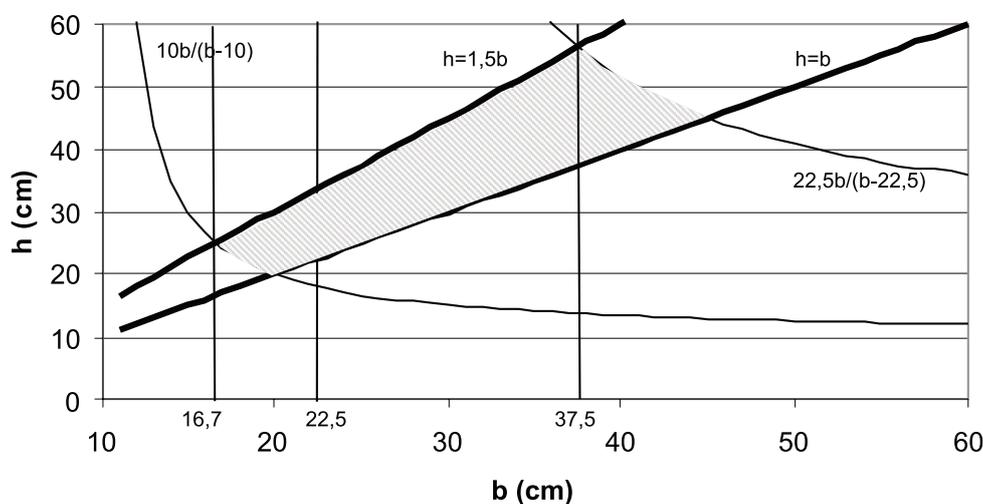
$$\eta = \frac{N_{0Sd}}{A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}} \text{ – nível de carregamento do pilar à temperatura ambiente}$$

$$e = \frac{M_{0Sd}}{N_{0Sd}} \text{ – excentricidade de primeira ordem à temperatura ambiente}$$

$A_s$  é a área total da seção das barras de aço.

$A_c$  é a área da seção de concreto;

Figura 3 – Limites para determinação de  $R_b$



$f_{yd}$  é o valor de cálculo da resistência do aço à temperatura ambiente

$\lambda_{fi} = \frac{l_{0,fi}}{r}$  é a esbeltez em situação de incêndio

$f_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$  é o valor de cálculo da resistência do concreto à compressão à temperatura ambiente

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$  é o raio de giração

$N_{osd}$  é o valor de cálculo do esforço normal de compressão de 1ª ordem à temperatura ambiente

(para seções retangulares  $r = \frac{h}{\sqrt{12}}$ )

$M_{osd}$  é o valor de cálculo do momento fletor de 1ª ordem à temperatura ambiente em situação de incêndio

**Tabela 2 -  $\omega = 0,1$ ;  $e = 0,025 b \leq 10 \text{ mm}$**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	150/25	150/25	150/25
	40	150/25	150/25	150/25	150/25
	50	150/25	150/25	150/25	200/25
60	30	150/25	150/25	200/25	200/30:250/25
	40	150/25	150/25	200/25	250/25
	50	150/25	200/25	250/25	300/25
90	30	150/25	200/25	200/50:250/25	250/30:300/25
	40	150/35:200/25	200/30:250/25	250/25	300/25
	50	200/25	250/25	300/25	350/50:400/25
120	30	200/25	250/25	250/25	300/45:350/25
	40	250/25	250/25	250/25	400/25
	50	250/25	300/25	350/50:400/25	450/50:500/25

**Tabela 3 -  $\omega = 0,1$ ;  $e = 0,25 b \geq 100 \text{ mm}$**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	150/25	200/30:250/25	300/30:350/25
	40	150/25	150/30:200/25	300/25	500/40:550/25
	50	150/25	200/40:250/25	350/40:500/25	550/25
60	30	150/30:200/25	200/40:300/25	300/40:500/25	500/25
	40	200/30:250/25	300/35:350/25	450/50:550/25	550/40:600/25
	50	200/40:300/25	350/45:550/25	550/30:600/30	600/55
90	30	200/40:250/25	300/40:400/25	500/50:550/25	550/40:600/25
	40	250/40:350/25	350/50:550/25	550/35:600/25	600/50
	50	300/40:500/25	500/60:550/25	600/40	(1)
120	30	250/50:350/25	400/50:550/25	550/25	550/60:600/45
	40	300/50:500/25	500/50:550/25	550/50:600/25	(1)
	50	400/50:550/25	550/50:600/25	600/60	(1)

(1) Width  $\geq 600 \text{ mm}$ . Specific analysis is required

**Tabela 4 -  $\omega = 0,1$  ;  $e = 0,5$   $b \leq 200$  mm**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	400/40:550/25	500/25	(1)
	40	200/25	550/25	550/35:600/30	(1)
	50	250/30:300/25	550/30:600/25	(1)	(1)
60	30	300/35:500/25	500/50:550/25	550/50:600/40	(1)
	40	350/40:550/25	550/40:600/30	(1)	(1)
	50	450/50:550/25	550/50:600/40	(1)	(1)
90	30	350/50:550/25	550/45:600/40	600/80	(1)
	40	500/60:600/30	550/60:600/50	(1)	(1)
	50	550/40	600/80	(1)	(1)
120	30	550/40:600/30	550/50	(1)	(1)
	40	550/50:600/45	600/70	(1)	(1)
	50	550/55:600/50	(1)	(1)	(1)

(1) Requer largura superior a 600 mm. Avaliação específica é requerida.

**Tabela 5 -  $\omega = 0,5$  ;  $e = 0,025$   $b \geq 10$  mm**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	150/25	150/25	150/25
	40	150/25	150/25	150/25	150/25
	50	150/25	150/25	150/25	200/25
60	30	150/25	150/25	150/30:200/25	200/35:250/25
	40	150/25	150/25	200/25	250/30:300/25
	50	150/25	150/35:200/25	200/40:250/25	250/40:350/25
90	30	150/25	150/40:200/25	200/40:250/25	250/40:300/25
	40	150/25	200/35:250/25	250/30:300/25	300/40:400/25
	50	150/40:200/25	200/45:250/25	250/45:350/25	350/45:550/25
120	30	150/35:200/25	200/40:250/25	250/45:300/25	350/45:500/25
	40	200/25	250/25	300/45:350/25	400/50:550/25
	50	200/40:250/25	250/45:300/25	350/45:450/25	450/50:600/25

Tabela 6 -  $\omega = 0,5$  ;  $e = 0,25$   $b < 100$  mm

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	150/25	150/25	200/30:250/25
	40	150/25	150/25	150/25	300/45:350/25
	50	150/25	150/25	200/30:250/25	350/40:450/25
60	30	150/25	150/35:200/25	250/35:350/25	350/40:550/25
	40	150/25	200/30:300/25	300/35:500/25	450/50:600/30
	50	150/30:200/25	200/40:350/25	300/45:550/25	500/50:600/35
90	30	150/35:200/25	200/45:300/25	300/45:550/25	550/50:600/40
	40	200/35:250/25	250/45:500/25	350/50:600/25	550/50:600/45
	50	200/40:300/25	300/45:550/25	550/50:600/35	600/55
120	30	200/45:300/25	300/45:550/25	450/50:600/25	550/60:600/50
	40	200/50:350/25	350/50:550/25	500/50:600/40	600/55
	50	250/45:450/25	450/50:600/25	550/55:550/45	600/80

Tabela 7 -  $\omega = 0,5$  ;  $e = 0,5$   $b \leq 200$  mm

TRF (min)	$\lambda$	$b_{min} / c_1$			
		n = 0,15	n = 0,3	n = 0,5	n = 0,7
30	30	150/25	150/25	250/35:300/25	500/40:500/25
	40	150/25	150/30:200/25	300/35:450/25	550/30
	50	150/25	200/30:250/25	400/40:500/25	550/50:600/40
60	30	150/30:200/25	200/40:450/25	450/50:550/30	550/50:600/40
	40	150/35:250/25	250/40:500/25	500/40:550/35	600/60
	50	200/35:300/25	30/45:550/25	500/55:550/40	(1)
90	30	250/40:450/25	300/50:500/25	500/55:600/40	600/80
	40	200/50:500/25	350/50:550/35	550/60:600/50	(1)
	50	250/45:550/25	500/45:550/40	600/60	(1)
120	30	250/50:550/25	500/50:550/40	550/50	(1)
	40	300/50:600/25	500/55:550/45	550/60:600/55	(1)
	50	400/50:550/35	500/60:600/45	600/80	(1)

(1) Requer largura superior a 600 mm. Avaliação específica é requerida.

**Tabela 8 -  $\omega = 1,0$  ;  $e = 0,025 b \geq 10 \text{ mm}$**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{\min} / c_1$			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
30	30	150/25	150/25	150/25	150/25
	40	150/25	150/25	150/25	150/25
	50	150/25	150/25	150/25	150/30:200/25
60	30	150/25	150/25	150/25	200/40:300/25
	40	150/25	150/25	200/30:250/25	250/35:350/25
	50	150/25	150/30:200/25	200/40:250/25	250/40:350/25
90	30	150/25	200/25	200/40:250/25	250/45:600/25
	40	150/25	200/35:250/25	250/35:350/25	300/45:600/30
	50	150/35:200/25	200/40:250/25	50/45:400/25	350/45:600/35
120	30	150/40:200/25	200/45:250/25	250/40:400/25	400/40:600/25
	40	200/30:250/25	250/25	300/45:400/25	400/50:600/30
	50	200/40:250/25	250/35:300/25	350/40:550/25	550/45:600/40

(1) Requer largura superior a 600 mm. Avaliação específica é requerida.

**Tabela 9 -  $\omega = 1,0$ ;  $e = 0,25 b < 100 \text{ mm}$**

TRF (min)	$\lambda$	$b_{\min} / c_1$			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
30	30	150/25	150/25	150/25	200/30:300/25
	40	150/25	150/25	150/25	250/30:450/25
	50	150/25	150/25	200/25	300/35:500/25
60	30	150/25	150/30:200/25	200/40:400/25	300/50:600/30
	40	150/25	150/40:250/25	250/40:500/25	400/50:600/35
	50	150/25	200/35:400/25	300/40:600/25	500/45:600/40
90	30	200/25	200/40:300/25	250/40:550/25	500/50:600/45
	40	200/30:250/25	200/50:400/25	300/50:600/35	500/60:600/50
	50	200/35:300/25	250/50:550/25	400/50:600/40	600/55
120	30	200/40:250/25	250/50:400/25	450/45:600/30	600/60
	40	200/45:300/25	300/40:500/25	500/50:600/35	(1)
	50	250/40:400/25	400/40:550/25	550/50:600/45	(1)

(1) Requer largura superior a 600 mm. Avaliação específica é requerida.

Tabela 10 -  $\omega = 1,0$  ;  $e = 0,5$   $b \leq 200$  mm

TRF (min)	$\lambda$	$b_{\min}/c_1$			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
30	30	150/25	150/25	200/30:300/25	500/30:550/25
	40	150/25	150/25	250/30:450/25	500/40:600/30
	50	150/25	150/30:200/25	300/35:500/25	550/35
60	30	150/25	200/35:450/25	350/40:600/30	550/45:600/40
	40	150/30:200/25	200/40:500/25	450/50:500/35	600/60
	50	150/35:250/25	250/40:550/25	500/40:600/35	600/80
90	30	200/35:300/25	250/50:550/25	500/50:600/40	600/70
	40	200/40:450/25	300/50:600/30	500/55:600/45	(1)
	50	200/45:500/25	350/50:600/35	550/50	(1)
120	30	200/50:450/25	450/450:600/25	550/55:600/50	(1)
	40	250/50:500/25	500/40:600/30	600/65	(1)
	50	300/40:550/25	500/50:600/35	(1)	(1)

(1) Requer largura superior a 600 mm. Avaliação específica é requerida.

#### 4. Proposta de métodos de dimensionamento alternativos aos da NBR 15200

##### 4.1 Método analítico simplificado

A partir da eq. 3, admitindo-se:  $\mu_{fi} = 0,7$ ,  $\alpha_{cc} = 0,85$  e que o limite

$$\begin{aligned} TFR &= 120 \left( \frac{R_{\mu} + R_a + R_L + R_b + R_n}{120} \right)^{1,8} = \\ &= \left[ 120^{(1,8-1)} \left( 24,9 + 1,6 c_1 - 48 + 48 - 9,6 \ell_{0,fi} + 0,18 \left( \frac{b h}{b+h} \right) + R_n \right) \right]^{1,8} = \\ &= \left[ 2,966 + 0,1906 c_1 - 1,1434 \ell_{0,fi} + 0,0214 \left( \frac{h}{\frac{h}{b}+1} \right) + 0,119 R_n \right]^{1,8} \cong \\ &= \left[ 3 + 0,2 c_1 - 1,15 \ell_{0,fi} + 0,021 \left( \frac{h}{\frac{h}{b}+1} \right) + 10 \frac{R_n}{12} \right]^{1,8} \end{aligned}$$

inferior da eq. 12 é aceito para  $b = 190$  mm, tem-se :

$$TRF = \left[ 3 + \frac{h}{50 \left( \frac{h}{b} + 1 \right)} + \frac{c_1}{5} - 1,15 \ell_{0,fi} + 10 N \right]^{1,8} \quad (13)$$

Simplificando-se, resulta a eq. 13.

Onde:

TRF - tempo de resistência ao fogo do pilar em minuto;

$h$  - maior dimensão do pilar em milímetro. Para  $h \geq 1,5 b$ , usar  $h = 1,5 b$

$b$  - menor dimensão do pilar em milímetro

$$\text{Para } \frac{h}{\frac{h}{b}+1} \geq 225 \text{ m} \quad \text{usar } \frac{h}{\frac{h}{b}+1} = 225 \text{ m}$$

$c_1$  - distância entre o centro geométrico das barras e a face aquecida mais próxima em milímetro

$\ell_{0,fi}$  - comprimento efetivo (flambagem) em situação de incêndio do pilar em metro (ver item 2.1.3)

$N=0$  se o número de barras longitudinais for igual a 4

$N=1/7$  se o número de barras longitudinais for maior do que 4

A eq. 13 é válida para:

- $b \geq 190$  mm
- $\ell_{0,fi} \leq 6$  m
- $\mu_{fi} \leq 0,7$
- $A_s/A_c \leq 0,04$
- $25 \text{ mm} \leq c_1 \leq 80$  mm
- $e \leq 0,15 b$
- $\alpha_{cc} = 0,85$

À figura 4 são apresentados os resultados de uma análise paramétrica do TRF em função de  $b$ ,  $L$  (real),  $c_1$ ,  $\mu_{fi}$  e número de barras. Os valores básicos para essa análise foram: 30 cm, 4 m, 40 mm, 0,7 e 4 barras, respectivamente,  $h = 1,5 b$  e  $\ell_{0,fi} = \ell/2$ . Essa análise serviu também para comparar os resultados por meio da eq. 3 (Eurocode 2) e da eq. 13, aqui sugerida para fins de normatização. Como se pode notar o TRF varia sensivelmente com a variação dos parâmetros. Os resultados obtidos pela eq. 13 são ligeiramente contra a segurança se confrontados com Eurocode 2 [1], mas em vista de simplicidade do método é perfeitamente justificável.

##### 4.2 Proposta de um novo método tabular

A tabela 1 da ABNT NBR 15200:2004 foi construída a partir do Método A, considerando-se limites extremos de dimensões, entre eles  $\ell_{0,fi} \leq 3$  m, o que para pilares intermediários de edifícios de múltiplos andares significa 6 m de comprimento real. É possível, portanto, construir-se tabelas mais econômicas, optando-se por outros limites menos arrojados do que aqueles da tabela 1,

respeitado o campo de validade da eq. 3, em especial a pequena excentricidade. Para pilares com maior excentricidade recomenda-se empregar o método B.

A partir dos métodos A e B é possível criar-se a tabela 11, que se propõe tenha uso imediato nos projetos de concreto armado e que seja considerada em futura revisão da ABNT NBR 15200, em vista de:

- ser mais econômica do que a tabela 1 (extraída da ABNT NBR 15200:2004) para casos correntes
- enquadrar-se nos métodos mais precisos permitidos pela norma brasileira
- envolver a maioria dos casos correntes de pilares de edifícios
- incluir as limitações de validade da tabela 1 não explicitadas na ABNT NBR 15200:2004

Para a construção da coluna referente a “ $e \leq 0,15 b$ ” foi empregada a expressão do método A do Eurocode 2, com as seguintes hipóteses:

$$h = b$$

$$\mu_{fi} = 0,7$$

$$\ell = 4 \text{ m}$$

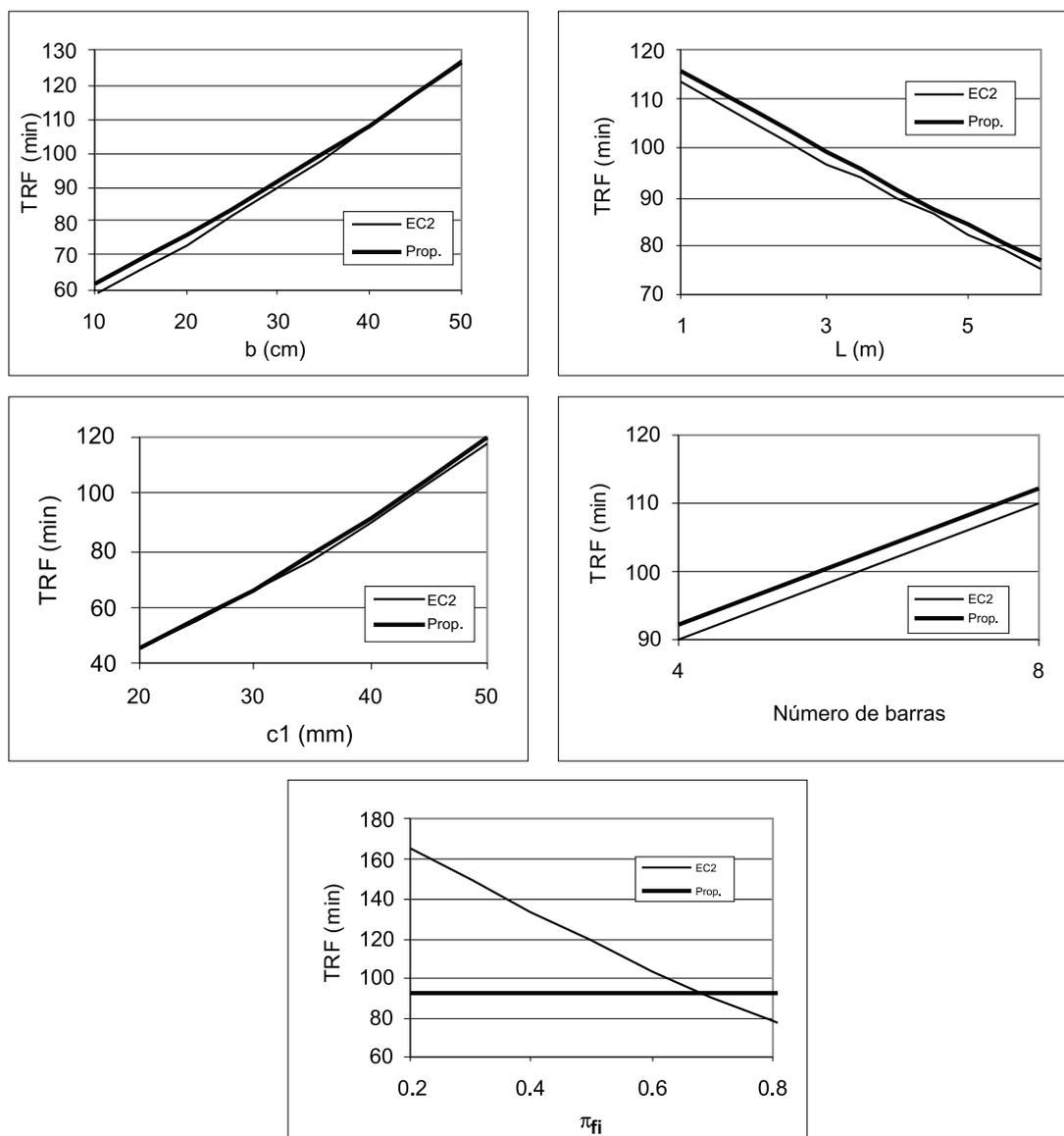
$$\ell_{o,fi} = \ell / 2$$

$$\alpha_{cc} = 0,85$$

Para a construção da coluna referente a “ $e \leq 0,25 b$ ” foi empregado o método B do Eurocode 2.

Devem ser respeitadas as limitações indicadas na tabela 11. Demais limitações citadas neste trabalho são automaticamente verificadas se usados os valores da tabela.

**Figura 4 - Variação do tempo de resistência ao fogo (TRF) de um pilar com a largura comprimento, distância do CG, número de barras e nível de carregamento**





- estruturais - Determinação da resistência ao fogo. NBR 5628. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- [07] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. ISO 834. Geneva: ISO/TC, 1990. [Revision of first edition (ISO 834:1975)]
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações. NBR 14432. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Ações e segurança nas estruturas. NBR 8681. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [10] FRANSSEN, J.-M. Design of concrete columns based on EC2 tabulated data – a critical review. In: Structures in fire – proceedings of the first international workshop. 2nd edition. Copenhagen: University of Liege/Danish Institute of Fire Technology/CIB-W14 Fire, 2000.
- [11] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design. prEN 1992-1-2. Brussels: CEN, 1995.
- [12] COSTA, C. N. Estruturas de concreto em situação de incêndio. São Paulo: PEF-EPUSP, 2002. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo]
- [13] COSTA, C. N. Trial of the tabular “A” method of the Eurocode 2-1-2:2004 for the fire of reinforced columns. Final Report. Manchester: MACE-UMIST. 2006
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [15] WANG, Y. C. Steel and Composite Structures. Behaviour and Design for Fire Safety. Spon press. London. 2002.
- [16] GOMES, F. C. T.; PROVIDÊNCIA, P.; RODRIGUES, J. P. C.; NEVES, I. C. Buckling Length of a Steel Column for Fire Design. Engineering Structures, DOI:10.1016. 2007.
- [17] RODRIGUES, J. P. C.; PROVIDÊNCIA, P.; NEVES, I. C.; GOMES, F. C. T. Factores que influenciam a encurvadura de pilares de aço em caso de incêndio. CMNE/CILAMCE 2007, Porto, 13 a 15 de Junho, 2007, Portugal 2007.