

# Determination of the ULS, for columns with small dimensions, under biaxial bending and symmetrical fire conditions

## *Determinação do ELU, para pilares com pequenas dimensões, sob flexão composta oblíqua e incêndio simétrico*



M. CHEREM<sup>a</sup>  
cherem@usp.br

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

### Abstract

Obtaining internal load capacity, in reinforced concrete sections, at ambient temperature, under biaxial bending, is one of the most common tasks done by structural engineers, but not so common when the member is in fire situation. The intention of this paper is to show that is possible to correlate the ultimate limit state (ULS), in fire situation, with ULS at ambient temperature, for square cross sections under fire from all faces. To reach the purpose and give support to the numerical analysis of this article, a computer program, in Delphi language, called COL FIRE, is being developed by the authors.

**Keywords:** fire, columns, ultimate limit state, ULS, interaction diagram.

### Resumo

A obtenção dos esforços internos resistentes, em seções de concreto armado, à temperatura ambiente, sob flexão composta oblíqua, é uma das tarefas mais comuns realizadas por engenheiros de estruturas, mas não tão comum quando o elemento está submetido a ação de incêndio. O objetivo deste artigo é ilustrar que é possível correlacionar o estado-limite último (ELU), em situação de incêndio, ao ELU à temperatura ambiente, para seções quadradas sob incêndio em todas as faces. Para atingir o propósito e dar suporte à análise numérica deste artigo, um programa de computador, em linguagem Delphi, chamado COL FIRE, está em desenvolvimento pelos autores.

**Palavras-chave:** incêndio, pilares, estado-limite último, ELU, diagrama de interação.

<sup>a</sup> Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, SP, Brasil.

## 1. Introdução

A obtenção do estado-limite último (ELU), em situação de incêndio, tanto para flexão composta normal (FCN), quanto para flexão composta oblíqua (FCO), já foi apresentada por alguns autores como, por exemplo, EL-FITIANY S.F.; YOUSSEF M.A. [3]), MO-REIRA A. M. M. M. [8], LAW A.; GILLIE M. [7] e RODRIGUEZ J.; ARISTIZABAL-OCHOA J. D. [9]. Essa análise, entretanto, é relativamente complicada e impossível de ser conseguida sem um programa computacional específico de análise de incêndio.

Há ainda métodos simplificados de cálculo, como, por exemplo, o método da Método da Isoterma de 500° C, ilustrado no EN 1992-1-2 [4], porém, esses métodos também dependem de análise térmica, que muitas vezes não está disponível aos engenheiros de estruturas nos escritórios de cálculo.

Em todas publicações pesquisadas, nacionais ou internacionais, não foi encontrada qualquer uma que correlacione resultados calculados para a situação de incêndio com aqueles encontrados à temperatura ambiente. O objetivo dos autores é mostrar que é possível criar um método simplificado para determinar o estado-limite último (ELU) em situação do incêndio, sem qualquer análise térmica ou código computacional demasiadamente requintado, tendo por base apenas o estado-limite último (ELU), obtido à temperatura ambiente, cuja determinação já foi muito bem difundida no meio técnico.

A escolha pelas seções quadradas de pequenas dimensões tem como objetivo principal servir de base para análise de pilares encontrados em indústrias, galpões e pequenos edifícios residenciais. Também pode ser entendida como ponto de partida para avanços desta pesquisa para seções de pilares com diferentes formas e dimensões a serem feitos em trabalhos futuros.

## 2. A análise de incêndio com métodos avançados de cálculo

Conforme o EN 1992-1-2 [4], os métodos avançados de cálculo devem prover uma análise realista das estruturas expostas ao incêndio. Essas análises têm por base comportamentos físicos

fundamentais que conduzem a uma aproximação confiável da resposta esperada para o elemento estrutural sob a ação de incêndio. Os métodos avançados de cálculo devem incluir modelos de cálculo para determinação do:

- desenvolvimento e distribuição da temperatura no interior do elemento estrutural (modelo de resposta térmica);
- comportamento mecânico da estrutura (modelo de respostas mecânica).

Os métodos avançados de cálculo podem ser usados associados a qualquer curva de aquecimento (tempo-temperatura), desde que as propriedades mecânicas dos materiais sejam conhecidas no intervalo de temperaturas obtidas.

Os métodos avançados de cálculo ainda podem ser usados para qualquer tipo de seção transversal.

### 2.1 O campo de temperaturas

Em uma análise de uma seção transversal plana, o processo inicial, em qualquer análise que envolva incêndio, é estabelecer a curva de incêndio (tempo-temperatura) ao qual o elemento estrutural estará submetido e quais as faces da seção transversal estarão submetidas a atuação do incêndio proposto.

Utiliza-se, para a análise aqui proposta, a curva da ISO – 834 [6], também conhecida como curva de incêndio-padrão.

Com a curva tempo-temperatura estabelecida e todas as faces (quatro) submetidas a incêndio, determina-se a temperatura  $\theta(t)$  de cada ponto da seção transversal, a cada instante de tempo desejado  $t$ . Para tal feito é necessário recorrer a uma análise numérica, com base no método dos elementos finitos aplicado à transmissão de calor. Neste trabalho, essa etapa conta com o auxílio do programa computacional *SuperTempcalc*, desenvolvido pelo sueco Dr. Yngve. Anderberg [5]. Um exemplo de resultados pode ser visualizado na Figura 1.

O *SuperTempcalc* é um programa de análise térmica, bidimensional, não linear, em regime transiente, que incorpora propriedades térmicas dos materiais, as quais são variáveis em função da temperatura, na equação diferencial de transferência de calor. O calor por convecção e radiação no contorno do elemento pode ser

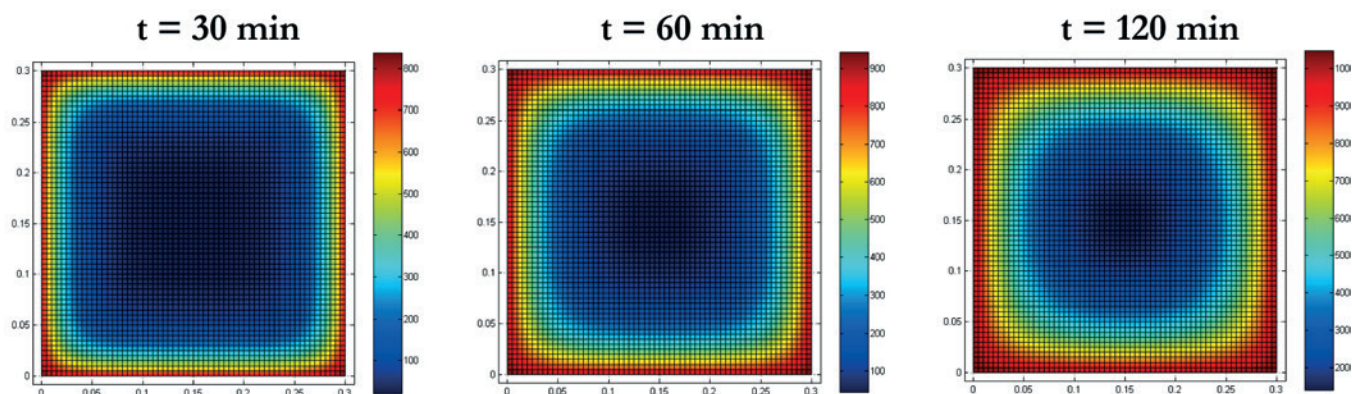
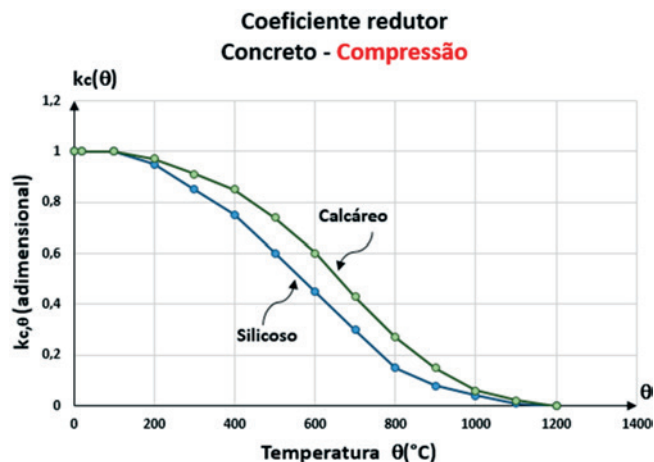


Figura 1

Resultados do programa *SuperTempcalc* (5), para uma seção transversal quadrada de 30x30 cm, em diversos tempos de incêndio



**Figura 2**  
Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura

modelado em função do tempo. O programa foi validado contra inúmeros resultados experimentais a partir de 1985 e sua confiabilidade é largamente reconhecida, tendo sido usado para elaboração da norma europeia [4].

Dá-se o nome de campo de temperaturas ao conjunto distinto de valores de temperatura relacionados a cada ponto da seção transversal em um determinado instante de tempo 't'.

Geralmente, em estruturas de concreto armado, para a análise de transferência de calor pelo método dos elementos finitos, assume-se que a temperatura de cada barra 'θ<sub>bi</sub>' seja a mesma temperatura 'θ<sub>i</sub>' obtida na posição de seu centro geométrico na seção transversal.

## 2.2 Comportamento mecânico do concreto em situação de incêndio

### 2.2.1 Resistência à compressão do concreto na temperatura θ

Conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], a resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 2, podendo ser obtida pela Equação 1.

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck} \quad (1)$$

Na Equação 1,  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto em situação normal;  $k_{c,\theta}$  é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ, conforme Tabela 1.

Permite-se estimar a capacidade do concreto, nos elementos estruturais em situação de incêndio, a partir da resistência à compressão na temperatura θ.

**Tabela 1**

Valores da relação  $f_{c,\theta}/f_{ck}$  para concretos de massa específica normal

	Agregado silicoso	Agregado calcário
θ (°C)	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,6
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	-	-

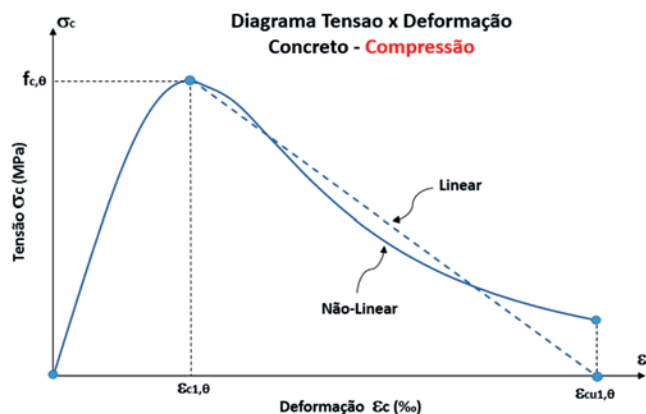
Fonte: EN 1992-1-2 (4) e SILVA (10)

### 2.2.2 Relação tensão-deformação na compressão

As propriedades da relação tensão-deformação de concretos carregados uniaxialmente a elevadas temperaturas devem ser obtidas pela relação tensão-deformação exibidas na Figura 3.

A relação tensão-deformação dada na Figura 3 é definida por três parâmetros:

- Resistência a compressão  $f_{c,\theta}$ ;
- A deformação  $\epsilon_{c1,\theta}$  correspondente ao valor de tensão  $f_{c,\theta}$ ;



**Figura 3**  
Diagrama Tensão-Deformado do concreto à compressão

**Tabela 2**

Parâmetros para a relação tensão-deformação

$\theta$ (°C)	$\varepsilon_{c1,\theta}$ (‰)	$\varepsilon_{cu1,\theta}$ (‰)
20	2,5	20
100	4,0	22,5
200	5,5	25
300	7,0	27,5
400	10	30
500	15	32,5
600	25	35
700	25	37,5
800	25	40
900	25	42,5
1000	25	45
1100	25	47,5
1200	-	-

Fonte: EN 1992-1-2 (4) e SILVA (10)

■ A deformação  $\varepsilon_{cu1,\theta}$  correspondente ao valor de deformação última no concreto.

Valores para cada um desses parâmetros, em função da temperatura, são dados na Tabela 2. Para valores intermediários pode-se recorrer à interpolação linear.

Os parâmetros especificados na Tabela 2 devem ser usados para concreto de densidade específica normal com agregados silicosos ou calcáreos (contém, no mínimo, 80% de agregado calcário em peso).

Conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], o trecho ascendente do diagrama pode ser descrito pela Equação 2.

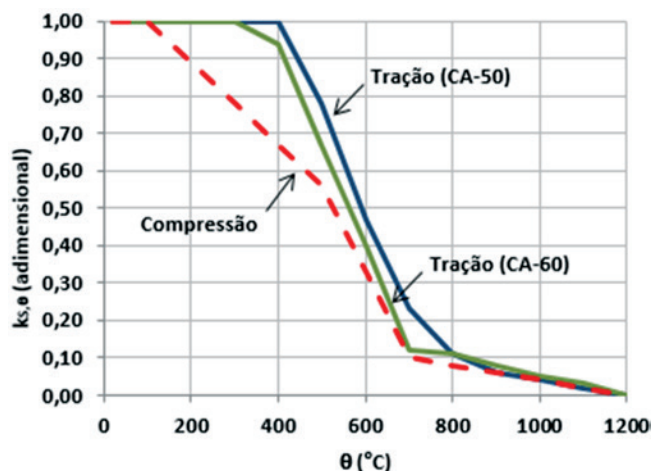
$$\sigma_c = \frac{3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left[ 2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right]} \quad (2)$$

O trecho descendente do diagrama pode ser descrito pela mesma relação do ramo ascendente ou, opcionalmente, como um trecho linear, conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], conforme Equações 3 e 4.

$$\text{Não linear: } \sigma_c = \frac{3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left[ 2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right]} \quad (3)$$

$$\text{Linear: } \sigma_c = \frac{(\varepsilon_{cu1,\theta} - \varepsilon_c)}{(\varepsilon_{cu1,\theta} - \varepsilon_{c1,\theta})} \cdot f_{c,\theta} \quad (4)$$

Ainda segundo EN 1992-1-2 [4], possíveis ganhos de resistência do concreto na fase de resfriamento não devem ser levados em conta.

**Figura 4**

Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura

### 2.3 Comportamento mecânico do aço em situação de incêndio

#### 2.3.1 Resistência ao escoamento na temperatura $\theta$

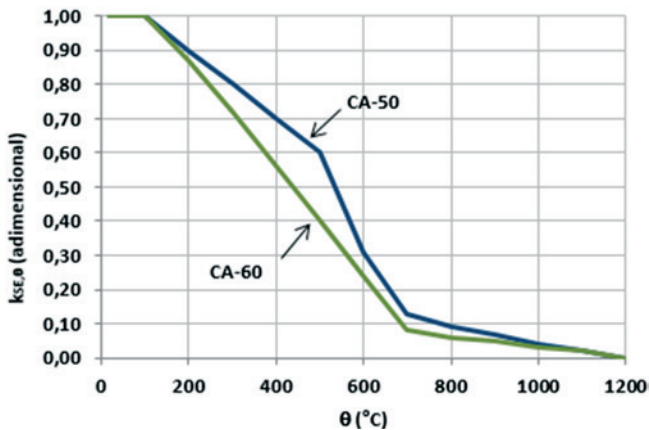
Conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], a resistência ao escoamento do aço da armadura passiva decresce com o aumento da

**Tabela 3**

Valores da relação  $f_{y,\theta}/f_{yk}$  para aços de armadura passiva

$\theta$ (°C)	$f_{y,\theta}/f_{yk}$		
	Tração	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89
300	1,00	1,00	0,78
400	1,00	0,94	0,67
500	0,78	0,67	0,56
600	0,47	0,40	0,33
700	0,23	0,12	0,10
800	0,11	0,11	0,08
900	0,06	0,08	0,06
1000	0,04	0,05	0,04
1100	0,02	0,03	0,02
1200	0,00	0,00	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200 (2), EN 1992-1-2 (4) e SILVA (10)



**Figura 5**  
Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura

temperatura, conforme mostrado na Figura 4, podendo ser obtida pela seguinte Equação 5.

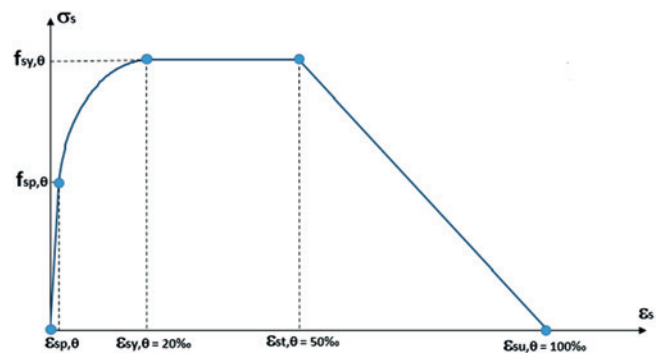
$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} \cdot f_{yk} \quad (5)$$

Na Equação 5,  $f_{yk}$  é a resistência característica do aço de armadura passiva em situação normal,

**Tabela 4**  
Valores da relação  $E_{s,\theta}/E_s$  para aços de armadura passiva

$\theta$ (°C)	$E_{s,\theta}/E_s$	
	CA-50	CA-60
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200 (2), EN 1992-1-2 (4) e SILVA (10)



**Figura 6**  
Relação tensão-deformação para os aços de armadura passiva

$k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência do aço na temperatura  $\theta$ , conforme Tabela 3.

- curva cheia:  $k_{s,\theta}$  aplicável quando  $\epsilon_{si} \geq 2\%$ , usualmente armaduras tracionadas de vigas, lajes ou tirantes;
- curva tracejada:  $k_{s,\theta}$  aplicável quando  $\epsilon_{si} < 2\%$ , usualmente armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

### 2.3.2 Módulo de elasticidade na temperatura $\theta$

Conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], o módulo de elasticidade do aço da armadura passiva decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 5, podendo ser obtido pela Equação 6.

$$E_{s,\theta} = k_{sE,\theta} \cdot E_s \quad (6)$$

Na Equação 6,  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em situação normal,

$k_{sE,\theta}$  é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura  $\theta$ , conforme Tabela 4.

### 2.3.3 Relação tensão-deformação na temperatura $\theta$

As propriedades da relação tensão-deformação dos aços de armadura passiva a elevadas temperaturas devem ser obtidas pela relação tensão-deformação exibidas na Figura 6.

A relação tensão-deformação dada na Figura 6 é definida por quatro parâmetros:

- A deformação  $\epsilon_{sp,\theta}$  correspondente ao valor de tensão  $f_{sp,\theta}$  (limite de proporcionalidade);
- A deformação  $\epsilon_{sy,\theta}$  correspondente ao valor de tensão  $f_{sy,\theta}$  (resistência ao escoamento);
- A deformação  $\epsilon_{st,\theta}$  correspondente ao valor de tensão  $f_{sy,\theta}$  (término do patamar);
- A deformação  $\epsilon_{su,\theta}$  correspondente ao valor de deformação última no aço.

Conforme disposto no EN 1992-1-2 [4], os quatro diferentes trechos do diagrama tensão-deformação podem ser descritos pelas Equações 7 a 10.

$$\text{Para } 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{sp,\theta}: \quad \sigma_s = E_{s,\theta} \cdot \varepsilon_s \quad (7)$$

$$\text{Para } \varepsilon_{sp,\theta} < \varepsilon_s < \varepsilon_{sy,\theta}: \quad \sigma_s = f_{sp,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2} \quad (8)$$

$$\text{Para } \varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st,\theta}: \quad \sigma_s = f_{sy,\theta} \quad (9)$$

$$\text{Para } \varepsilon_{st,\theta} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su,\theta}: \quad \sigma_s = \frac{(\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_s)}{(\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})} \cdot f_{sy,\theta} \quad (10)$$

Na Equação 8, os valores dos coeficientes a, b e c são dados pelas Equações 11 a 13.

$$c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})} \quad (11)$$

$$a = \sqrt{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) \left( \varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + \frac{c}{E_{s,\theta}} \right)} \quad (12)$$

$$b = \sqrt{c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2} \quad (13)$$

#### 2.4 Os esforços internos solicitantes

O terno de esforços internos solicitantes ( $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ) é obtido pela integração dos valores das tensões ao longo da seção transversal, com a observação de que, sabidamente, as tensões são funções das deformações que, por sua vez, são funções das temperaturas, que, mais uma vez, são funções do tempo 't'.

$$N = \sum \sigma_{ci,\theta}(\varepsilon_{ci,\theta}(t_i)) \cdot A_{ci} + \sum \sigma_{si,\theta}(\varepsilon_{si,\theta}(t_i)) \cdot A_{si} \quad (14)$$

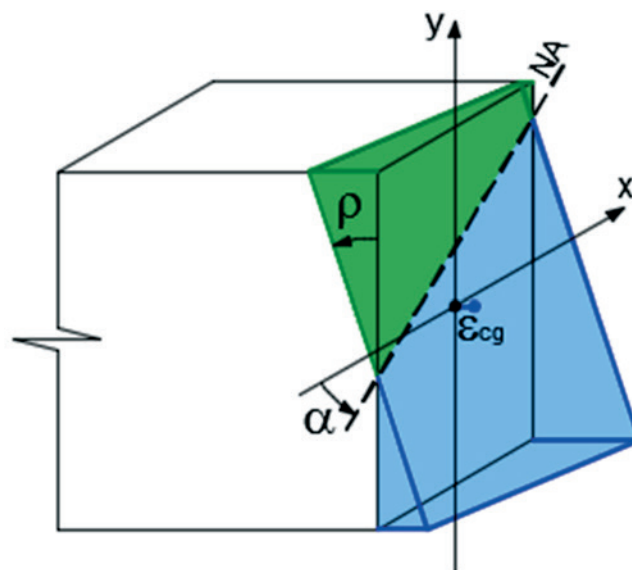
$$M_x = -\sum \sigma_{ci,\theta}(\varepsilon_{ci,\theta}(t_i)) \cdot y_{ci} \cdot A_{ci} - \sum \sigma_{si,\theta}(\varepsilon_{si,\theta}(t_i)) \cdot y_{si} \cdot A_{si} \quad (15)$$

$$M_y = \sum \sigma_{ci,\theta}(\varepsilon_{ci,\theta}(t_i)) \cdot x_{ci} \cdot A_{ci} + \sum \sigma_{si,\theta}(\varepsilon_{si,\theta}(t_i)) \cdot x_{si} \cdot A_{si} \quad (16)$$

#### 2.5 O universo possível de resultados – superfície de interação

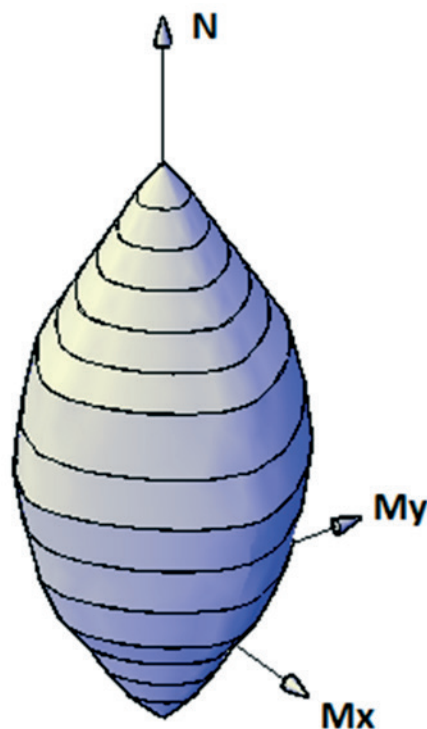
Para determinar o terno de esforços ( $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ) de uma seção transversal, em um determinado tempo 't' de incêndio, é necessário impor três parâmetros para a seção transversal: a inclinação da linha neutra ( $\alpha$ ), a curvatura da seção transversal ( $\rho$ ) e a deformação do centro geométrico ( $\varepsilon_{cg}$ ), conforme ilustrado na Figura 7. Vale lembrar que a imposição de quaisquer três valores ( $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon_{cg}$ ) corresponde a um único e exclusivo terno de esforços ( $N$ ,  $M_x$  e  $M_y$ ). Por outro lado, é praticamente impossível fixar valores de curvatura e deformação do centro geométrico que conduzam ao estado-limite último (ELU).

Na análise em incêndio, os valores são variáveis, funções da tem-



**Figura 7**  
Parâmetros que definem o terno de esforços ( $N$ ,  $M_x$  e  $M_y$ )

peratura, o que torna impossível determinar os valores exatos. O que se propõe, nesse caso, é fazer a variação dos parâmetros mencionados até valores suficientemente elevados, de modo que o estado-limite último apareça naturalmente.



**Figura 8**  
Universo de resultados variando os três parâmetros ( $\alpha$ ,  $\rho$  e  $\varepsilon_{cg}$ )

- Inclinação da linha neutra ( $\alpha$ ): variando de 0 a 360° ;
  - Curvatura da seção transversal ( $\rho$ ):  $0 \leq \rho \leq \rho_{\text{máx}}$  ;
  - Deformação do centro geométrico ( $\varepsilon_{\text{cg}}$ ):  $\varepsilon_{\text{cg,min}} \leq \varepsilon_{\text{cg}} \leq \varepsilon_{\text{cg,máx}}$  .
- O universo de resultados possíveis pode ser visualizado na Figura 8.

## 2.6 Forças normais limites

Para uma seção retangular de concreto armado, a máxima força normal resistente ( $N_{\text{Rd}}$ ) e, obviamente, a máxima força normal solicitante ( $N_{\text{Sd}}$ ) que pode ser aplicada, à temperatura ambiente, fica compreendida no intervalo determinado pelas Equações 17 e 18.

$$N_{\text{Rd,min}} = -A_s \cdot f_{\text{yd}} \quad (17)$$

$$N_{\text{Rd,máx}} = A_c \cdot f_{\text{cd}} + A_s \cdot \sigma_{\text{s,ec2}} \quad (18)$$

Na Equação 17,

$A_s$  é a área total de armadura na seção transversal

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

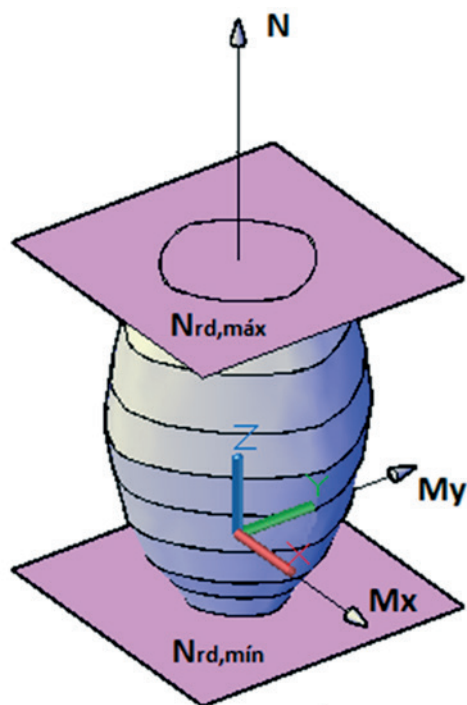
Na Equação 18,

$A_c$  é a área de concreto na seção transversal

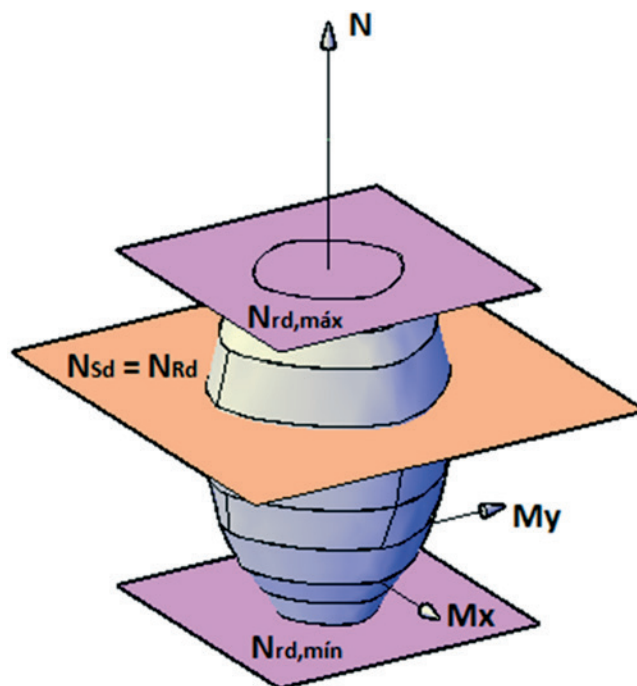
$f_{\text{cd}}$  é o valor da resistência à compressão de cálculo do concreto, à temperatura ambiente

$\sigma_{\text{s,ec2}}$  é o valor da tensão de compressão do aço, correspondente a deformação de compressão  $\varepsilon_{\text{c1}}$  do concreto, à temperatura ambiente

A inserção destes dois valores na superfície de interação repre-



**Figura 9**  
Universo de casos limitado pelas forças normais limites



**Figura 10**  
Plano de corte na normal de interesse

sentam dois planos limitantes, conforme Figura 9.

Nos projetos usuais de estruturas, a força normal solicitante ( $N_{\text{Sd}}$ ) é sempre uma parcela da força normal resistente ( $N_{\text{Rd}}$ ), pois, numericamente, se  $N_{\text{Sd}}$  fosse em valor numérico igual a  $N_{\text{Rd}}$ , a seção transversal estaria no limite de sua capacidade, suportando apenas uma compressão simples, sem a possibilidade de momentos fletores concomitantes.

## 2.7 O diagrama de interação para a força normal de interesse

Determinado o universo de possibilidades, conforme descrito no item anterior, para a força normal de interesse, passa-se um plano horizontal, destacando os valores extremos nesse plano, valores que correspondem exatamente ao estado-limite último (ELU) em incêndio, naquele instante de tempo considerado, conforme exibido na Figura 10.

Tomando como exemplo numérico uma seção de 30x30 cm, resistência característica à compressão do concreto  $f_{\text{ck}} = 30$  MPa, 8 barras de  $\phi 10$ mm de CA-50, força normal  $N_{\text{Sd}} = 761,22$  kN (40% de  $N_{\text{Rd,máx}}$ ), o programa desenvolvido pelos autores fornece as curvas de estado-limite último exibidas Figura 11.

Observando-se os diagramas de interação para o estado-limite último da análise de incêndio, percebe-se claramente que, com o avanço do tempo de incêndio, a redução da capacidade resistente, em relação aos esforços solicitantes, respeita certa proporcionalidade.

## 3. Resultados e discussões

Neste item serão incluídos os resultados na forma de figuras e

tabelas. Os resultados serão discutidos de forma a substanciar as considerações e conclusões a que o artigo se dispõe.

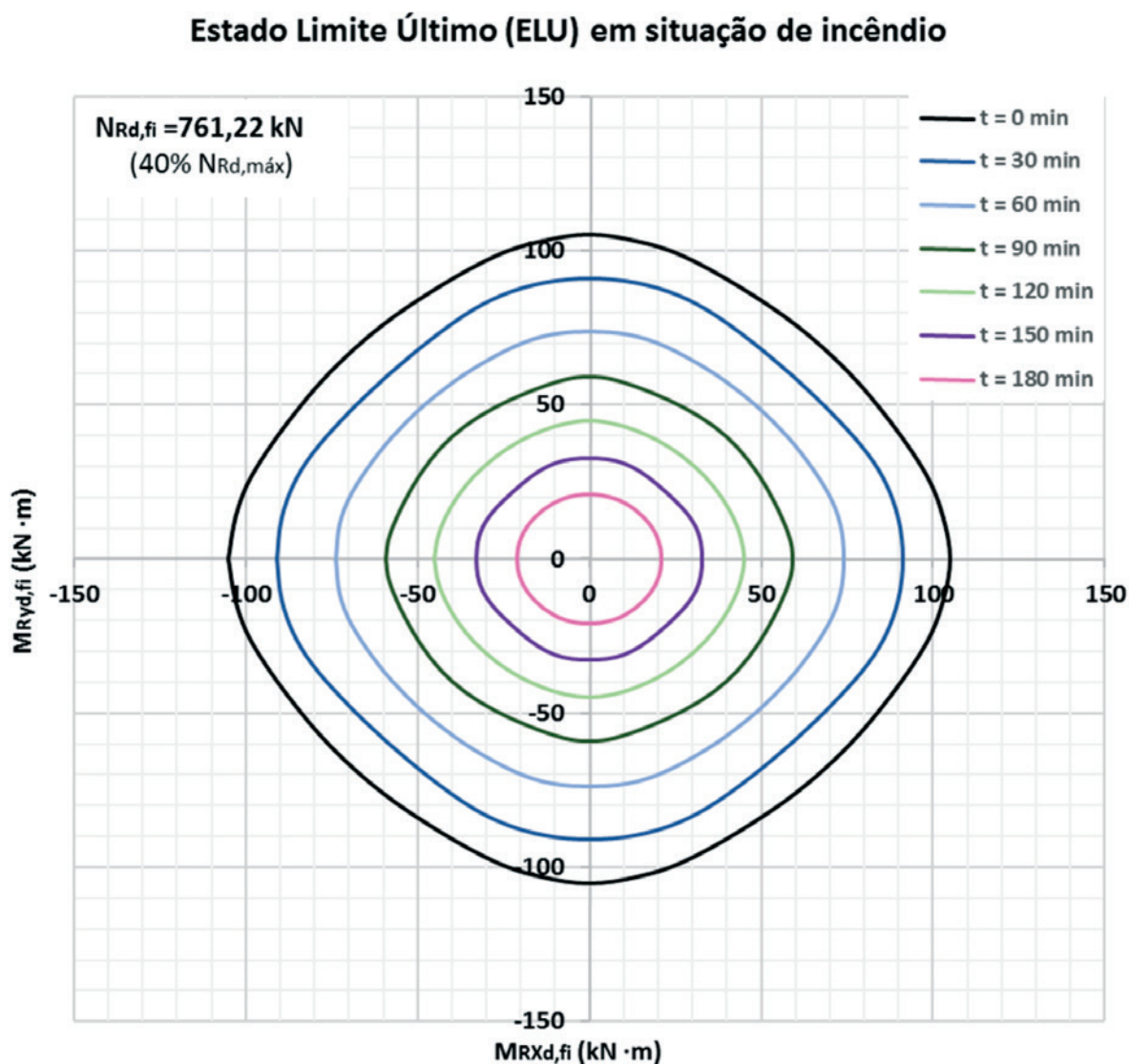
### 3.1 Correlação da análise de incêndio com a temperatura ambiente

Percebe-se, pela descrição dos itens anteriores, que a análise em situação de incêndio é demasiadamente trabalhosa, sendo praticamente impossível sua obtenção sem, pelos menos, dois programas computacionais devidamente preparados para as análises numéricas: SuperTempcalc [5] (para a transferência de calor) e o programa desenvolvido pelos autores para este artigo (para os esforços internos solicitantes).

Numa tentativa de tornar a abordagem mais simples, decidiu-se propor uma correlação entre a análise do estado-limite último em incêndio com a análise de estado-limite último feita à temperatura

ambiente, conforme preconiza a norma ABNT NBR 6118:2014, processo largamente conhecido pelos engenheiros de estruturas. Tomando como exemplo numérico, a seção de 30x30 cm, mesma utilizada anteriormente, ao inserir o diagrama de interação para o estado-limite último à temperatura ambiente sobre os diagramas de interação da análise de incêndio, observa-se o ocorrido na Figura 12.

É possível notar que a curva do estado-limite último à temperatura ambiente, apesar de ser determinada independente da análise de incêndio, garante à seção transversal certa capacidade resistente, em relação aos esforços internos solicitantes, que, no caso exemplificado, corresponde visualmente a, aproximadamente, 60 minutos de resistência ao fogo. É óbvio que esse não é um valor fixo para todas as seções transversais, pois esse tempo varia em funções da geometria da seção transversal, quantidade de armadura e valor da força normal.



**Figura 11**

Evolução dos diagramas de interação do ELU para diferentes tempos de incêndio



O fato da seção transversal, dimensionada para o estado-limite último à temperatura ambiente, garantir um determinado tempo resistente ao incêndio é uma propriedade inerente da seção transversal, mesmo que o engenheiro de estruturas não tenha tido a intenção de promover tal propriedade.

A curva associada à temperatura ambiente mantém, aproximadamente, o mesmo formato geométrico das curvas para a situação de incêndio. Essa correspondência sugeriu aos autores que seria possível criar um método aproximado que pode correlacionar qualquer estado-limite último em incêndio, em qualquer tempo, com o estado-limite último obtido à temperatura ambiente, utilizando para isso apenas um fator redutor que, nada mais é, do que uma redução de escala.

### 3.2 Seções transversais estudadas

Como citado na introdução do artigo, a análise tem como propósito servir de base para pilares de pequenas dimensões, que possam ser usados em indústrias, galpões e edifícios de pequeno porte. Para a criação das seções transversais, alguns parâmetros foram adotados:

- Classe de agressividade ambiental II (CAA II): cobrimento  $c = 3 \text{ cm}$ ;
- Estribos:  $\phi_t \leq 6,3 \text{ mm}$  ;
- A escolha da classe de agressividade ambiental tem como propósito estudar as seções de pilares em ambiente urbano. Como largamento difundido, a força cortante de pilares não é significativa, de modo que os estribos nessas seções transversais não precisam ser de grandes diâmetros, sendo

### Estado Limite Último (ELU) em situação de incêndio

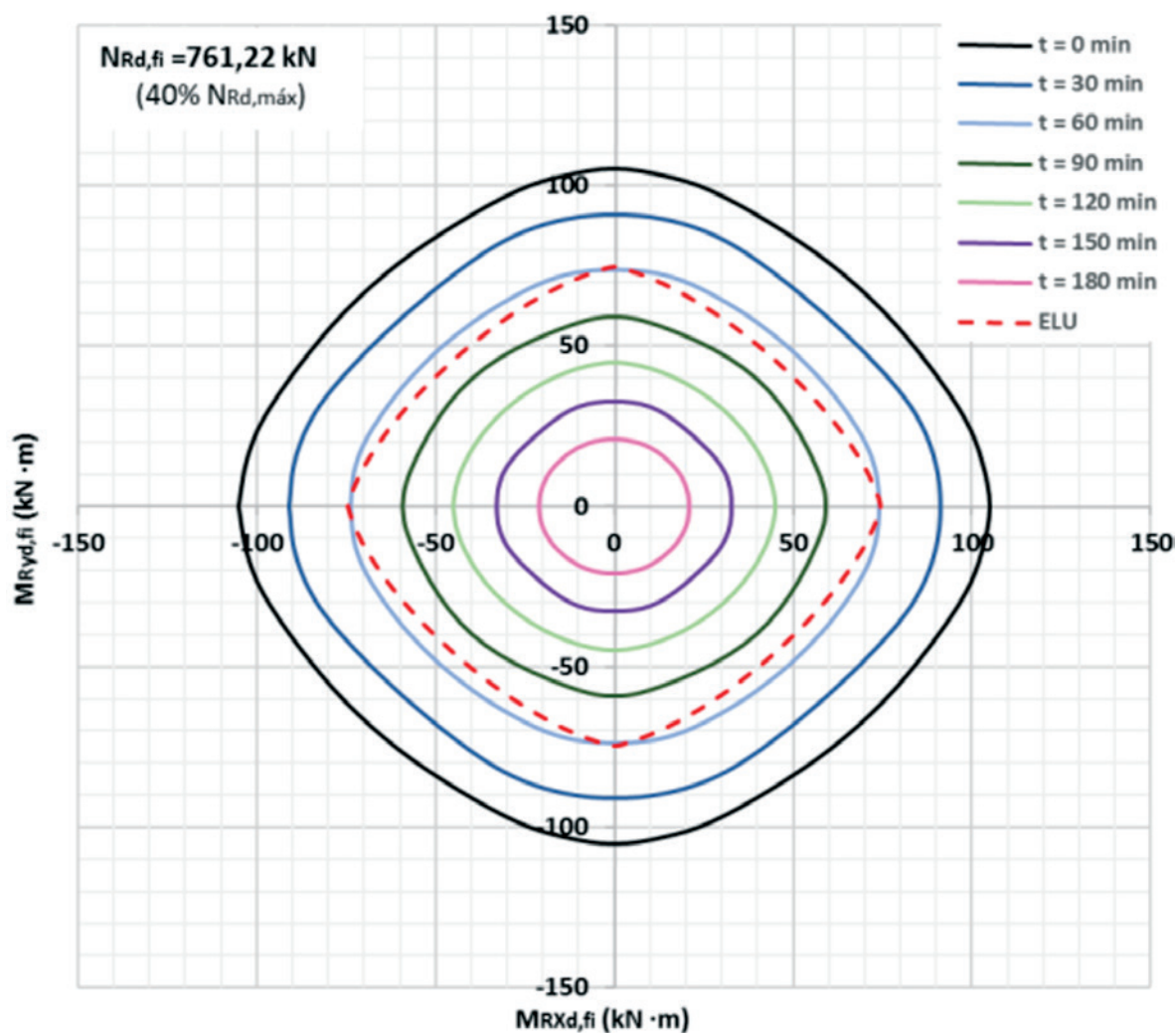
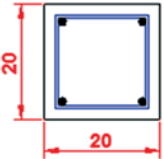
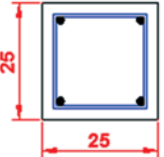
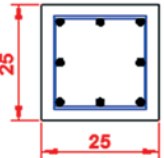
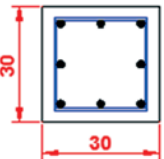


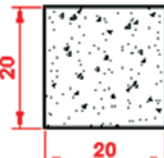
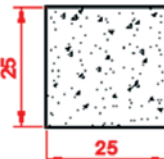
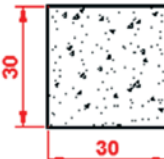
Figura 12

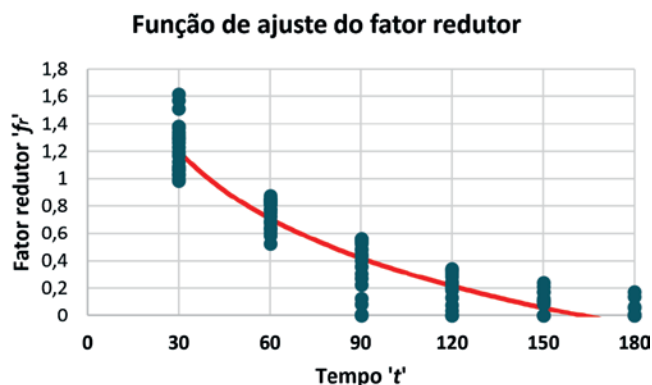
Inserção do diagrama de interação do ELU, à temperatura ambiente, sobre os diagramas de interação do ELU, na análise de incêndio

**Tabela 5**  
Seções transversais estudadas

Seção transversal	Distância da face ao centro geométrico das armaduras $c_1 = c + \phi_t + \phi_L/2$ (cm)	Armadura longitudinal $\phi_L$
	4,5	4 $\phi$ 10mm
		4 $\phi$ 12,5mm
		4 $\phi$ 16mm
	4,5	4 $\phi$ 10mm
		4 $\phi$ 12,5mm
	5,0	4 $\phi$ 16mm
	4,5	8 $\phi$ 10mm
		8 $\phi$ 12,5mm
		8 $\phi$ 16mm
	4,5	8 $\phi$ 10mm
		8 $\phi$ 12,5mm
		8 $\phi$ 16mm
	5,0	8 $\phi$ 20mm

**Tabela 6**  
Resultados para o fator ' $f_r$ '

Seção transversal	Fator redutor ( $30 \text{ min} \leq t \leq 180 \text{ min}$ and $r_N \leq 0,7$ )	Qui-quadrado reduzido $\chi^2_{\text{red}}$
	$f_r = 3,615 - 0,710 \ln t$	0,02
	$f_r = 4,016 - 0,757 \ln t$	0,06
	$f_r = 4,053 - 0,736 \ln t$	0,07



**Figura 13**  
Ilustração da função que descreve o fator redutor contra os resultados obtidos

assim, a hipótese de  $\phi_t \leq 6,3$  cm cobre grande parte dos pilares correntes.

Pela Tabela 5, pode-se perceber que este estudo cobre 14 seções transversais distintas. Todas as seções transversais foram submetidas a:

- Forças normais solicitantes ( $N_{sd}$ ): variando de 0 a  $N_{Rd,máx}$  com intervalo de  $0,10 N_{Rd,máx}$ ;
- Tempos de resistência ao fogo (TRF): variando de 0 a 180 min, com intervalo de 30 min.

Conclui-se, portanto, que cada seção transversal será submetida a 11 forças normais e 7 tempos de incêndio distintos, totalizando 77 casos de estudo por seção transversal, totalizando 1078 análises neste para este artigo.

### 3.3 Fator redutor 'f<sub>r</sub>' para o estado-limite último à temperatura ambiente

Por todo o exposto anteriormente, criou-se um fator redutor 'f<sub>r</sub>', que permite uma análise em situação de incêndio, a partir, apenas, do diagrama de interação do estado-limite último à temperatura ambiente, sem necessidade de análise térmica

Após o processamento dos 1078 casos, para cada terno de valores, foram registrados os correspondentes fatores redutores 'f<sub>r</sub>', em relação ao estado limite último à temperatura ambiente. Após os registros, foram feitas regressões, utilizando o programa LabFit [11], separando as seções transversais por dimensões, cujos resultados apresentam-se na Tabela 6.

Foi escolhida, como variável independente, apenas o tempo de incêndio 't'.

A medida estatística chamada de "qui-quadrado reduzido" é um indicativo da qualidade da regressão realizada que, quanto mais próxima de zero, comprova a confiabilidade da equação apresentada.

$$\text{Percebeu-se que, para relações da força normal } r_N = \frac{N_{Rd}}{N_{Rd,máx}}$$

superiores a 0,7, a regressão se tornava de má qualidade, não conduzindo a bons resultados, assim, optou-se, neste momento, por excluir esses dados, limitando o método ora apresentado.

Tomando, como exemplo, as seções de dimensões 20x20 cm, o gráfico exibido na Figura 13 ilustra a função 'f<sub>r</sub>' contra os valores obtidos pelo programa desenvolvido pelos autores.

### 3.4 Exemplo de aplicação do fator redutor 'f<sub>r</sub>'

Inicialmente realiza-se a análise para o estado-limite último, à temperatura ambiente, conforme preconiza a norma ABNT NBR 6118:2014 e, para obtenção do estado-limite último em incêndio, num determinado tempo de resistência ao fogo 't', aplica-se o fator redutor 'f<sub>r</sub>' aos valores encontrados. O procedimento tem por vantagem evitar qualquer análise de incêndio e obter resultados aproximados.

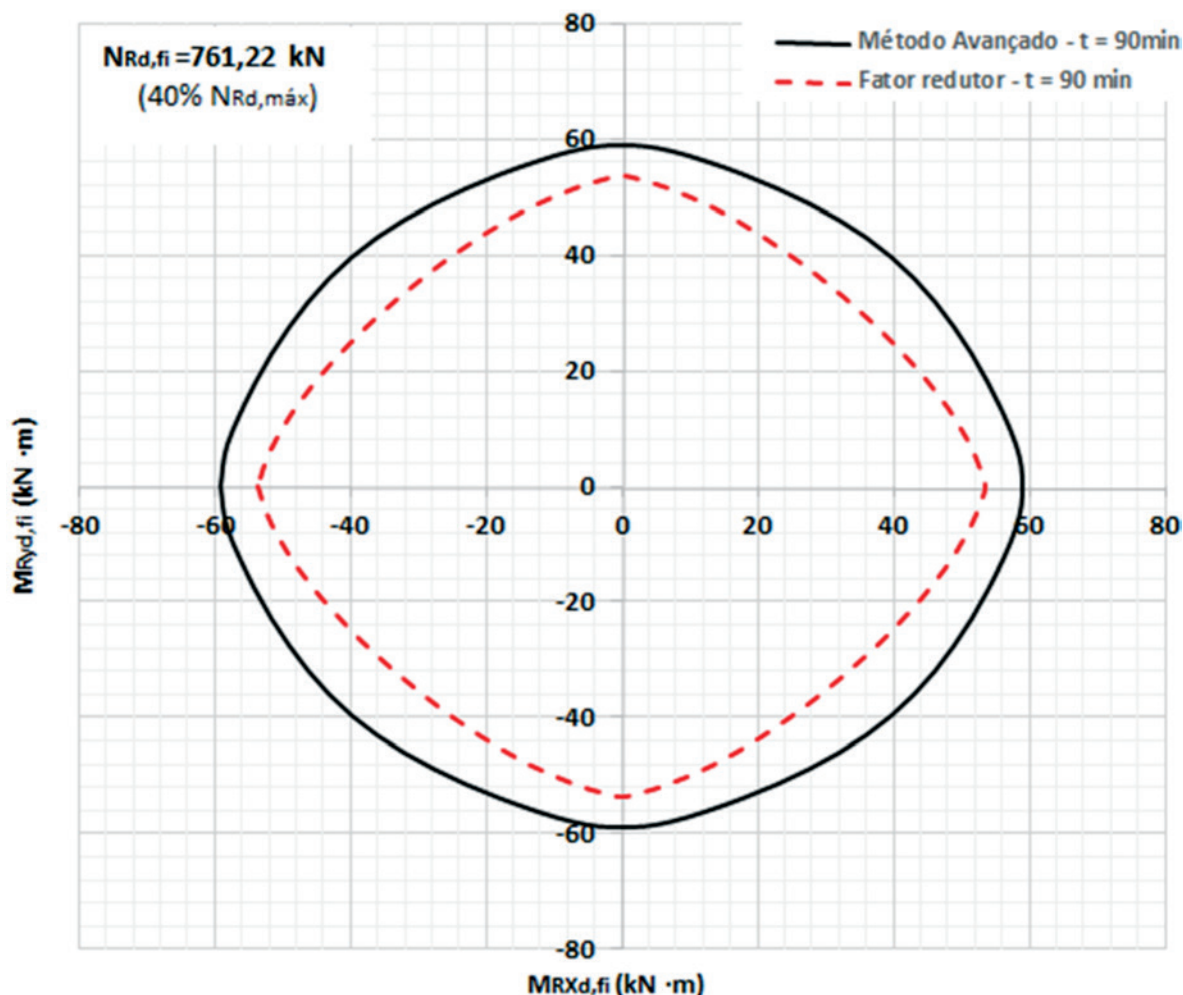
Vale lembrar que, à temperatura ambiente, conforme a norma ABNT NBR 6118:2014, a distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo, com

**Tabela 7**

Determinação do ELU em incêndio a partir do ELU à temperatura ambiente

$\alpha$ (°)	Temperatura ambiente		Incêndio t = 90 min ( $f_r = 0,74$ )	
	$M_{Rxd}$ (kN·m)	$M_{Ryd}$ (kN·m)	$M_{Rxd,fi}$ (kN·m)	$M_{Ryd,fi}$ (kN·m)
0	-72,28	0,00	-53,48	0,00
10	-69,59	-8,78	-51,50	-6,50
20	-64,88	-18,21	-48,01	-13,47
30	-58,17	-28,08	-43,05	-20,78
40	-49,27	-38,77	-36,46	-28,69
50	-38,77	-49,27	-28,69	-36,46
60	-28,08	-58,17	-20,78	-43,05
70	-18,21	-64,88	-13,47	-48,01
80	-8,78	-69,59	-6,50	-51,50
90	0,00	-72,28	0,00	-53,48

### Estado Limite Último - Incêndio x Temperatura ambiente



**Figura 14**

Comparação do resultado obtido, pelo método aproximado, utilizando o fator redutor  $f_r$ , com o resultado obtido por análise avançada em incêndio

tensão de pico igual a  $0,85 f_{cd}$ , porém, como alternativa, se for utilizado o bloco de tensões uniforme, com profundidade de 80% da posição da linha neutra, a tensão deve ser tomada como  $0,765 f_{cd}$ , pois a largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, diminui a partir desta para a borda comprimida.

Tomando como exemplo numérico uma seção de 30x30 cm, resistência característica à compressão do concreto  $f_{ck} = 30$  Mpa, com 8 barras de  $\phi 10$ mm de CA-50, pode-se aplicar o método proposto neste artigo para uma força normal  $N_{sd} = 761,22$  kN (40% de  $N_{Rd,máx}$ ).

Nesse caso, para obter o estado-limite último em situação de incêndio, para um tempo de exposição ao fogo de 90 min, nas quatro faces da seção transversal, basta aplicar o fator redutor ao estado-limite último obtido à temperatura ambiente, conforme norma ABNT NBR 6118:2014. Os resultados encontram-se na Tabela 7.

$$f_r = f_r = 4,053 - 0,736 \ln 90 = 0,74$$

O diagrama de interação correspondente ao estado-limite último em incêndio, para um tempo resistência ao fogo (TRF) de 90 minutos, obtido a partir do diagrama à temperatura ambiente, com a aplicação do fator redutor, foi comparado ao correspondente à análise de incêndio, utilizando os métodos avançados de cálculo, conforme Figura 14.

Note, na Figura 14, que a curva de estado-limite último em incêndio, obtida pelo método simplificado aqui proposto, com a aplicação do fator redutor, fica interna a curva obtida ao realizar-se a análise de incêndio com o método avançado de cálculo, por meio do programa desenvolvido pelos autores, levando em conta as diversas variáveis envolvidas.

## 4. Conclusões

Propôs-se, neste artigo, um procedimento simplificado que per-

mite inferir os valores da capacidade resistente de pilares, em relação aos esforços internos solicitantes, para flexão composta oblíqua, em situação de incêndio simétrico, dentro de certos limites de dimensões e esforços, a partir dos valores encontrados à temperatura ambiente

Para cada tempo de resistência ao fogo, a redução da capacidade resistente em relação à temperatura ambiente respeita certa proporcionalidade, o que permitiu a criação de um fator de redução ' $f_r$ ' que, aplicado aos resultados encontrados à temperatura ambiente, fornece os resultados para a situação de incêndio.

O procedimento proposto neste artigo permite, de forma simplificada, determinarem-se resultados relativos à capacidade resistente, em situação de incêndio, dispensando a análise térmica.

O método aqui proposto somente pode ser aplicado dentro dos limites apresentados no artigo. Estão em andamento estudos para ampliação desses limites

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e à FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. NBR 15200, Rio de Janeiro, 2012.
- [3] EL-FITIANY, S.F.; YOUSSEF, M.A. Interaction diagrams for fire-exposed reinforced concrete sections. *Journal: Engineering Structures*, v. 70, p. 246–259, July 2014.
- [4] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 2: Design of concrete structures – part 1.2 General rules – structural fire design. EN 1992-1-2. Brussels: CEN, 2004.
- [5] FIRE SAFETY DESIGN (FSD). TCD 5.0 User's manual. Lund: Fire Safety Design AB, 2007
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834: Fire-resistance tests: elements of building construction - part 1.1: general requirements for fire resistance testing. Geneva, 1999. 25 p. (Revision of first edition ISO 834:1975).
- [7] LAW, A.; GILLIE, M. Interaction Diagrams for Ambient and Heated Concrete Sections. *Journal: Engineering Structures*, v. 32, n. 6, p. 1641-1649, 2010.
- [8] MOREIRA, A. M. M. M. Verificação de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em situação de incêndio. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- [9] RODRIGUEZ, J.; ARISTIZABAL-OCHOA, J. D. Biaxial Interaction Diagrams for Short RC Columns of Any Cross Section. *Journal of Structural Engineering*, v. 125, n. 6, p. 672-683, June 1999.
- [10] SILVA, V. P. Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. São Paulo: Editora Blucher, 2012.
- [11] SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S. LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) v 7.2.49 (1999-2016).