

Concrete beams fire design. Enhancement of some recommendations of the Eurocode

Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Aprimoramento de algumas recomendações do Eurocode



V. P. SILVA^a
valpigss@usp.br

Abstract

The Brazilian standard ABNT NBR 15200 is in revision. Some omissions on the design of beams in the 2004 version of the standard will be included now. Possibility of reduction of c_1 in situations of safety reserves, different design for unidirectional ribbed slab and lateral increase in c_1 in some cases are the cases of interest in this work. The Eurocode provides recommendations on these items, however, they are not considered adequate to Brazilian design. The objective of this article is to perform thermal or structural analyzes of reinforced concrete beams and propose alternatives to the recommendations of Eurocode in order to standardize them at this stage of revision of the Brazilian standard.

Keywords: fire, design, beam, fire safety.

Resumo

A norma brasileira ABNT NBR 15200 está em fase de revisão. Algumas omissões sobre o dimensionamento de vigas, na versão de 2004 da norma, serão incluídas agora. Possibilidade de redução do c_1 em casos em que haja reserva de segurança, dimensionamento distinto para laje nervurada unidirecional e aumento de c_1 lateral em algumas situações são os casos de interesse neste trabalho. O Eurocode fornece recomendações a respeito desses itens, no entanto, não são consideradas adequadas aos costumes brasileiros de projeto. O objetivo deste trabalho é, por meio de análise térmica ou estrutural de vigas de concreto armado, propor alternativas às recomendações do Eurocode, visando normatizá-las, já nesta fase de revisão da norma brasileira.

Palavras-chave: incêndio, dimensionamento, vigas, segurança contra incêndio.

^a Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, valpigss@usp.br, Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 271 Cid. Universitária, São Paulo, SP, Brasil

1. Introdução

A norma brasileira ABNT NBR 15200:2004 [1] está em fase de revisão. A principal norma de referência será norma europeia Eurocode [2]. Algumas omissões da versão de 2004 da ABNT NBR 15200 serão incluídas agora. O objetivo deste trabalho é aprimorar as recomendações quanto a essas complementações, propondo procedimentos mais expeditos para a norma brasileira.

O EC (2004) permite o dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio por meio do método tabular (tabelas 1 e 2), no qual se associa o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) à menor dimensão da viga (b_{min}) e à distância entre o CG da armadura e a face exposta ao fogo (c_1).

As tabelas desse método simplificado são construídas admitindo-se as seguintes hipóteses:

- Vigas sob lajes
 - Aquecimento nas faces laterais e inferior da viga (figura 1)
 - Temperatura máxima admissível na armadura inferior (θ_{cr}) igual a 500 °C
 - Redistribuição de momentos, no caso de vigas contínuas
- A ABNT NBR 15200:2004 [1] apresenta as mesmas tabelas do Eurocode [2] até TRRF = 120 min e, na revisão, serão incluídas as informações referentes ao TRRF = 180 min. Três recomendações constantes em [2] deverão ser agregadas à revisão da ABNT NBR 15200:2004 [1]. Elas são detalhadas nos itens 1.1 a 1.3.

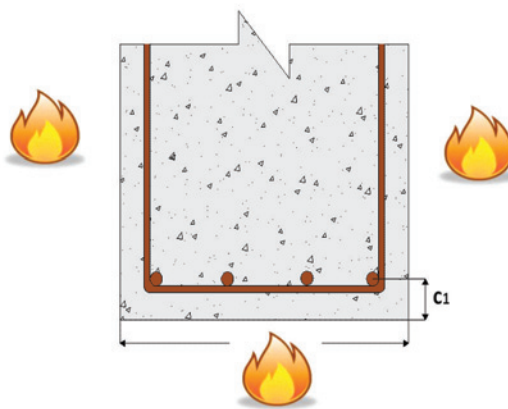
Tabela 1 – Dimensões mínimas para vigas isostáticas

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

Tabela 2 – Dimensões mínimas para vigas contínuas

TRRF min	Combinações de b_{min}/c_1 mm/mm			
	1	2	3	4
30	80/15	160/12	190/12	-
60	120/25	190/12	300/12	-
90	140/35	250/25	400/25	-
120	190/45	300/35	450/35	500/30

Figura 1 – Viga aquecida nas três faces



1.1 Redução dos valores de c_1

Os valores de c_1 indicados nas tabelas foram determinados admitindo-se $S_{d,fi}/S_d = 0,7$ e $A_{s,calc}/A_{s,ef} = 1$ em que $S_{d,fi}$ e S_d são os

valores de cálculo dos esforços solicitantes em situação de incêndio e à temperatura ambiente, respectivamente, e $A_{s,calc}$ e $A_{s,ef}$ são os valores das áreas de armadura necessária conforme dimensionamento adequado à temperatura ambiente e a realmente instalada, respectivamente. Caso esses valores sejam menores, c_1 pode ser reduzido de Δc_1 , conforme Eq. 1, em que θ_{cr} em °C é determinada por meio da Eq. 2, onde, f_{yk} e $\sigma_{s,fi}$ são a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente e tensão aplicada no aço em situação de incêndio, respectivamente.

$$\Delta c_1 = 0.1 (500 - \theta_{cr}) \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$k_{s,fi}(\theta_{cr}) = \frac{\sigma_{s,fi}}{f_{yk}} \quad (2)$$

O valor de $\sigma_{s,fi}$ é determinado por meio da Eq. 3, onde γ_s é o fator de ponderação das resistências à temperatura ambiente.

$$\sigma_{s,fi} = \frac{S_{d,fi}}{S_d} \times \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \times \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \quad (3)$$

O redutor de resistência $k_s(q)$ é determinado por meio das Equação 4.

$$\begin{aligned}
 k_s(\theta) &= 1.0 \text{ para } 20^\circ\text{C} = \theta = 350^\circ\text{C} \\
 k_s(\theta) &= 1.0 - 0.4 \cdot (\theta - 350)/150 \text{ para } 350^\circ\text{C} < \theta = 500^\circ\text{C} \\
 k_s(\theta) &= 0.61 - 0.5 \cdot (\theta - 500)/200 \text{ para } 500^\circ\text{C} < \theta = 700^\circ\text{C} \\
 k_s(\theta) &= 0.1 - 0.1 \cdot (\theta - 700)/500 \text{ para } 700^\circ\text{C} < \theta = 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

1.2 Dimensões mínimas para laje nervurada unidirecional

No caso de lajes nervradas simplesmente apoiadas, o método tabular conduz à tabela 3 em que h é a mínima espessura da capa em ambientes onde a compartimentação é exigida.

A tabela 3, no entanto, vale apenas para lajes armadas em duas direções. Para lajes nervradas unidirecionais, a tabelas 1 é aplicada às nervuras e a tabela 4 à capa.

Dessa forma, no caso de nervuras armadas com 1 camada, a tabela 1 transforma-se na tabela 5, em que c_{1e} é definido no item 1.3.

1.3 Aumento de c_1 lateral em algumas situações

Há concentração de temperatura junto às bordas da face inferior das vigas. Por essa razão, em vigas com somente uma camada

Tabela 5 - Dimensões mínimas para nervuras com armações em uma camada

TRRF min	b_{min} mm	c_1 mm	c_{1e} mm
30	80	25	35
60	120	40	50
90	140	55	65
120	190	65	75
180	240	80	90

de armaduras e largura não superior ao b_{min} indicado na coluna 2 das tabelas 1 e 2, a distância c_{1e} (figura 2) no fundo das vigas deve ser 10 mm maior do que o c_1 dado pelas referidas tabelas.

2. Análise

O Eurocode é uma norma reconhecida internacionalmente e a mais moderna no que se refere a estruturas em situação de incêndio. Entretanto, as três recomendações citadas no item 1 deste artigo podem ser adaptadas de forma a serem mais bem entendidas e utilizadas pelo meio técnico. Pretendeu-se alcançar esse objetivo nesta pesquisa e os resultados com as respectivas demonstrações serão apresentados nos itens seguintes.

2.1 Redução dos valores de c_1

O redutor de resistência $k_s(q)$ recomendado para métodos analíticos simplificados ou avançados é apresentado em [1] sob forma de tabela e é representado graficamente na figura 3. No entanto, para o método tabular foi utilizada uma antiga relação $k_s(q)$ conforme Eqs. 4. Graficamente, essa última relação também pode ser vista na figura 3.

Tabela 3 - Dimensões mínimas para lajes nervradas simplesmente apoiadas

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{min}/c_1^* mm/mm			Capa h/c_1 mm/mm
	1	2	3	
30	80/15	-	-	60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20
180	220/75	260/70	410/60	150/30

Tabela 4 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas

TRRF min	h mm	c_1 para $l_y/l_x > 2$ mm
30	60	10
60	80	20
90	100	30
120	120	40
180	150	55

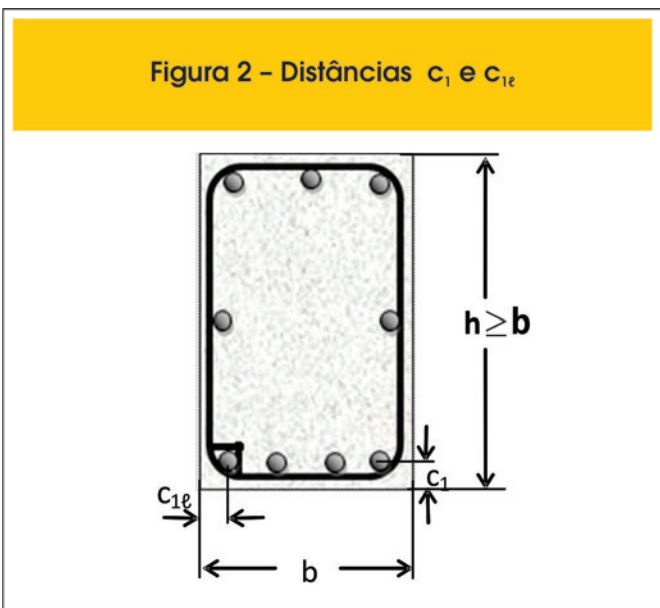
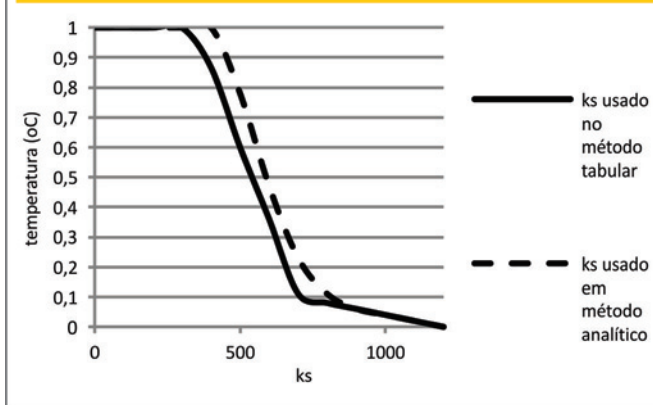


Figura 3 - Duas versões do redutor de resistência ao escoamento dos aços



Em vista da dificuldade que esse procedimento poderia trazer ao usuário da norma, neste artigo procurou-se uma alternativa mais simples sem alterar o nível de segurança exigido. O procedimento é detalhado a seguir.

A partir da Eq. 3 determina-se $k_s(\theta_{cr})$ em função de θ_{cr} (Eq. 5) adotando-se γ_s igual a 1,15, conforme recomendação da ABNT NBR 6118:2003.

$$k_s(\theta_{cr}) = \frac{S_{d,fi}}{S_d} \times \frac{1}{1,15} \times \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \tag{5}$$

Escolhendo-se os intervalos $0,7 \leq \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \leq 1,0$ e

$\frac{S_{d,fi}}{S_d}$, encontram-se os valores de k_s da tabela 6. Não foram

Tabela 6 - Valores de k_s

$\frac{S_{d,fi}}{S_d}$	$\frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$						
	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
0,7	0,61	0,58	0,55	0,52	0,49	0,46	0,43
0,65	0,57	0,54	0,51	0,48	0,45	0,42	0,40
0,6	0,52	0,50	0,47	0,44	0,42	0,39	0,37
0,55	0,48	0,45	0,43	0,41	0,38	0,36	0,33
0,5	0,43	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,30
0,45	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31	0,29	0,27
0,4	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24

Tabela 7 - Valores de θ_{cr} (°C)

$\frac{S_{d,fi}}{S_d}$	$\frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$						
	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
0,7	501	513	525	537	549	561	574
0,65	518	529	541	552	563	574	586
0,6	535	546	556	567	577	587	598
0,55	553	562	572	581	591	601	610
0,5	570	579	587	596	605	614	622
0,45	587	595	603	611	619	627	634
0,4	605	612	619	626	633	640	647

Figura 4 - Redutor de resistência dos aços

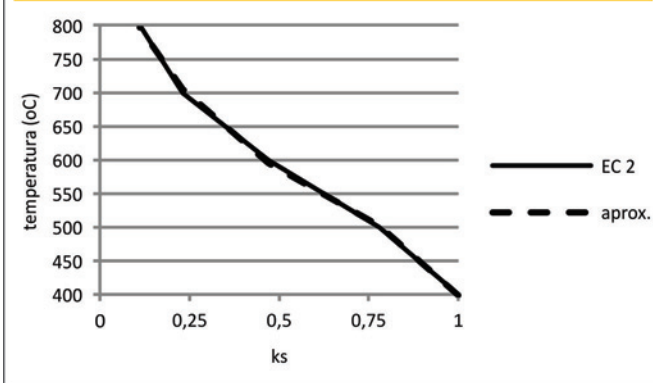


Tabela 8 - Valores de Δ_{c1} (mm), para armadura passiva

$\frac{S_{d,fi}}{S_d}$	$\frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$						
	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
0,7	0	1	2	4	5	6	7
0,65	2	3	4	5	6	7	9
0,6	4	5	6	7	8	9	10
0,55	5	6	7	8	9	10	11
0,5	7	8	9	10	10	11	12
0,45	9	10	10	11	12	13	13
0,4	10	11	12	13	13	14	15

estudados valores de $\frac{S_{d,fi}}{S_d}$ superiores a 0,7, pois a NBR 15200 [1] permite adotar o valor 0,7, como alternativa ao cálculo exato. Determina-se θ_{cr} adotando-se a Eq. 6, regressão polinomial das Eqs. 4 para o intervalo 400 - 800 °C. A boa aproximação encontrada pode ser vista na figura 4.

$$\theta_{cr} = - 810 k_s^3 + 1495.5 k_s^2 - 1199 k_s + 912 \quad (6)$$

Dessa forma, para os mesmos intervalos anteriores, constrói-se a tabela 7.

Finalmente, determina-se Δc_1 por meio da Eq. 1. Procedendo-se dessa maneira resulta a tabela 8.

Novamente, com o auxílio de regressão encontra-se a Eq. 7, que

representa muito bem a tabela 8 nos intervalos $0.7 \leq \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \leq 1.0$ e $0.4 \leq \frac{S_{d,fi}}{S_d} \leq 0.7$.

$$\Delta c_1 = 24.5 - 35 \times \frac{S_{d,fi}}{S_d} \times \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \quad (7)$$

A diferença entre Δc_1 determinado pela Eq. 7 e pela tabela 8 pode ser visto na tabela 9. Os valores estão em mm e os negativos são contra a segurança. Na prática, as diferenças são inexpressivas.

2.2 Dimensões mínimas para laje nervurada unidirecional

Em vista de a coluna 1 da tabela 2 estar em uso, as larguras lá elencadas tornaram-se padrões para os fabricantes de cubetas plásticas empregadas como fôrmas de lajes nervuradas. No entanto, a coluna 1 da tabela 3 não respeita, em geral, as mesmas larguras fornecidas na coluna 1 da tabela 2. Essa razão justificou este trabalho. Procurou-se, com base no método simplificado recomendado pelo Eurocode, pesquisar valores de c_1 que se combinem com as larguras de 8 cm, 10 cm, 12 cm, 16 cm e 22 cm a fim de que a temperatura nas armaduras não ultrapassem 500 °C no TRRF.

2.2.1 Geometria e discretização dos modelos

Por simplicidade, foram adotadas nervuras retangulares. A favor da segurança, admitiu-se que a nervura tem altura igual a 1,5 vezes a largura e é sobreposta por uma laje de 5 cm de espessura e 60 cm de largura. As larguras adotadas foram 8 cm, 10 cm, 12 cm, 16 cm e 22 cm. Foi empregado o programa de computador de análise térmica bidimensional Super Tempcalc [3].

A geometria fornecida ao programa, para a menor e maior largura, pode ser vista na figura 5. Nessas mesmas figuras o símbolo "1" junto ao contorno dos elementos de concreto significa as faces

Tabela 9 - Diferença entre Δc_1 em mm calculado pela Eq.7 e tabela 9

$\frac{S_{d,fi}}{S_d}$	$\frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$						
	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
0,7	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
0,65	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0,00
0,6	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,01
0,55	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
0,5	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02
0,45	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
0,4	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04

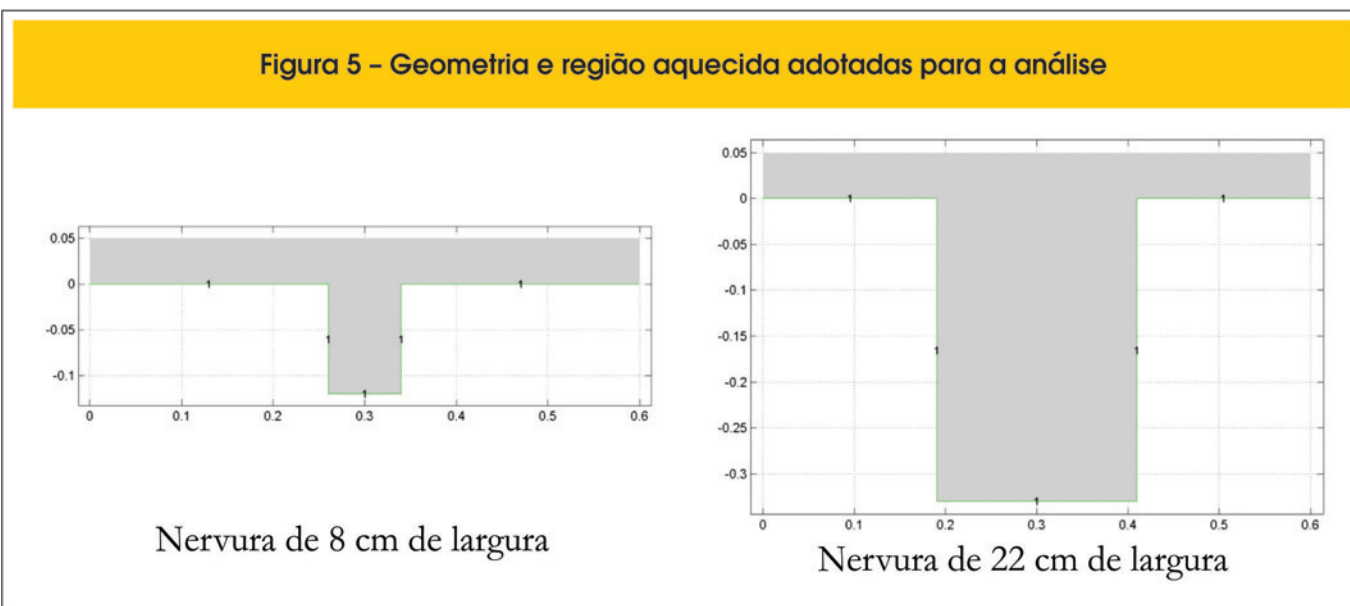
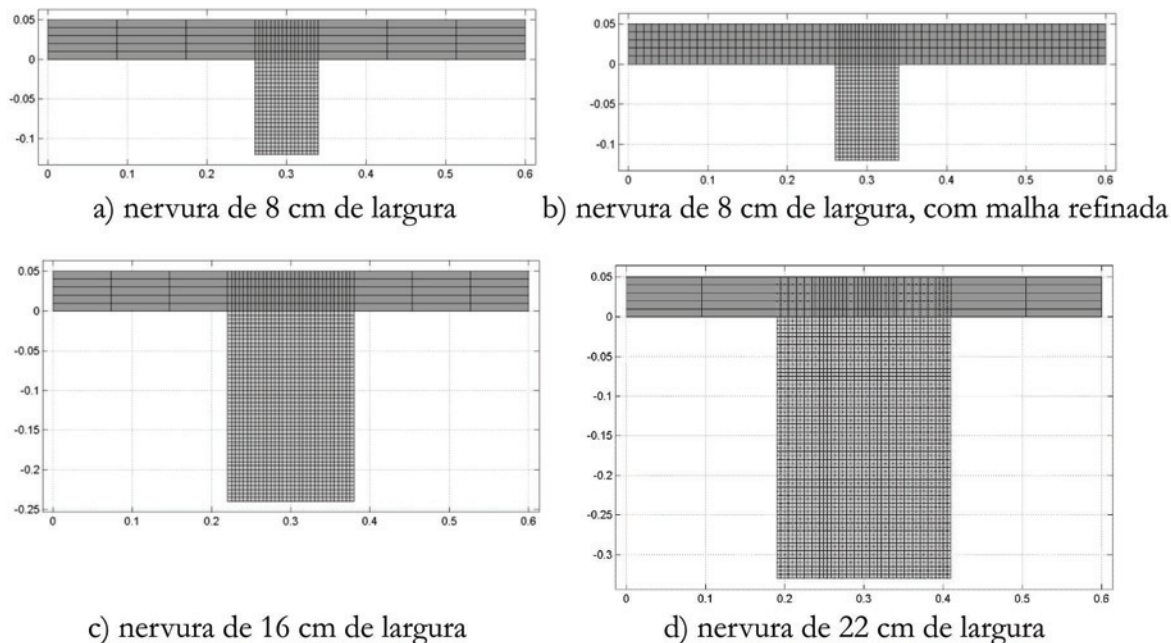


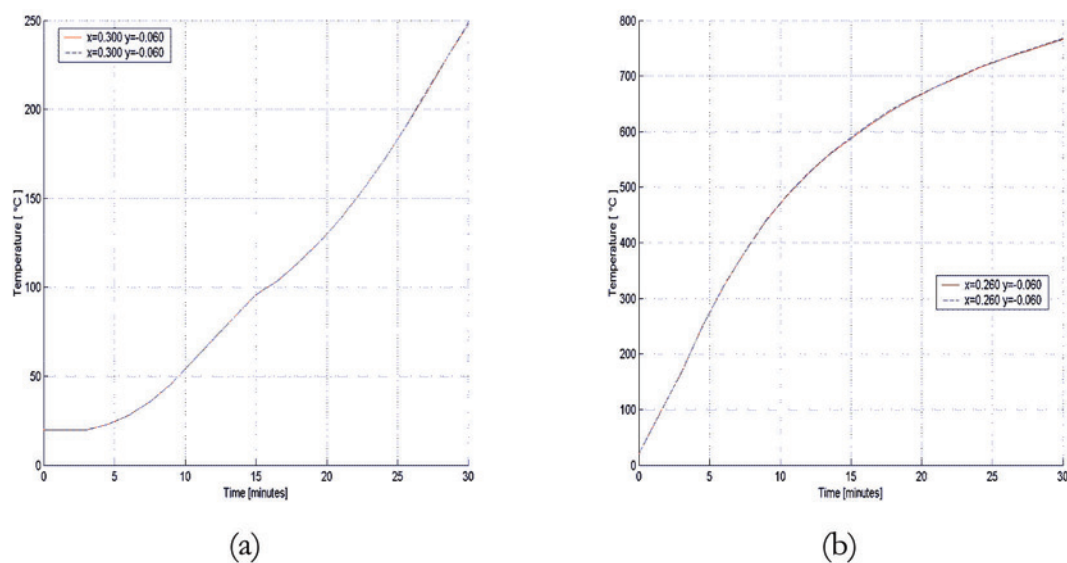
Figura 6 - Discretização em malha de elementos finitos



aquecidas, ou seja, o aquecimento foi realizado no contorno inferior do conjunto. A face superior da laje foi, a favor da segurança, admitida adiabática, ou seja, não há troca calor com o ambiente. Os modelos foram discretizados em malhas quadradas de 5 mm de lado para as nervuras e retângulos de 10 cm x 1 cm para as

lajes (figura 6). Em vista da considerável diferença de largura entre os elementos finitos escolhidos para laje e nervura, testou-se outra malha refinada para a nervura de 8 cm (figura 6b). Com as duas malhas determinaram-se as temperaturas no meio da nervura (figura 7a, temperaturas relativamente baixas) e ao nível do

Figura 7 - Comparação de temperaturas para diferentes malhas na laje



CG da nervura, mas junto à face (figura 7b, temperaturas altas). A conclusão é que para análise térmica na região inferior das nervuras, ambas as discretizações conduzem a respostas similares. Na sequência deste trabalho empregou-se a malha mais simples.

2.2.2 Parâmetros empregados

As características físicas e térmicas dos materiais a serem empregadas na análise térmica e estrutural são fornecidas em [2], em consonância com a proposta de revisão da NBR 15200 e apresentadas a seguir.

Figura 8 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura

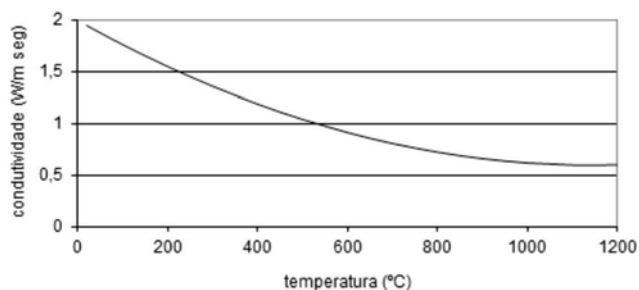


Figura 9 - Variação do calor específico em função da temperatura

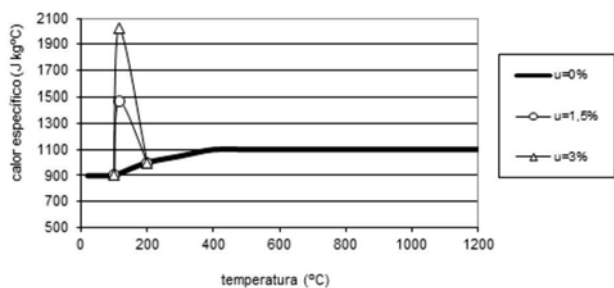


Figura 10 - Variação da densidade do concreto em função da temperatura

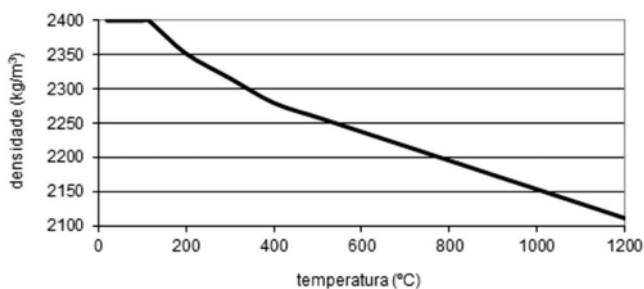


Tabela 10 - Valores de pico em função do teor de umidade

Teor de umidade	c _{p,pico} (J/kg °C)
0%	900
1,5%	1470
3,0%	2020

A variação da condutividade térmica para concretos silicosos com densidade normal é expressa pela equação 8, onde λ_c é a condutividade térmica do concreto em W/m°C e q é a temperatura em °C.

$$\lambda = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \tag{8}$$

A equação 8 é válida para temperaturas entre 20°C e 1200°C e é representada graficamente na figura 8.

A variação do calor específico em função da temperatura, c_{p,q}, para concretos silicosos secos é representada por meio das equações 9, onde q é a temperatura em °C.

$$\begin{aligned} c_{p,\theta} &= 900 \text{ para } 20^\circ\text{C} = \theta = 100^\circ\text{C} \\ c_{p,\theta} &= 900 + (\theta - 100) \text{ para } 100^\circ\text{C} < \theta = 200^\circ\text{C} \\ c_{p,\theta} &= 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta = 400^\circ\text{C} \\ c_{p,\theta} &= 1100 \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta = 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \tag{9}$$

Devido à evaporação de água livre presente no concreto endurecido, o valor do calor específico é constante para temperaturas entre 100 °C e 115 °C. O valor de c_{p,pico} depende do teor de umidade do concreto, conforme mostra a tabela 10.

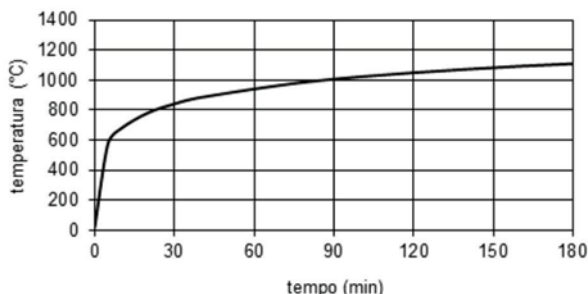
A figura 9 mostra a variação do calor específico em função da temperatura. Neste trabalho foi adotada umidade igual a 1,5 %.

A variação da densidade do concreto com a temperatura, ρ_q, é influenciada pela perda de água e pode ser determinada conforme as equações 10, onde q é a temperatura em °C e ρ(20°C) é a densidade do concreto simples à temperatura ambiente (20°C).

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \text{ para } 20^\circ\text{C} = \theta = 115^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \times (1 - 0.02 (\theta - 115)/85) \text{ para } 115^\circ\text{C} < \theta = 200^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \times (0.98 - 0.03 (\theta - 200)/200) \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta = 400^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \times (0.95 - 0.07 (\theta - 400)/800) \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta = 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \tag{10}$$

A figura 10 ilustra a variação da densidade do concreto em função da temperatura, considerando a densidade do concreto à temperatura ambiente igual a 2400 kg/m³, conforme recomendação da ABNT NBR 6118:2003 [1].

Figura 11 - Modelo do incêndio-padrão



O modelo matemático de incêndio adotado foi aquele padronizado pela ISO 834 [4], conforme equação 11 ilustrada na figura 11.

$$\theta_g = 20 + 345 (8 t + 1) \quad (11)$$

O fator de emissividade foi 0,7 e o coeficiente de transferência de calor por convecção na face exposta ao fogo foi de 25 W/m²°C.

2.2.3 Resultados da análise térmica

Com os parâmetros descritos em 2.2.2, foram determinados os campos térmicos para as nervuras estudadas, exemplificados nas figuras 12 e 13.

A partir dos campos de temperaturas e com base no método simplificado proposto pelo Eurocode [2], determinaram-se os valores mínimos para largura e c_1 das nervuras para os vários TRRF's. Esses valores são apresentados a seguir.

Conforme a figura 14, nota-se que para largura de nervura igual a 8 cm, c_1 deve ser 25 mm para TRRF igual a 30 min, sem necessidade de se impor c_{1t} . Conforme a figura 15, nota-se que para largura de nervura igual a 10 cm, c_1 deve ser 20 mm para TRRF igual a 30 min, constituindo-se uma alternativa ao valor constante da tabela 5. A partir da figura 16, percebe-se que para largura de nervura igual a 10 cm, c_1 deve ser 45 mm. Lembrando-se que em lajes unidirecionais é possível usar-se apenas uma armadura por nervura, essas dimensões serão consideradas. Para o caso de usarem-se duas barras, estudou-se, como alternativa, a largura de 12 cm. Conforme a figura 17, para largura de nervura igual a 12 cm, c_1 deve ser 40 mm, para TRRF igual a 60 min, sem necessidade de se impor c_{1t} . Pela figura 18, comprova-se que não há c_1 que atenda à largura de 12 cm para TRRF igual a 90 min. Com base na figura 19, demonstra-se que para largura de nervura igual a 16 cm, c_1 deve ser 50 mm para TRRF igual a 90 min, criando-se uma alternativa à tabela 5. Apesar de diferir das larguras-padrão, estudaram-se também os casos de larguras 13 cm, 14 cm e 15 cm, cujos resultados podem ser vistos às figuras 20 a 22. Respectivamente, os valores de c_1 são 60 mm, 55 mm e 50 mm.

Conforme a figura 23 e 24, nota-se que para largura de nervura igual a 16 cm e 22 cm, c_1 deve ser 65 mm e 50 cm, respectivamente, para TRRF igual a 120 min, constituindo-se uma alternativa à tabela 5.

Conforme a figura 25, nota-se que para largura de nervura igual a 22 cm, c_1 deve ser 80 mm para TRRF igual a 180 min, criando-se uma alternativa à tabela 5.

Figura 12 - Campo de temperaturas em 30 min para nervura de 8 cm

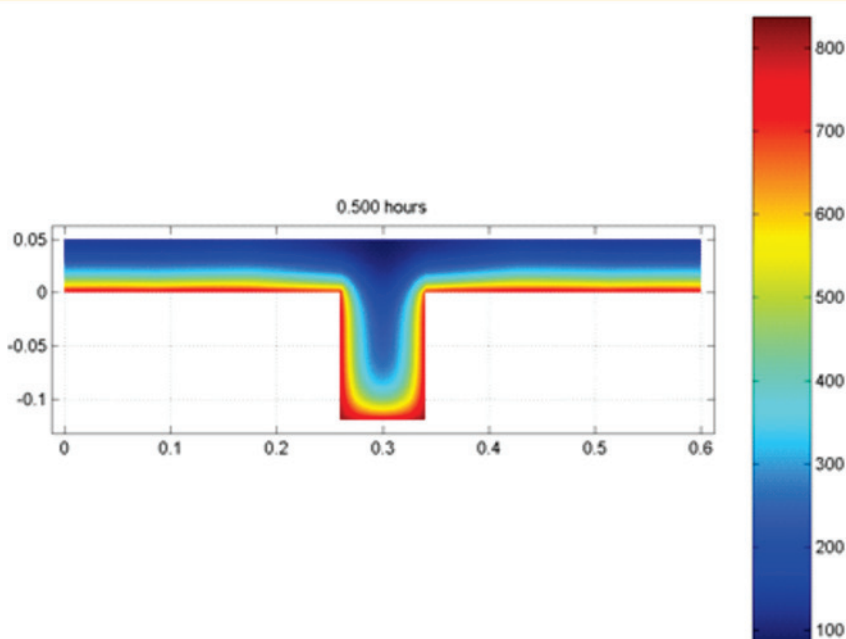


Figura 13 - Campo de temperaturas em 120 min para nervura de 16 cm

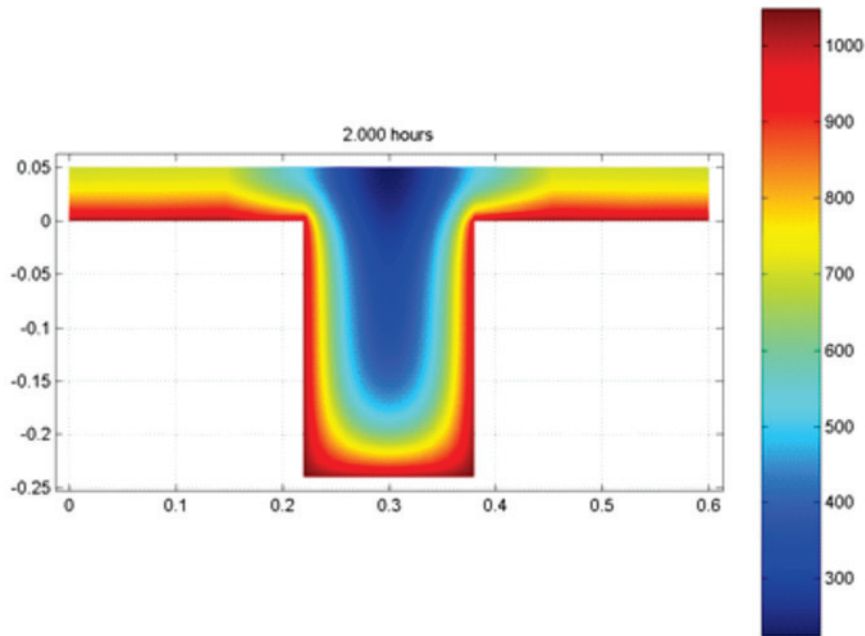
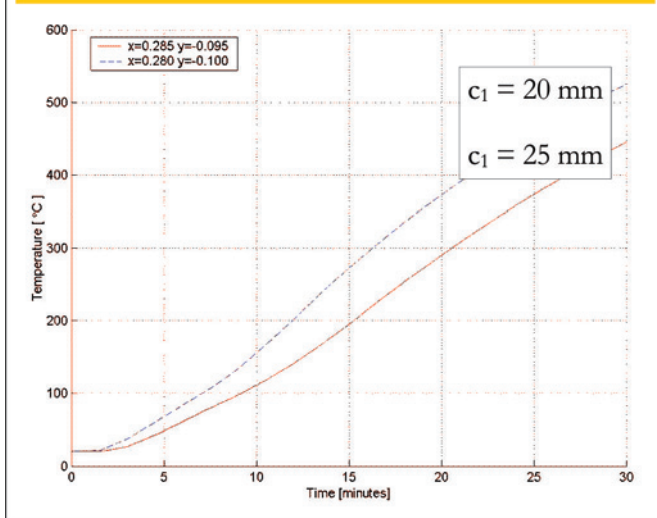


Figura 14 - Elevação de temperatura em nervuras de 8 cm



Em resumo, têm-se os resultados apresentados na tabela 11.

2.3 Aumento de c_1 lateral em alguns casos

Em vista da dificuldade da especificação de 2 cobrimentos diferentes para a mesma viga, neste trabalho visou-se uma alternativa à recomendação do Eurocode [2], empregando o procedimento apresentado a seguir.

Da mesma forma que no item 2.2, com o auxílio do programa de

computador Super Tempcalc foram construídos modelos para larguras de: 8 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 19 cm, 24 cm, 25 cm, 30 cm e 40 cm. Foram determinados os campos térmicos para cada um desses modelos. Na figura 26 um exemplo para largura de 19 cm.

A partir das tabelas 1 e 2, colunas 1 e 2, para cada TRRF (30 a 180 min) foram determinadas as temperaturas:

- θ_1 numa posição distante, simultaneamente, c_1 da face hori-

Figura 15 - Elevação de temperatura em nervuras de 10 cm

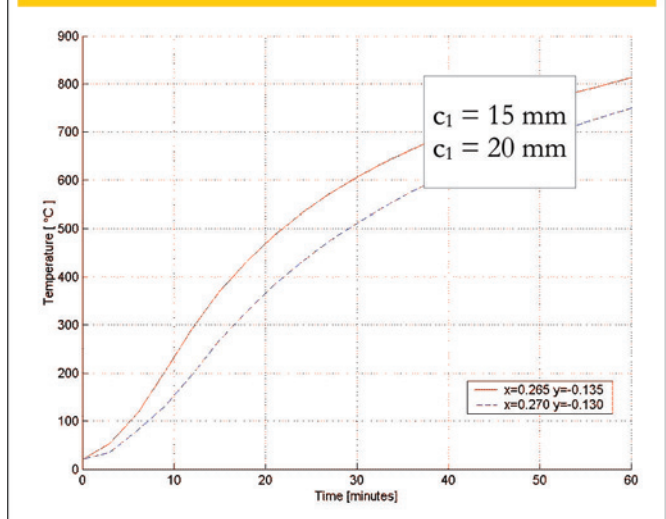


Figura 16 - Elevação de temperatura em nervuras de 10 cm

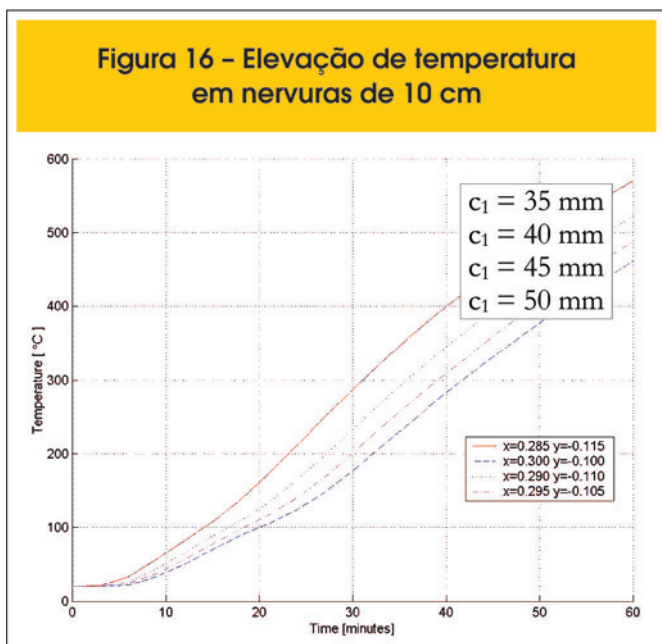
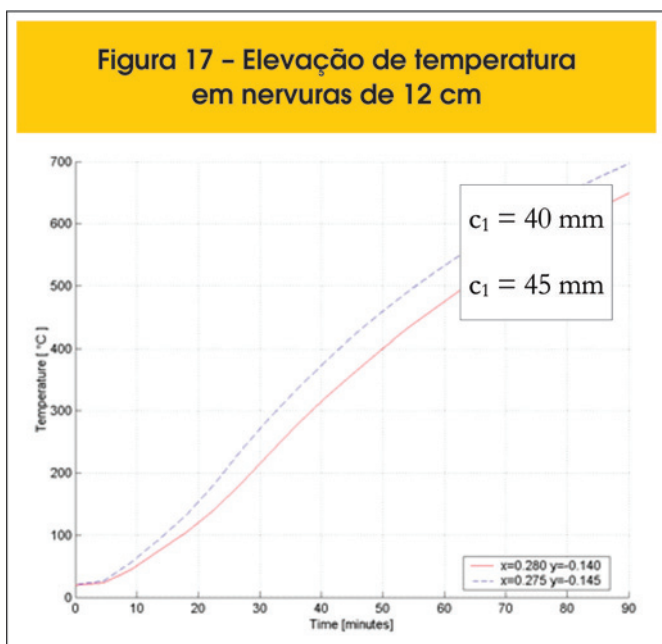


Figura 17 - Elevação de temperatura em nervuras de 12 cm



zonal inferior da viga e $(c_1 + 10)$ mm da face lateral e o correspondente $k_s(\theta_1)$

- θ_2 numa posição distante c_1 tanto da face horizontal inferior da viga como da face lateral e o correspondente $k_s(\theta_2)$

Na figura 27 são apresentados exemplos de curva temperatura-tempo de nervura com largura de 19 cm, nos pontos $c_1 - c_1$ e $c_{1t} - c_1$ para TRRF de 120 min para viga isostática (esquerda) e contínua (direita). Nesses casos, tem-se:

- viga isostática, $\theta_2 = 508,32$ °C, $k_s(\theta_2) = 0,76$ e $\theta_1 = 484$ °C, $k_s(\theta_1) = 0,815$
- viga contínua, $\theta_2 = 675,86$ °C, $k_s(\theta_2) = 0,288$ e $\theta_1 = 634,32$ °C, $k_s(\theta_1) = 0,388$

Em seguida determinaram-se as relações $k_s(\theta_2)/k_s(\theta_1)$. Por exemplo, nos casos da figura 26 tem-se $k_s(\theta_2)/k_s(\theta_1) = 0,9$ para o caso da viga isostática e 0,74 para o da viga contínua.

Foram analisados, também, os casos em que o conjunto cobertura (admitido um mínimo de 25 mm), estribo (admitido um diâmetro mínimo de 5 mm) e diâmetro da barra longitudinal impõe um valor de c_1 superior aos recomendados por [1] ou [2]. Considerando essa análise, as tabelas 12 e 13 apresentam todos os valores de $k_s(\theta_2)/k_s(\theta_1)$.

Como se observa nas tabelas 12 e 13, a redução de resistência caso não se aumente em 10 mm o c_1 é sempre superior a 0,7.

Segundo a tabela 14, percebe-se que a relação entre áreas da seção

Figura 18 - Elevação de temperatura em nervuras de 12 cm

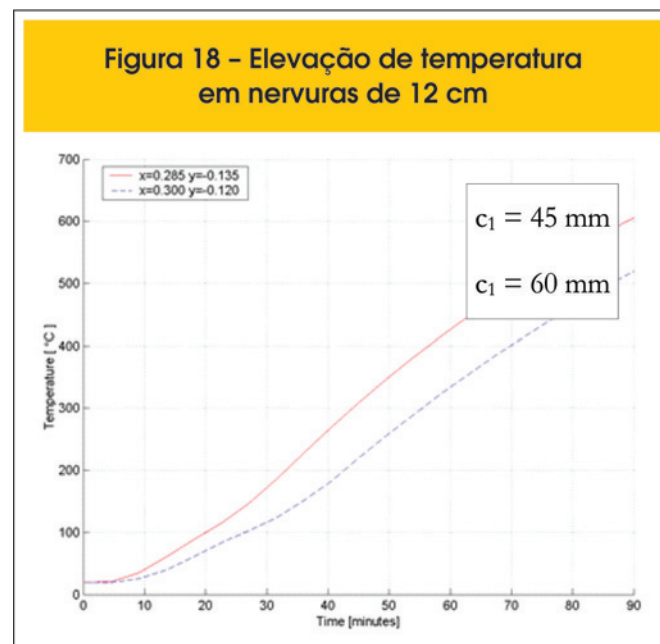


Figura 19 - Elevação de temperatura em nervuras de 16 cm

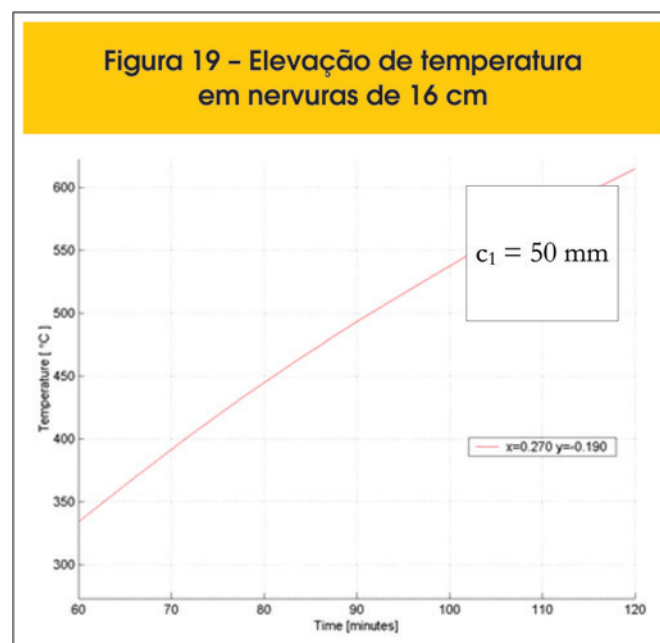


Figura 20 – Elevação de temperatura em nervuras de 13 cm

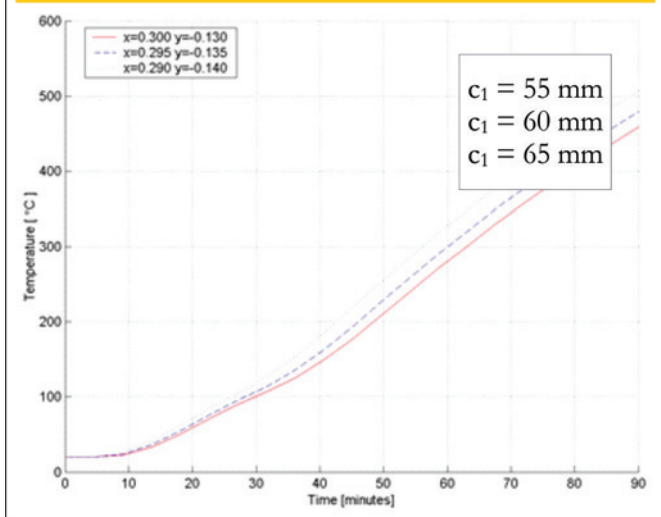


Figura 22 – Elevação de temperatura em nervuras de 15 cm

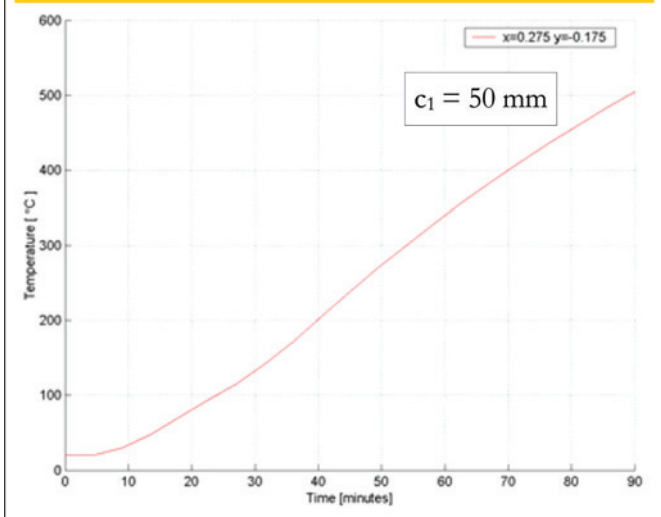


Figura 21 – Elevação de temperatura em nervuras de 14 cm

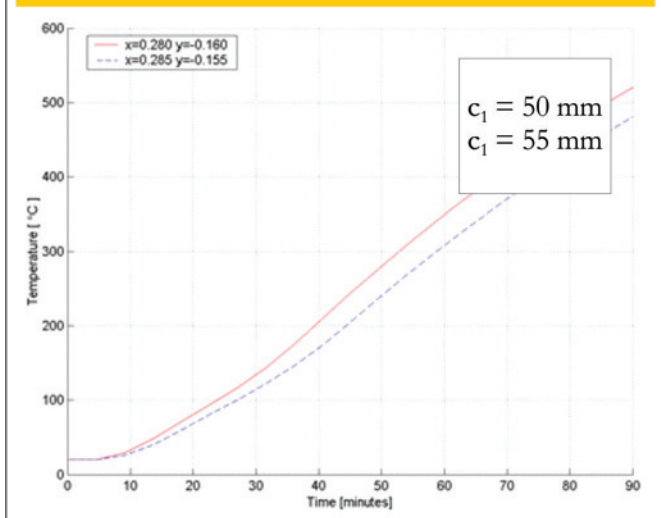
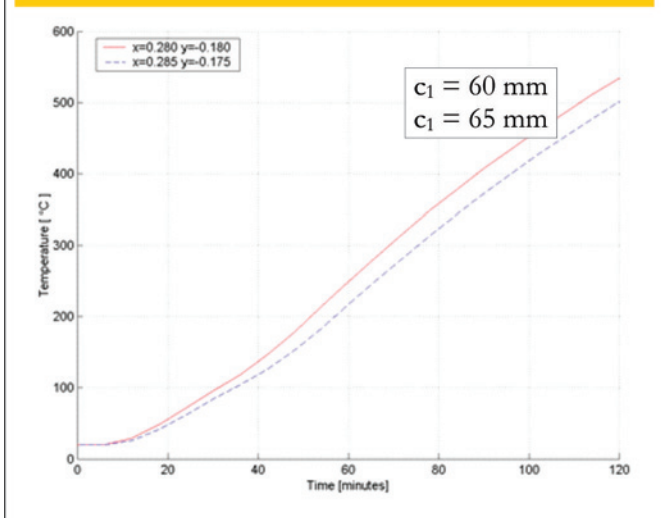


Figura 23 – Elevação de temperatura em nervuras de 16 cm



transversal de uma barra com um determinado diâmetro será sempre menor do que 70% da seção de um diâmetro imediatamente superior ABNT NBR 7480:2007 [5]. Portanto, se ao invés de impor um aumento de c_1 , aumentar-se o diâmetro, sempre se estará a favor da segurança.

3. Conclusões

Neste trabalho executaram-se análises estruturais e térmicas com fins de propor alternativas às recomendações do Eurocode 2, part 1.2, que inspiram a revisão da ABNT NBR 15200:2004. Após essas análises têm-se as seguintes propostas para a revisão da norma brasileira: Os valores de c_1 indicados nas tabelas 1 e 2 deste artigo, podem

pode ser reduzido de Δc_1 , conforme expressão apresentada a seguir, válida nos intervalos

$$0.7 \leq \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \leq 1.0$$

e
$$0.4 \leq \frac{S_{d,fi}}{S_d} \leq 0.7$$

$$\Delta c_1 = 24.5 - 35 \times \frac{S_{d,fi}}{S_d} \times \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$$

A tabela 3 deste texto vale apenas para lajes nervuradas bidirecionais. Para lajes unidirecionais, a tabela 15, apresentada a

seguir, deve ser aplicada às nervuras.

Em vigas com somente uma camada de armaduras e largura não superior ao b_{min} indicado na coluna 2 das tabelas 1 e 2, a distância entre o CG da armadura de canto e a face exposta ao fogo deve ser 10 mm maior do que o c_1 dado pelas referidas tabelas. Alternativamente, caso não se aplique esse aumento, especificar barras de canto com um diâmetro imediatamente superior, conforme ABNT NBR 7480, ao calculado.

4. Agradecimentos

O autor agradece à Astra S/A Indústria e Comércio, à Atex do Brasil

Figura 24 - Elevação de temperatura em nervuras de 22 cm

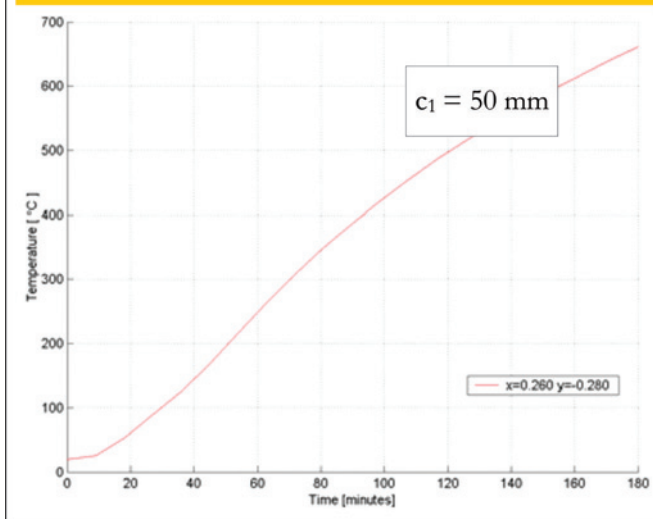


Figura 25 - Elevação de temperatura em nervuras de 22 cm

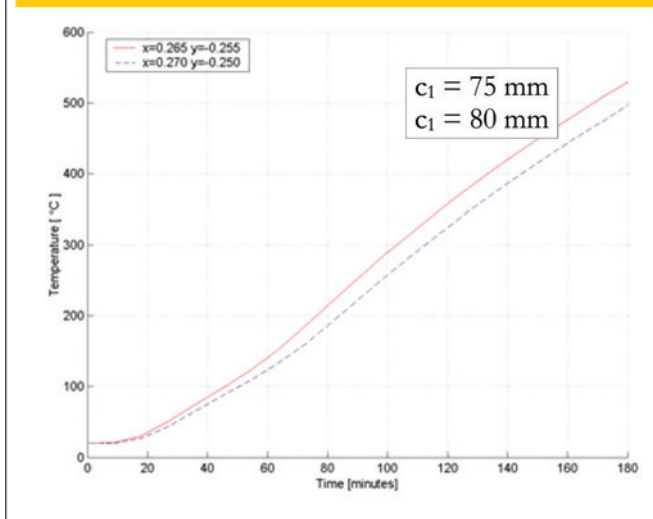


Figura 26 - Geometria adotada e campo de temperaturas para modelo com 19 cm de largura

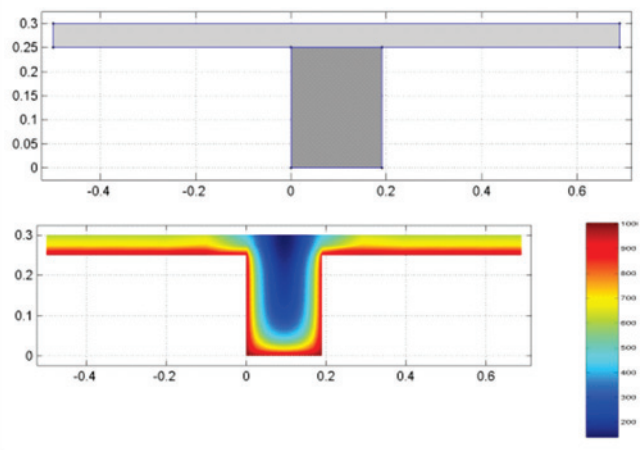


Tabela 11 - Valores mínimos de largura (b) e de c_1 , em mm

TRRF	Nervuras de lajes nervuradas simplesmente apoiadas, unidirecionais
(min)	b_{min}/c_1 (mm)
30	80/25; 100/20
60	100/45; 120/40
90	130/60; 140/55; 150/50
120	160/65; 220/50
180	220/80

Tabela 12 - Relação $k_s(\Theta_2) / k_s(\Theta_1)$ para as dimensões da coluna 1 das tabelas 1 e 2

		isostatica							
TRRF	largura	6,3	8	10	12,5	16	20	25	
30	8	1	1	1	1	1	1	1	
60	12	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,98	
90	14	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
120	19	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
180	24	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
		continua							
TRRF	largura	6,3	8	10	12,5	16	20	25	
30	8	1	1	1	1	1	1	1	
60	12	1	1	1	1	1	1	1	
90	14	0,7	0,7	0,7	0,75	0,9	1	1	
120	19	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	
180	24	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	

Figura 27 – Curvas temperatura-tempo de nervura com largura de 19 cm, nos pontos $c_1 - c_1$ e $c_{1c} - c_1$ para TRRF = 120 min para viga isostática (esquerda) e contínua (direita)

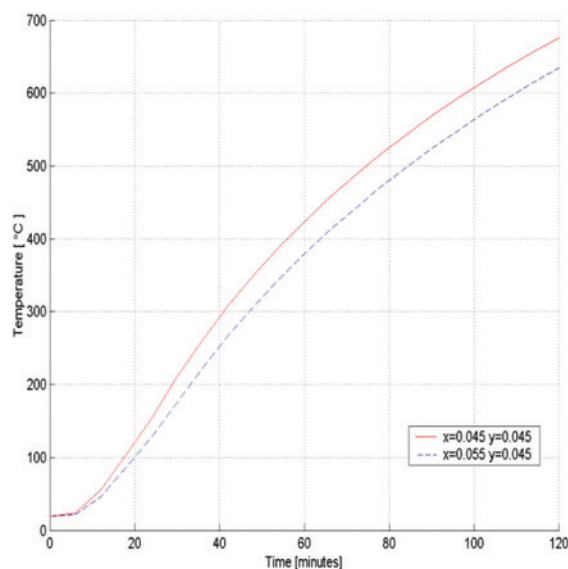
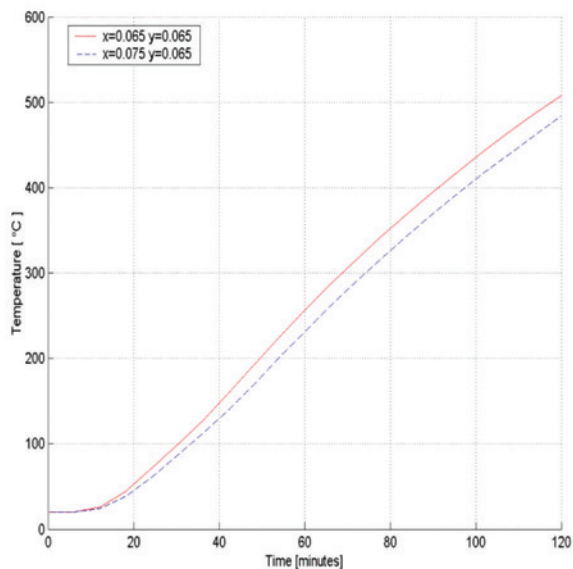


Tabela 13 – Relação $k_s (\Theta_2) / k_s (\Theta_1)$ para as dimensões da coluna 2 das tabelas 1 e 2

isostatica									
TRRF	largura	6,3	8	10	12,5	16	20	25	
30	12	1	1	1	1	1	1	1	1
60	16	0,8	0,8	0,8	0,86	0,98	1	1	
90	19	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
120	24	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	
180	30	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	
continua									
TRRF	largura	6,3	8	10	12,5	16	20	25	
30	16	1	1	1	1	1	1	1	1
60	19	1	1	1	1	1	1	1	1
90	25	1	1	1	1	1	1	1	1
120	30	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1	
180	40	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	

Tabela 14 – Relação entre áreas de barras com diâmetros comercialmente sequenciais

Diâmetro	Área (mm ²)	Relação entre áreas
6,3	31,16	0,62
8	50,24	0,64
10	78,50	0,64
12,5	122,65	0,61
16	200,96	0,64
20	314,00	0,64
25	490,63	-

Ltda., à Ulma Andaimes, Fôrmas e Escoramentos, Ltda, ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico, CNPq e à Fundação de apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP.

5. Bibliografia

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. NBR 15200. Rio de Janeiro. 2004
- [02] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (GEN). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design. EN 1992-1-2. Brussels. 2004.
- [03] FIRE SAFETY DESIGN. TCD with Super Tempcalc. Lund: Fire Safety Design Ltd., 2000. Disponível em <http://www.fsd.se/eng/index.html> [acesso em 09.10.2002].
- [04] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834: fire-resistance tests: elements of building construction: part 1.1: general requirements for fire resistance testing. 25 p. Revision of first edition (ISO 834:1975). Geneva.1990.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.