

Fire design of composite ribbed slabs

Projeto de lajes mistas nervuradas de concreto em incêndio



I. PIERIN^a
igorpierin@usp.br

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

Abstract

The Brazilian standards of structures in fire prescribe minimum dimensions for the ribbed slabs to ensure fire resistance. However, a new composite ribbed slab is not covered by any of the Brazilian standards in fire. The objective of this work is to present unpublished results from numerical and thermal analyses for this type of slab. Ribbed slabs filled with cell concrete blocks, ceramic bricks and EPS supported by cementitious board were studied. The constructive element is considered as thermal insulation if it has the capacity to prevent the occurrence, on the face non exposed to fire, temperature increments greater than 140 °C on the average or greater than 180 °C at any point. The support function was determined limiting the temperature of the beams and slabs rebars to 500 °C. The analyses were carried out with the ATERM and Super Tempcalc, software for two-dimensional thermal analysis by means of the finite element method. As a result, tables will be presented that link the fire resistance required time to slab dimensions and position of rebar. Prior to use in designing these results must be confirmed by experimental analysis, which is already being provided.

Keywords: fire, thermal analysis, ribbed slabs, waffled slabs, composite slabs.

Resumo

As normas brasileiras de estruturas em situação de incêndio fornecem dimensões mínimas para as lajes nervuradas para assegurar as funções corta fogo e de estabilidade estrutural. Porém, uma nova laje mista nervurada lançada no mercado brasileiro não é coberta por qualquer das normas brasileiras para a situação de incêndio. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados inéditos, frutos de análises numéricas térmicas e estruturais para esse tipo de laje. Foram estudadas lajes com preenchimento de bloco de concreto celular, lajota cerâmica e EPS suportado por placa cimentícia. O sistema construtivo é considerado como isolante térmico se possuir a capacidade de impedir a ocorrência, na face que não está exposta ao incêndio, de incrementos de temperatura maiores que 140 °C na média dos pontos de medida ou maiores que 180 °C em qualquer ponto de medida. A função estrutural foi determinada admitindo a limitação da temperatura das armaduras de vigas e lajes em 500 °C. As análises foram realizadas com auxílio dos programas ATERM e Super Tempcalc, programas computacionais para análise térmica bidimensional de transferência de calor, por meio do método dos elementos finitos. Como resultado, serão apresentadas tabelas que correlacionarão o TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo) às dimensões da laje e posição das armaduras. Antes do uso em projeto, esses resultados deverão ser confirmados por análise experimental.

Palavras-chave: incêndio, análise térmica, laje nervurada, laje mista.

^a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

1. Introdução

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 [1] apresenta recomendações para lajes mistas de aço e concreto, com fôrma incorporada, em situação de incêndio. A norma brasileira ABNT NBR 6118:2007 [2] define as lajes nervuradas e prescreve dimensões mínimas para o perfil nervurado a fim de dispensar a verificação da flexão da mesa. A ABNT NBR 15200:2012 [3] fornece dimensões mínimas, por meio do método tabular, para assegurar as funções corta fogo e de estabilidade estrutural.

Um novo tipo de laje mista de aço e concreto foi lançado no mercado. Trata-se de uma laje nervurada em que a fôrma metálica (Figura 1) fabricada pela Tuper é colocada na base da nervura (Figura 2), trabalhando como fôrma e armadura inferior.

Devido às características dessa laje mista nervurada, nenhuma das normas citadas anteriormente cobre o dimensionamento dessa laje em situação de incêndio.

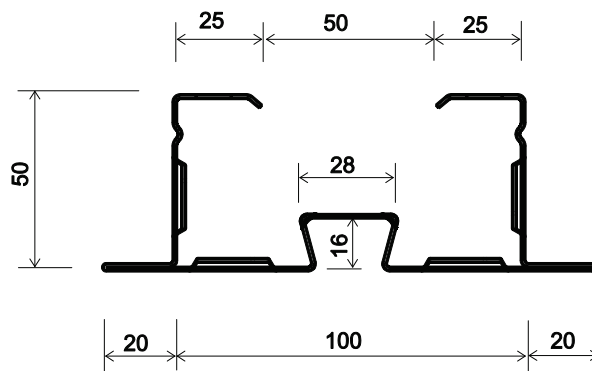
Este trabalho tem por objetivo pesquisar o comportamento dessas lajes nervuradas a altas temperaturas, com a finalidade de se analisar o isolamento térmico, conforme procedimento recomendado pela ABNT NBR 5628:2001 [4] e a capacidade resistente, com base na temperatura-limite de 500 °C nas armaduras [5], [6]. As lajes estudadas são preenchidas com lajotas cerâmicas (Figura 3), bloco de concreto celular (Figura 4) ou EPS sobre placa cimentícia (Figura 5). Este estudo tem como hipótese o perfeito contato entre o material de enchimento e a parede da nervura, portanto, todo é qualquer resultado encontrado neste estudo deve ser comprovado experimentalmente. A vantagem de se realizar uma análise numérica é que se pode avaliar o comportamento de grande quantidade de alternativas, barateando assim a análise experimental, que pode se dedicar a menor número de ensaios.

2. Parâmetros adotados na análise térmica das lajes

2.1 Ação térmica

O modelo de incêndio empregado na análise foi o do incêndio-padrão (Equação 1) conforme [4] e [7], sendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção, α_c , foi adotado igual a

Figura 1 - Fôrma de aço (dimensões em mm)



25 W/m² °C nas faces diretamente aquecidas pelo incêndio e a emissividade resultante, ϵ_{res} , igual a 0,7. Na face não exposta diretamente ao calor, foi tomada uma combinação de convecção e radiação, simulada por $\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Na Equação 1, θ_g é a temperatura dos gases, expresso em graus Celsius (°C), θ_0 é a temperatura ambiente tomada igual a 20 °C e t é o tempo em min.

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

2.2 Propriedades dos materiais

2.2.1 Concreto

Na análise térmica de estruturas é necessário o conhecimento das propriedades térmicas, tais como a densidade, a condutividade

Figura 2 - Laje nervurada com fôrma de aço

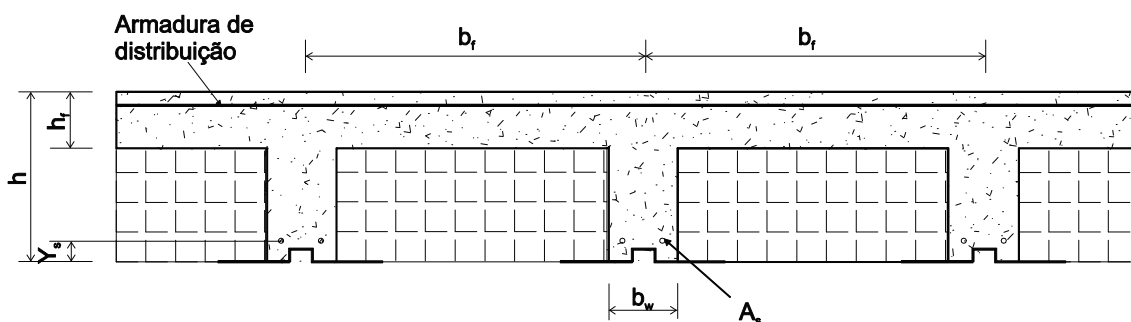
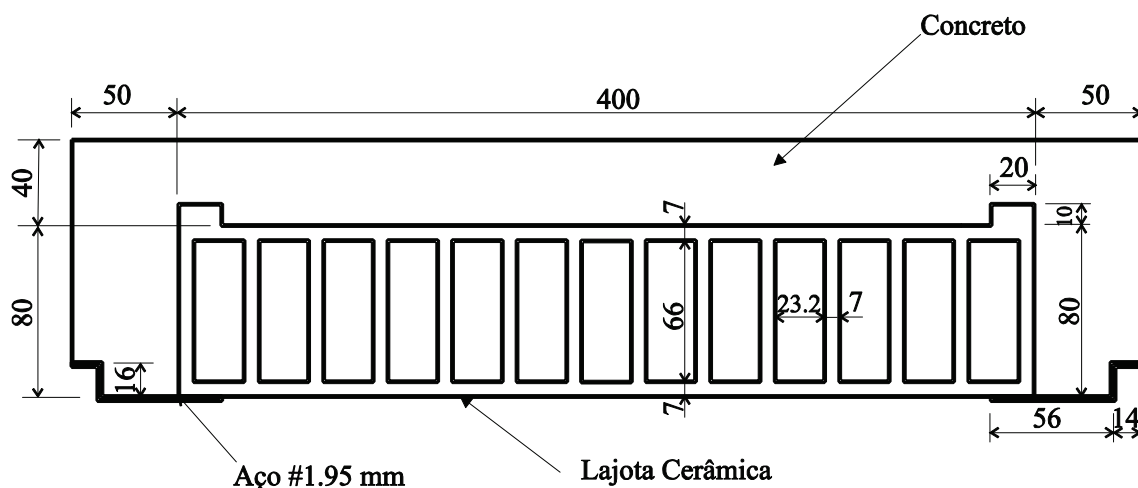


Figura 3 – Modelo com lajota cerâmica (dimensões em mm)



térmica e o calor específico. Esses valores são variáveis com a temperatura e, para o concreto, foi adotada a formulação apresentada na ABNT NBR 15200:2012 [3], sendo que a densidade à temperatura ambiente foi igual a 2400 kg/m^3 , conforme recomendado pela ABNT NBR 6118:2007 [2] e a umidade foi adotada igual a 1,5% em peso.

2.2.2 Aço

Adotaram-se as propriedades como recomendado pela ABNT NBR 14323:2013 [1] também apresentadas em [6].

2.2.3 Lajota cerâmica

Para as lajotas cerâmicas não há um consenso sobre os valores a se adotar para as propriedades necessárias à análise térmica. Apresentam-se na Tabela 1 os valores das propriedades térmicas retirados de bibliografia. Quando não se dispõe de ensaios, a ABNT NBR 15220-2:2005 [8] indica as propriedades das lajotas cerâmicas à temperatura ambiente, também indicadas na Tabela 1.

A condutividade térmica do concreto normal diminui com a temperatura, então, supondo que o mesmo aconteça com a lajota cerâmica.

Figura 4 – Modelo com concreto celular (dimensões em mm)

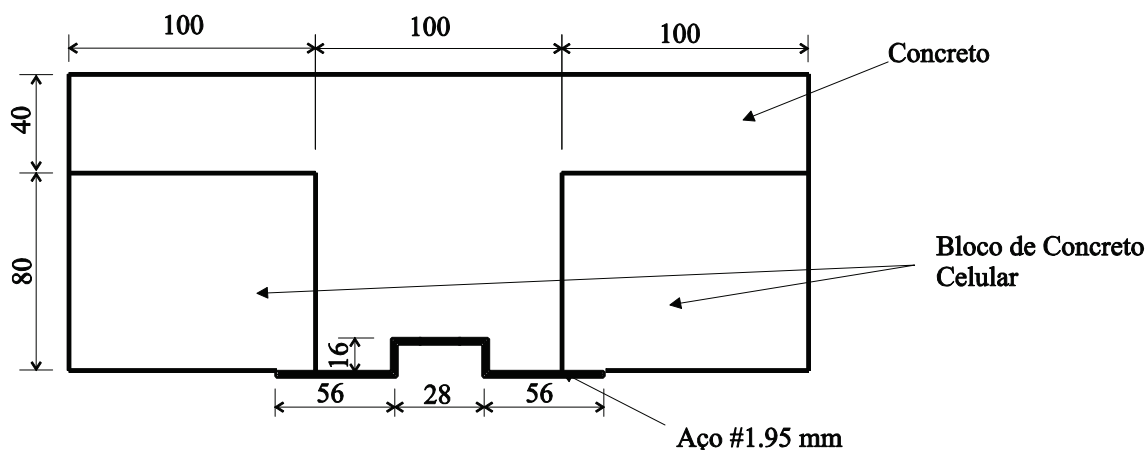
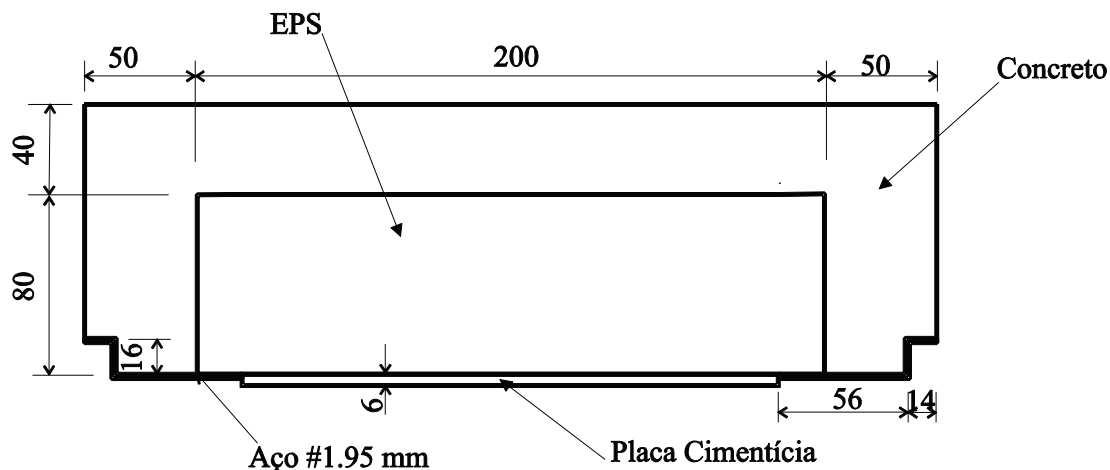


Figura 5 - Modelo com EPS/placa cimentícia (dimensões em mm)



mica, se considerará a favor da segurança, o valor à temperatura ambiente. A favor da segurança serão usadas a maior condutividade térmica (1,05 W/m °C) e a menor capacitância (densidade × calor específico = 1000 kg/m³ × 835 J/kg °C= 835000 J/m³ °C)

2.2.4 Bloco de concreto celular

Para os blocos de concreto celular, também não há um consenso sobre os valores a se adotar para as suas propriedades na análise térmica. Apresentam-se na Tabela 2 as propriedades físico-térmicas fornecidas por algumas empresas fabricantes de blocos

de concreto celular e os retirados de bibliografia. A condutividade térmica do concreto normal diminui com a temperatura, então, supondo que o mesmo aconteça com o concreto celular, se considerará a favor da segurança, o valor à temperatura ambiente. A favor da segurança serão usadas a maior condutividade térmica (0,3 W/m °C) e a menor capacitância (densidade × calor específico = 300 kg/m³ × 850 J/kg °C= 255000 J/m³ °C)

2.2.5 Placa cimentícia

Após extensa pesquisa sobre as propriedades físico-térmicas de

Tabela 1 - Propriedades de lajotas cerâmicas à temperatura ambiente

Fonte	Densidade (kg/m ³)	Condutividade (W/m°C)	Calor específico (J/kg K)
CADORIN (9)	1600	0,7	840
INCROPERA; DEWITT (10)	1920	0,72	835
ABNT NBR 15220-2:2005 (8)	1000 – 2000	0,70 – 1,05	920

Tabela 2 - Propriedades de blocos de concreto celular à temperatura ambiente segundo alguns fabricantes

Fabricante	Densidade (kg/m ³)	Condutividade (W/m°C)	Calor específico (J/kg °C)
SIPOREX (11)	300 – 650	0,12 – 0,15	1000 – 1100
CONSTRUPOR (12)	400 – 800	0,28	1008
SICAL (13)	430 – 500	0,097	-
BARREIRA e FREITAS (14)	525	0,30	1050
GAWIN et al (15)	400 – 600	0,115 – 0,162	850
ABNT NBR 15220-2:2005 (8)	400 – 500	0,17	1000

Tabela 3 – Propriedades térmicas da placa cimentícia à temperatura ambiente segundo alguns fabricantes e norma brasileira

Fabricante	Densidade (kg/m ³)	Condutividade (W/m°C)	Calor específico (J/kg °C)
DUROCK – KNAUF (16)	1200	2,22	-
BRASILIT (17)	1700	0,35	-
ETERNIT (18)	1700	0,48	-
AQUAPANEL – KNAUF (16)	1150	0,35	-
ABNT NBR 15220-2:2005 (8)	1400 – 2200	0,65 – 0,95	840

Tabela 4 – Propriedades térmicas da placa cimentícia analisadas

Simulação	Densidade (kg/m ³)	Condutividade (W/m°C)	Calor específico (J/kg K)
1	1200	2,22	840
2	1700	0,35	840
3	1700	0,48	840
4	1150	0,35	840
5	1400	0,95	840
6	Propriedades do concreto – ver item 2.2.1.		
7	Sem a placa cimentícia		

placas cimentícias encontraram-se poucos resultados e com grande variabilidade entre eles como se pode ver na Tabela 3.

Em virtude da grande variabilidade dos valores das propriedades da placa cimentícia, realizou-se um estudo para verificar a influência das propriedades térmicas da placa cimentícia no campo de temperaturas da laje. De acordo com as propriedades térmicas apresentadas neste item, foram realizadas sete si-

mulações em que se variaram as propriedades da placa cimentícia conforme mostra a Tabela 4. Na sexta simulação foram adotadas as propriedades térmicas do concreto para a placa cimentícia. Na sétima simulação não foi considerada a presença da placa cimentícia, ou seja, as faces laterais da nervura e a face inferior da capa de concreto estão expostas diretamente ao incêndio.

Figura 6 – Pontos de controle para a análise

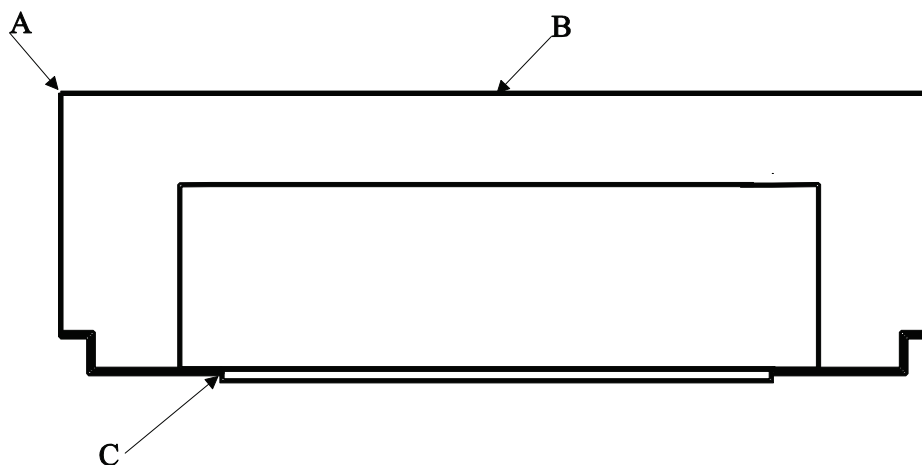


Figura 7 - Variação de temperatura do ponto A

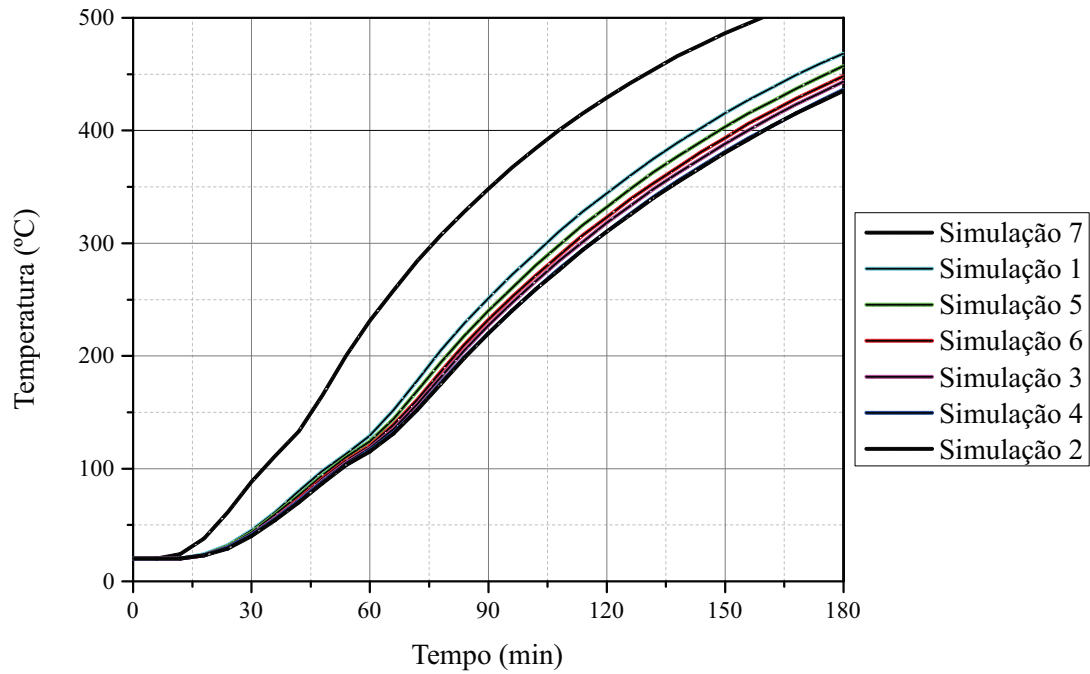


Figura 8 - Variação de temperatura do ponto B

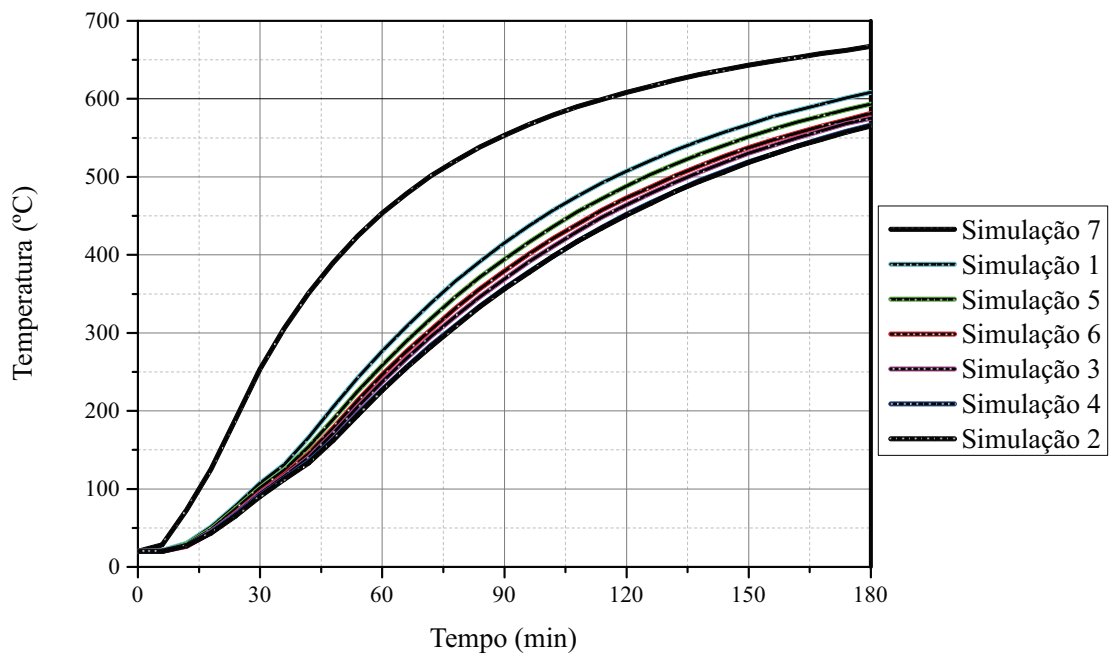
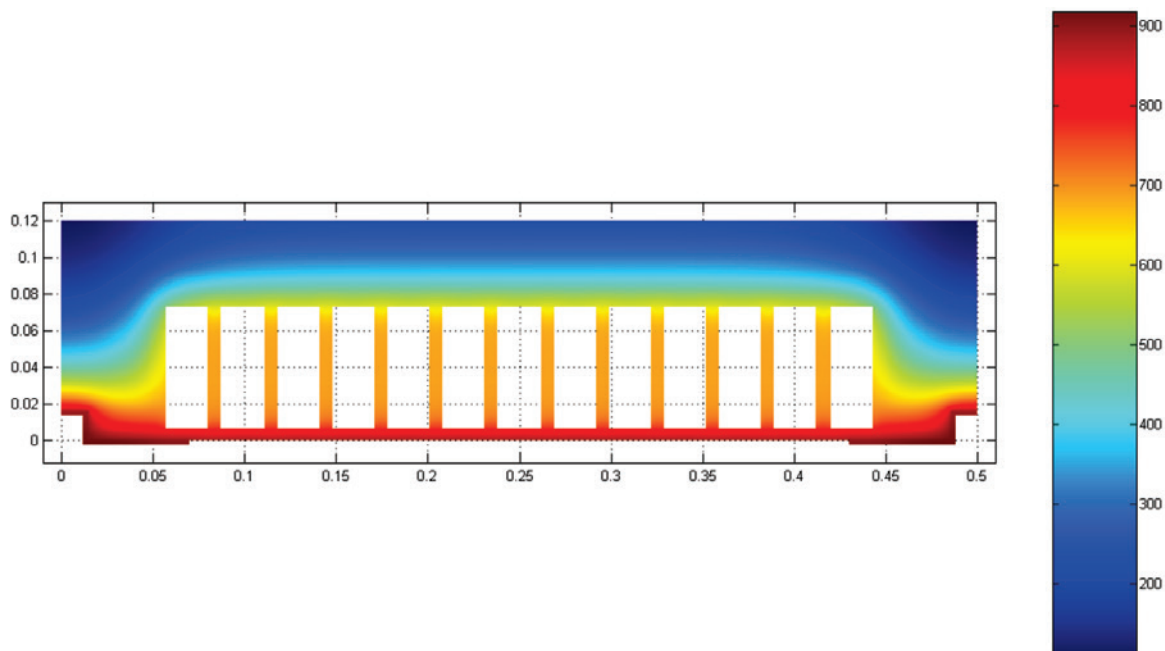


Figura 9 – Campo de temperaturas após 60 minutos de incêndio



Para verificar a influência das propriedades físico-térmicas no campo de temperaturas da laje, analisou-se a variação da temperatura em três pontos, conforme mostra a Figura 6: ponto A – canto superior esquerdo da nervura, ponto B – ponto médio da face superior da capa de concreto e ponto C – localizado na chapa de aço.

Por meio do programa *Super TempCalc* [19] de análise térmica foram traçados gráficos que mostram a variação da temperatura em função do tempo de exposição ao incêndio dos pontos A, B e C.

Como exemplo se apresentam as Figuras 7 e 8.

Como se nota nas Figuras 7 e 8, apesar de a placa cimentícia ser de pequena espessura sua proteção não é desprezável se comparada às curvas associadas à simulação 7, sem placa cimentícia. Por outro lado, as características físico-térmicas, simulações 1 a 6, não afetam profundamente os resultados. Por este estudo ser numérico e pela grande variabilidade encontrado nos valores das propriedades da placa, optou-se por admitir as propriedades da simulação 1, a favor da segurança

Figura 10 – Isotermas após 60 minutos de incêndio

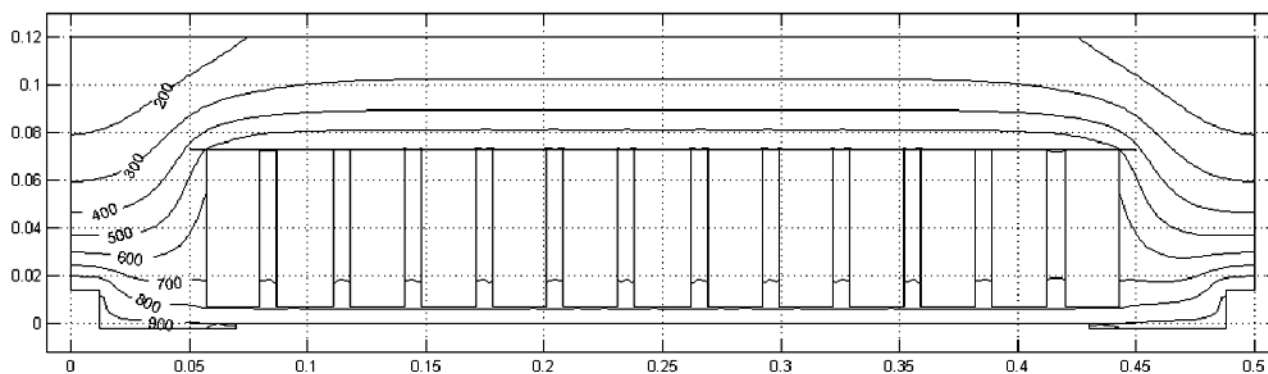


Tabela 5 – Temperaturas máximas e medias na face superior da laje com capa entre 4 cm e 6 cm

Tempo (min)	Capa com 4 cm		Capa com 5 cm		Capa com 6 cm	
	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)
30	92	78,9	64	56,0	46	41,1
60	238	206,7	171	150,3	126	113,3
90	365	327,8	288	257,2	226	200,3
120	454	417,3	374	342,6	307	280,1
150	517	481,7	439	407,6	370	343,0
180	560	528,1	487	457,0	419	392,9

3. Análises das lajes preenchidas com lajota cerâmica

3.1 Laje tipo 12-4

Analisou-se, empregando o programa *Super TempCalc* [19], o comportamento térmico da laje nervurada de concreto preenchida com lajota cerâmica. Primeiramente, adotou-se a espessura da laje de concreto igual a 4 cm, altura da nervura a partir da capa igual a 8 cm, largura da nervura

igual a 10 cm, lajota cerâmica de 8,0 cm de altura e a espessura da vigota metálica de 1,95 mm, conforme mostra a Figura 3. Nos furos da lajota cerâmica foi considerada a presença de ar. Foram analisados os campos de temperatura para 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos de exposição ao incêndio-padrão. Como exemplo apresentam-se nas Figuras 9 e 10, respectivamente, o campo térmico e as isoterma para 60 minutos.

3.2 Outras espessuras de capa ou capa mais revestimento

Para avaliar o isolamento térmico da laje com lajota cerâmica,

Tabela 6 – Temperaturas máximas e médias na face superior da laje com capa de 7 cm e 8 cm

Tempo (min)	Capa com 7 cm		Capa com 8 cm	
	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)
30	35	32,0	28	26,4
60	101	90,1	79	70,5
90	173	154,3	134	122,1
120	251	227,0	203	182,2
150	312	287,5	261	239,8
180	360	336,3	308	287,1

Tabela 7 – Valores de TRRF para isolamento térmico

Espessura da capa mais argamassa de cimento e areia (cm)	TRRF isolamento térmico (min)
4	49
5	62
6	76
7	92
8	108

Tabela 8 – Distâncias da isoterma de 500 °C

Tempo (min)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)
30	1,6	2,4	0,9
60	3,6	3,6	2,2
90	5,1	5,1	3,7

Figura 11 – Laje mista incluindo distâncias controladas

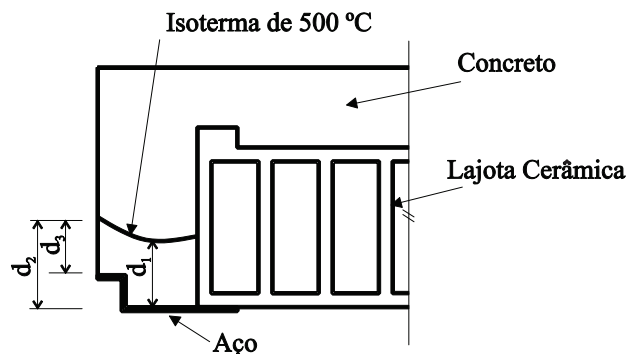


Tabela 9 – c_1 mínimo para a laje nervurada tipo 12-4

Tempo (min)	c_1 vertical (cm)	c_1 horizontal (cm)
30	2,5	2,5
60	3,5	5,0
90	5,0	5,0

variou-se a espessura da capa de concreto de 4 a 8 cm. Tendo em vista que as propriedades físico-térmicas de argamassa de cimento e areia são próximas das do concreto, a espessura da capa usada nos modelos computacionais pode ser substituída, na prática, pela espessura real da capa mais uma camada de argamassa de cimento e areia. A altura da nervura sem a capa foi mantida igual a 8 cm. As temperaturas máximas e médias obtidas na face superior da laje para as espessuras de capa iguais a 4, 5, 6, 7 e 8 cm estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6. A partir das Tabelas 5 e 6 pode-se construir a Tabela 7 que associa a espessura da capa ao tempo de resistência ao fogo para isolamento térmico. Na Tabela 8 estão apresentadas as distâncias entre a face inferior

Figura 12 – Campo de temperaturas após 60 min

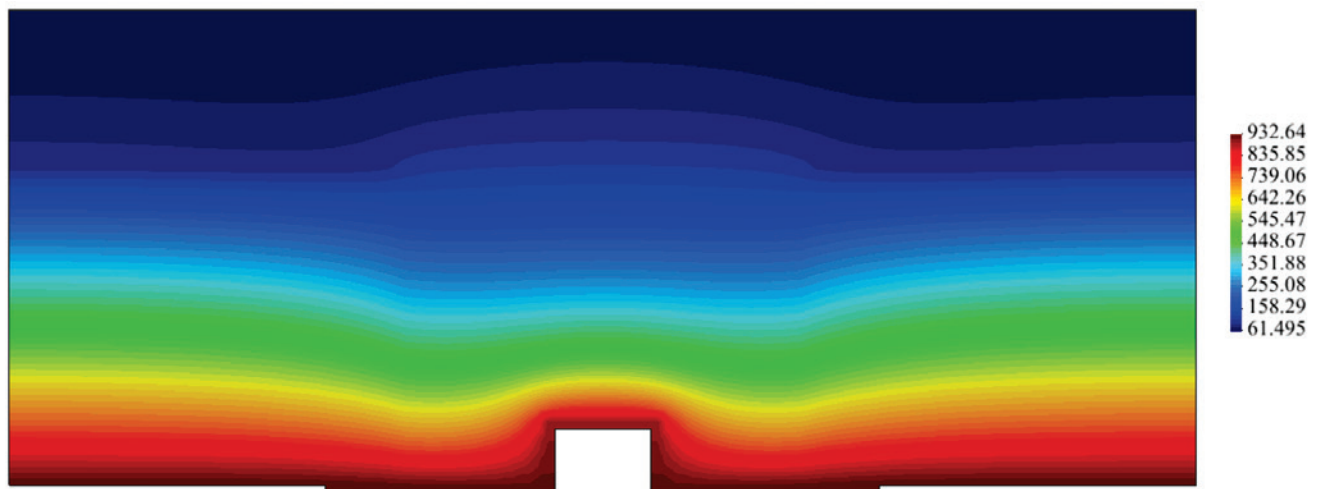


Figura 13 – Isotermas para 60 min

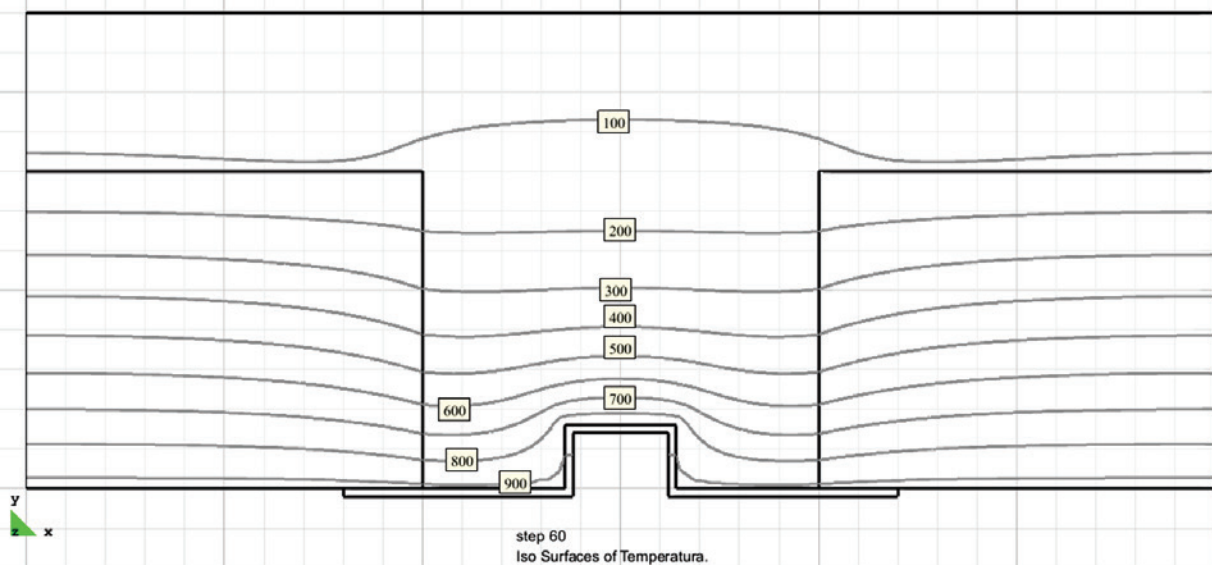
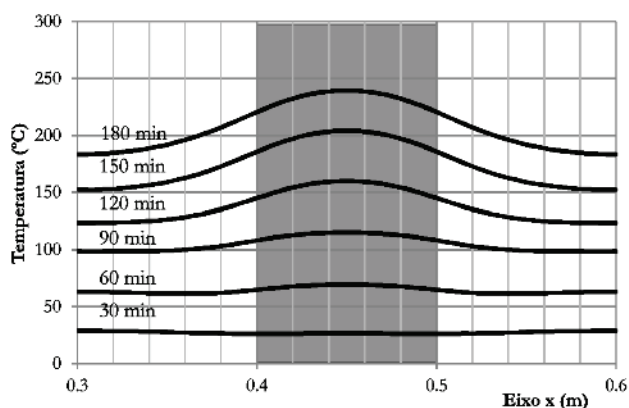


Tabela 10 - Temperaturas na face superior para capa de 4 a 6 cm

Tempo (min)	Capa com 4 cm			Capa com 5 cm			Capa com 6 cm		
	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C) nervura	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C) nervura	$\theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C)	$\theta_{m\acute{e}d}$ (°C) nervura
30	28,9	27,2	26,3	24,9	23,9	23,3	22,6	22,0	21,6
60	69,5	64,2	67,8	54,5	51,2	53,3	43,6	41,7	41,7
90	115,2	104,7	112,7	96,0	87,0	93,7	78,4	71,8	76,7
120	159,9	137,5	154,4	129,5	115,6	125,9	109,8	99,6	107,4
150	204,1	174,0	197,3	166,7	144,1	161,3	137,3	122,2	133,6
180	239,5	207,6	232,5	201,2	174,5	195,3	167,5	147,1	162,9

Figura 14 - Temperaturas ao longo da face superior da laje com bloco de 8 cm e capa de 4 cm



da nervura e o ponto mais baixo (d_1) e o mais alto (d_2) da isoterma de 500 °C e a mínima distância entre a isoterma de 500 °C e o topo da reentrância de aço (d_3), conforme mostra a Figura 11.

Para TRRF superiores a 120 minutos a isoterma de 500 °C corta

Tabela 11 - Distâncias da isoterma de 500 °C

Tempo (min)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)
30	1,4	2,4	0,6
60	2,8	3,3	1,6
90	3,8	4,1	2,4
120	4,6	4,8	3,1
150	5,2	5,3	3,8
180	5,8	5,9	4,4

a capa de concreto da laje. A armadura deveria ser colocada na capa e no meio da nervura o que não é praticável. A partir das análises efetuadas propõem-se a Tabela 9. Os valores foram arredondados em vista da dificuldade de precisão milimétrica em obra. Observa-se que os valores de c_1 da Tabela 9 são considerados elevados. Porém, para fins estruturais podem ser compensados aumentando a altura da nervura. Isso nada afetará os resultados encontrados neste trabalho.

Figura 15 - Laje mista analisada

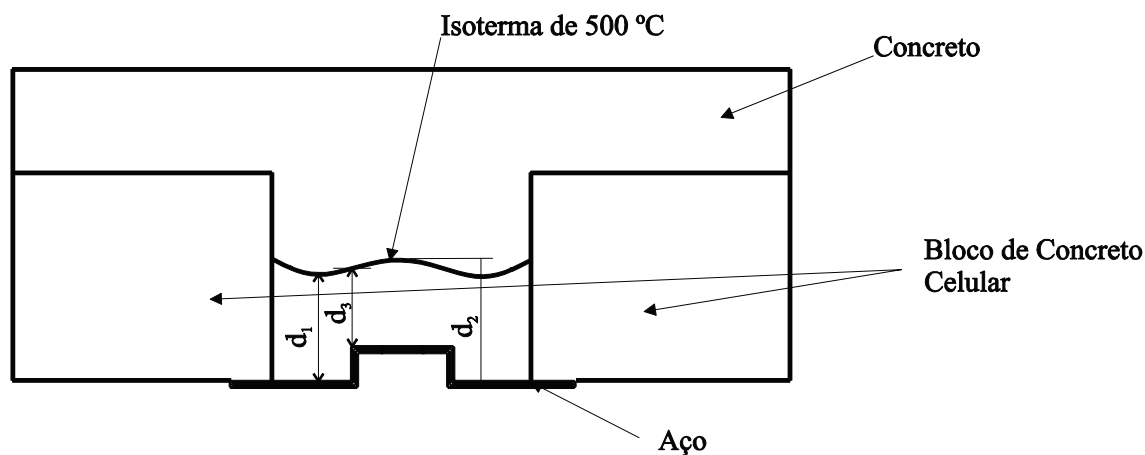


Tabela 12 – Temperaturas na face superior para as lajes 16-4, 20-4 e 25-4

Tempo (min)	Laje 16-4			Laje 20-4			Laje 25-4		
	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C) nervura	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C) nervura	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C) nervura
30	21,4	20,9	20,5	20,2	20,1	20,0	20,1	20,0	20,0
60	34,8	32,8	31,9	24,4	23,2	22,4	23,2	22,2	21,5
90	57,1	54,9	56,3	34,0	32,5	31,8	31,0	29,4	28,7
120	85,5	79,9	83,9	47,3	46,0	46,8	41,7	40,8	41,1
150	110,3	102,6	108,5	65,0	61,4	63,9	57,0	54,3	56,2
180	133,0	120,5	129,8	82,7	77,2	81,2	73,1	68,5	71,9

Tabela 13 – Distâncias da isoterma de 500 °C para as lajes 16-4, 20-4 e 25-4

Tempo (min)	Laje 16-4			Laje 20-4			Laje 25-4		
	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)
30	1,4	2,3	0,6	1,4	2,3	0,6	1,4	2,3	0,6
60	2,9	3,3	1,5	2,9	3,3	1,5	2,9	3,3	1,5
90	3,9	4,1	2,4	3,9	4,1	2,4	4,0	4,1	2,5
120	4,8	5,0	3,3	4,8	4,9	3,3	4,8	4,9	3,2
150	5,5	5,5	3,9	5,6	5,6	4,0	5,6	5,6	4,0
180	6,0	6,0	4,4	6,2	6,2	4,6	6,2	6,2	4,6

4. Análises das lajes preenchidas com bloco de concreto celular

4.1 Laje tipo 12-4

Realizou-se a análise do comportamento térmico da laje nervurada de concreto preenchida com bloco de concreto celular. Primeiramente, adotou-se a espessura da laje de concreto igual a 4 cm, altura do bloco cerâmico igual a 8 cm, largura da viga igual a 10 cm e a espessura da vigota metálica de 1,95 mm, conforme mostra a Figura 3. Devido à continuidade da laje, foi modelada apenas uma nervura com largura da mesa colaborante igual a 30 cm. Por meio do programa ATERM [20] foi realizada a análise térmica da laje para 30, 60, 90, 120, 150 e 180 min. Como exemplo, se apresentam o campo de

temperaturas e as isotermas para 60 min de incêndio-padrão nas Figuras 12 e 13.

Na Tabela 10 são apresentadas as temperaturas mínima, máxima e média obtidas na face superior da laje para os tempos de 30 a 180 min de exposição ao incêndio. Também são apresentadas temperaturas médias na face superior da laje na região da nervura. A variação da temperatura ao longo da face superior da laje para os tempos de 30 a 180 minutos está apresentada na Figura 14, onde a área hachurada indica a região da nervura. Observa-se que as maiores temperaturas ocorrem na região da nervura.

Verifica-se que a laje nervurada estudada com capa de 4 cm e preenchida com bloco de concreto celular com 8 cm de altura atende aos requisitos de isolamento térmico para TRRF de até 120 min.

Tabela 14 – TRRF para as lajes preenchidas com bloco de concreto celular

Tipo de laje	Altura total (mm)	Altura de capa (mm)	TRRF (min)
12-4	120	40	120
12-5	120	50	150
12-6	120	60	180
16-4, 20-4, 25-4	160 a 250	40	180

Tabela 15 – c_1 , mín para lajes nervuradas preenchidas com bloco de concreto celular com largura e altura de nervuras de no mínimo 100 mm e 80 mm, respectivamente

Tempo (min)	c_1 (cm)
30	2,5
60	3,5
90	4,0
120	5,0
150	5,5
180	6,5

4.2 Outras espessuras de capa ou capa mais revestimentos

Para uma melhor avaliação do isolamento térmico da laje, adotou-se uma espessura da capa de concreto de 5 cm. A análise térmica foi refeita e verificou-se que, conforme mostra a Tabela 10, a laje estudada atende os requisitos de isolamento térmico para TRRF de até 150 min. Nova análise realizada para a espessura de 6 cm comprovou que a condição de isolamento térmico é atendida para TRRF de até 180 min, conforme mostra a Tabela 10.

Para se empregar o método simplificado da temperatura-limite de 500 °C nas armaduras, construiu-se a Tabela 11 em que se apresenta, para a laje com capa de 4 cm, as distâncias entre a face inferior da nervura e o ponto mais baixo (d_1) e o mais alto (d_2) da isoterma de 500 °C e a mínima distância entre a isoterma de 500 °C e o topo da reentrância de aço (d_3), conforme mostra a Figura 15.

Do estudo realizado, conclui-se que a segurança é verificada se o centro geométrico (CG) das barras mantiver uma distância da face inferior da nervura superior a 2,4 cm. Para TRRF de 60 min, esse valor sobe para 2,8 cm. Para TRRF superiores a 90 min, os valores encontrados não seriam utilizáveis na prática. Assim, a próxima análise será para blocos de maior de altura.

Foram analisadas também as lajes tipo 16-4, 20-4 e 25-4, o que corresponde à capa com 4 cm de espessura e nervura mais capa com 16, 20 e 25 cm de altura (respectivamente, bloco com 12 cm, 16 cm e 21 cm de altura). Na Tabela 12 são apresentadas as temperaturas mínima, máxima e média obtidas na face superior da laje para os tempos de 30 a 180 minutos de exposição ao incêndio. Também são apresentadas temperaturas médias na face superior da laje na região da nervura.

Na Tabela 13 estão apresentadas as distâncias entre a face inferior da nervura e o ponto mais baixo (d_1) e o mais alto (d_2) da isoterma de 500 °C e a mínima distância entre a isoterma de 500 °C

e o topo da reentrância de aço (d_3), conforme mostra a Figura 15. Observando-se a Tabela 13, pode-se construir a Tabela 14, no que se refere ao isolamento térmico.

Observando-se a Tabela 13, pode-se notar que os valores de d_1 se equivalem, ou seja, pouco dependem da altura da nervura. Assim sendo, propõem-se os valores mínimos de c_1 , distância do CG da armadura até a base da nervura, indicados na Tabela 15. Os valores foram arredondados em vista da dificuldade de precisão milimétrica em obra.

Observa-se que os valores de c_1 da Tabela 15 considerados elevados para fins estruturais podem ser compensados aumentando a altura da nervura. Isso nada afetará os resultados encontrados neste trabalho.

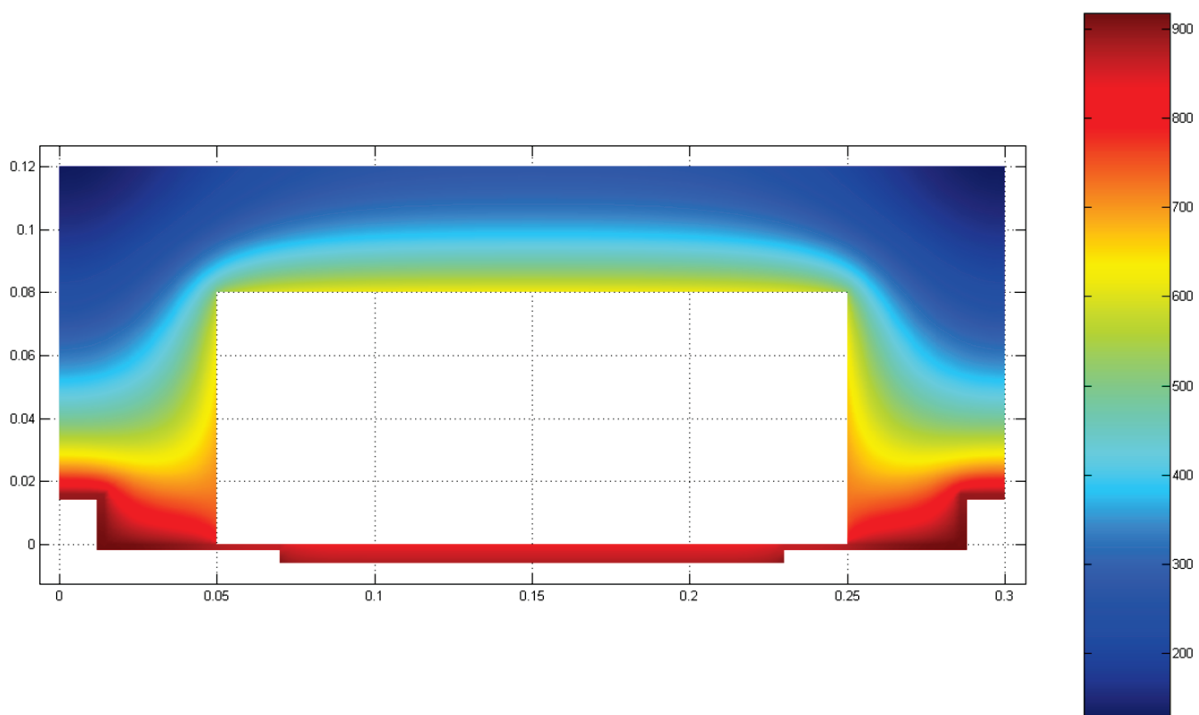
5. Análises das lajes preenchidas com bloco EPS apoiados sobre placa cimentícia

5.1 Laje tipo 12-4

Analisou-se o comportamento térmico da laje nervurada de concreto preenchida com bloco de EPS sobre placa cimentícia empregando-se o programa *Super TempCalc* [19]. Não se considerou na análise a presença do EPS em vista de ele ser consumido rapidamente pelo calor. Primeiramente, adotou-se a espessura da laje de concreto igual a 4 cm, altura da nervura a partir da capa igual a 8 cm, largura da nervura igual a 10 cm, placa cimentícia de 6,0 mm de espessura e a espessura da vigota metálica de 1,95 mm, conforme mostra a Figura 5.

Foram analisados os campos de temperatura para 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos de exposição ao incêndio-padrão. Como exemplo apresentam-se nas Figuras 16 e 17, respectivamente, o campo térmico e as isotermas para 60 minutos.

Figura 16 - Campo de temperaturas após 60 minutos de incêndio



5.2 Outras espessuras de capa ou capa mais revestimento

Para avaliar o isolamento térmico da laje com placa cimentícia,

variou-se a espessura da capa de concreto de 4 a 8 cm. Tendo em vista que as propriedades físico-térmicas de argamassa de cimento e areia são próximas das do concreto, a espessura da capa usada nos modelos computacionais pode ser substituída, na

Figura 17 - Isotermas após 60 minutos de incêndio

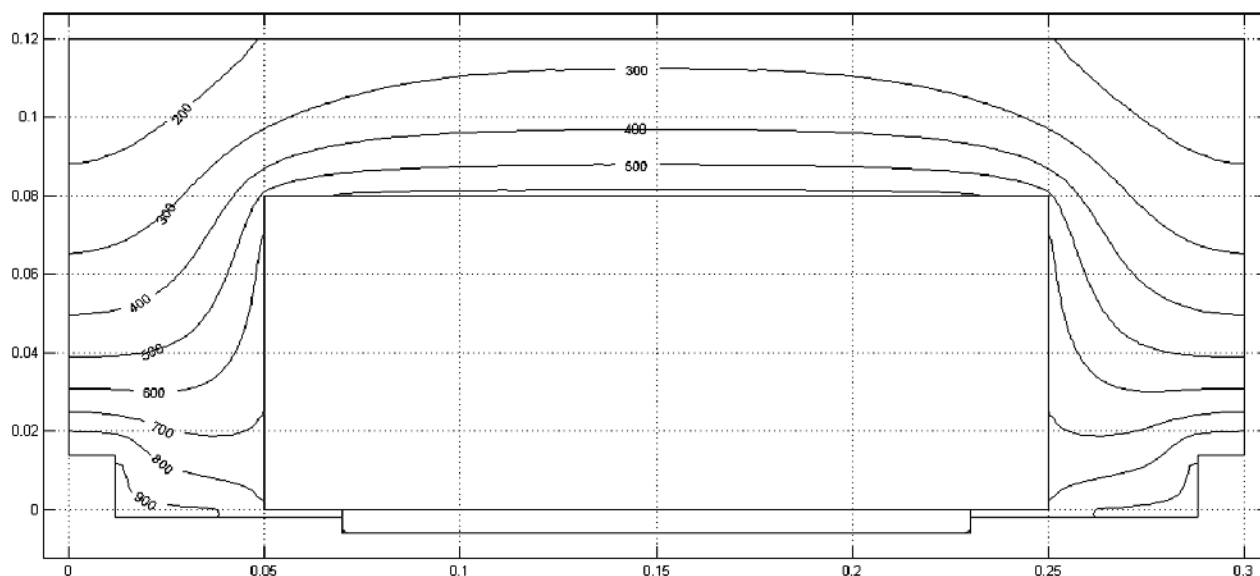


Tabela 16 - Temperaturas máximas e médias na face superior da laje com capa de 4 cm a 6 cm

Tempo (min)	Capa com 4 cm		Capa com 5 cm		Capa com 6 cm	
	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)
30	107	85,4	76	61,1	54	44,9
60	276	222,5	200	162,9	143	121,3
90	415	354,0	327	278,5	256	216,7
120	507	446,9	418	368,4	342	301,8
150	567	511,1	483	434,9	407	367,0
180	608	556,3	529	484,1	456	417,6

Tabela 17 - Temperaturas máximas e médias na face superior da laje com capa de 7 cm e 8 cm

Tempo (min)	Capa com 7 cm		Capa com 8 cm	
	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)	$\theta_{\text{máx}}$ (°C)	$\theta_{\text{méd}}$ (°C)
30	40	34,5	31	28,1
60	112	95,7	88	75,1
90	197	166,9	149	130,5
120	278	245,5	224	197,1
150	340	308,2	284	257,4
180	390	358,2	332	306,1

prática, pela espessura real da capa mais uma camada de argamassa de cimento e areia. A altura da nervura foi considerada igual a 8 cm. As temperaturas máximas e médias obtidas na face superior da laje para as espessuras de capa iguais a 4, 5, 6, 7 e 8 cm estão apresentadas nas Tabelas 16 e 17.

A partir das Tabelas 16 e 17 pode-se construir a Tabela 18 para isolamento térmico. Por curiosidade, incluem-se os valores normalizados pela ABNT NBR 15200:2012 no caso da ausência da placa cimentícia.

Para se empregar o método simplificado da temperatura-limite de 500 °C nas armaduras foi construída a Tabela 19 onde estão apresentadas as distâncias entre a face inferior da nervura e o ponto

mais baixo (d_1) e o mais alto (d_2) da isoterma de 500 °C e a mínima distância entre a isoterma de 500 °C e o topo da reentrância de aço (d_3), conforme mostra a Figura 18.

Para TRRF superiores a 120 min a isoterma de 500 °C corta a capa de concreto da laje. A armadura deveria ser colocada na capa e no meio da nervura o que não é praticável. Observando-se a Tabela 8, propõem-se a Tabela 20. Os valores foram arredondados em vista da dificuldade de precisão milimétrica em obra.

Os valores de c_1 da Tabela 20 são considerados elevados, porém para fins estruturais podem ser compensados aumentando a altura da nervura. Isso nada afetará os resultados encontrados neste trabalho.

6. Comparações à norma brasileira

Comparando-se as lajes preenchidas às sem preenchimento, elas deveriam seguir as recomendações da ABNT NBR 15200:2012 [3], apresentam-se na Tabela 21, de forma resumida, os resultados deste estudo e na última coluna as exigências da norma brasileira para TRRF em função do isolamento térmico.

Na Tabela 22 apresentam-se de forma resumida os resultados deste estudo e na última coluna as exigências da norma brasileira para c_1 mínimo.

7. Conclusões

Neste trabalho analisaram-se lajes mistas nervuradas pre-

Tabela 18 - Valores de TRRF para isolamento térmico

Espessura da capa mais argamassa de cimento e areia (cm)	TRRF isolamento térmico (min)	TRRF sem a placa (min)
4	30	-
5	59	-
6	72	30
7	87	45
8	103	60

Figura 18 - Laje mista incluindo distâncias controladas

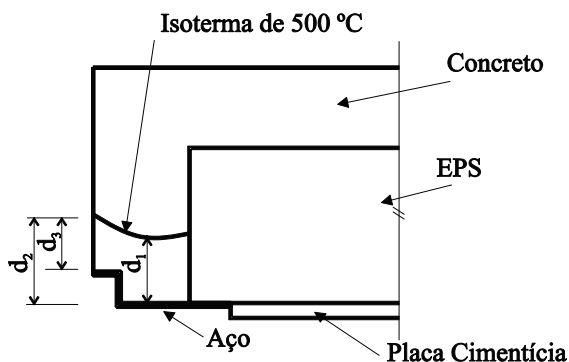


Tabela 19 - Distâncias da isoterma de 500 °C

Tempo (min)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)
30	1,6	2,4	0,9
60	3,8	3,8	2,4
90	5,8	5,8	4,4

Tabela 20 - c_1 mínimo para a laje nervurada estudada

Tempo (min)	c_1 vertical (cm)	c_1 horizontal (cm)
30	2,5	2,5
60	4,0	5,0
90	6,0	5,0

Tabela 21 - Valores de TRRF (min) para isolamento térmico de lajes mistas nervuradas do tipo 12-4

Espessura da capa mais argamassa de cimento e areia (cm)	Lajota cerâmica	Bloco de concreto celular	EPS sobre placa cimentícia	NBR 15200:2012 (3)
4	49	120	30	Não permitido
5	62	150	59	Não permitido
6	76	180	72	30
7	92	180	87	45
8	108	180	103	60

Tabela 22 – c_1 mínimo para a laje nervurada tipo 12-4

Tempo (min)	Lajota cerâmica		EPS sobre placa cimentícia		Bloco de concreto celular	NBR 15200:2012 (3)
	c_1 vertical (cm)	c_1 horizontal (cm)	c_1 vertical (cm)	c_1 horizontal (cm)	c_1 (cm)	c_1 (cm)
30	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
60	3,5	4,5	4,0	4,5	3,5	4,5
90	5,0	5,0	6,0	5,0	6,0	> 6,0
120	-	-	-	-	-	> 6,5
150	-	-	-	-	-	> 7,0
180	-	-	-	-	-	> 8,0

enchidas por lajotas cerâmicas, blocos de concreto celular e EPS sobre placa cimentícia, à temperatura elevada. Foram analisadas as condições de isolamento térmico e capacidade resistente.

A presença de qualquer dos três tipos de enchimento estudados melhora o desempenho da laje em incêndio, aumentando o tempo de resistência ao fogo e diminuindo o valor de c_1 mínimo, em relação às lajes sem enchimento com as mesmas dimensões das aqui estudadas.

Com base unicamente em análise numérica termostrutural, propõem-se valores de tempo de resistência ao fogo em função da capacidade de isolamento térmico e c_1 admitindo-se a temperatura-limite de 500 °C na armadura.

Em vista do ineditismo desta pesquisa e, principalmente, pela presença do grande espaço preenchido com ar aquecido nos furos da lajota cerâmica e no vazio provocado pela queima do EPS, os resultados relativos a isolamento térmico e à posição da armadura, aqui apresentados, devem ter comprovação experimental antes de serem empregados em projeto. Da mesma forma, a garantia de estanqueidade deve ser analisada experimentalmente, visto não ter sido alvo deste estudo.

O procedimento numérico conduziu a resultados que podem ser úteis para nortear os futuros ensaios.

8. Agradecimentos

Agradece-se à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Tuper.

9. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de ao e concreto em situação de incêndio - procedimento. Rio de Janeiro, 2013.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.
- [05] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-2-2: Eurocode 1: actions on structures - part 1.2: general actions - actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.
- [06] SILVA, V. P. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.
- [07] 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).
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro. 2005.
- [09] CADORIN, J. F. Compartment Fire Models for Structural Engineering, PhD Thesis, Faculté de Sciences Appliquées, Université de Liège. 2003.
- [10] INCROPERA. F. P.; DEWITT, D. P. Introduction to heat transfer. 901 p. Wiley. 2002.
- [11] SIPOREX. Available in <<http://www.siporex.com.br/>> Acesso em: 14/8/2012.
- [12] COSTRUPOR. Disponível em <<http://www.construpor.com.br/index.php?p=item2-1>> Acesso em: 14/8/2012.
- [13] SUPERBLOCO (Sical). Disponível em <http://www.superbloco.com.br/main/bloco_sical.php> Acesso em: 14/8/2012.
- [14] BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. Evaluation of building materials using infrared thermography. Construction and Building Materials. Volume 21-1 , p. 218–224. January 2007.
- [15] GAWIN, D. J.; KOSNY, J. WILKES, K. Thermal Conductivity of Moist Cellular Concrete — Experimental and Numerical Study. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE. 2004.
- [16] KNAUF. Disponível em <www.knauf.com.br> Acesso em: 14/8/2012.
- [17] BRASILIT. Disponível em <www.brasilit.com.br> Acesso em: 14/8/2012.
- [16] ETERNIT. Disponível em <www.eternit.com.br> Acesso em: 14/8/2012.
- [19] FIRE SAFETY DESIGN (FSD). TCD 5.0 User's manual. Lund: Fire Safety Design AB, 2007.
- [20] PIERIN; I. A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2011.