

Sobre o dimensionamento de laje mista de aço e concreto em situação de incêndio

Leila C. S. Cordeiro¹, Valdir Pignatta Silva^{2*}

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, leila.cds@gmail.com

²Professor doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, valpigss@usp.br

On the composite steel and concrete slab fire design

Resumo

Neste trabalho apresentam-se três maneiras de se dimensionar uma laje mista de aço e concreto. Para isso, optou-se por aplicar os métodos disponíveis a um caso real. Pelo mezanino da Estação de metrô Butantã, São Paulo, circulam mais de 20 000 pessoas por dia. Segundo a IT8 do CBPMESP, esse mezanino é isento de verificação das estruturas em incêndio. Mesmo assim, a Companhia do Metropolitano de São Paulo especificou um tempo requerido de resistência ao fogo de 90 min para a estrutura do mezanino que é composto de vigas de aço e laje mista. Todas as vigas foram revestidas para resistir 90 min de incêndio-padrão conforme resultados de ensaios em função do TRRF e do fator de massividade. Neste trabalho será verificada a resistência ao fogo da laje mista, conforme ABNT NBR 14323:2013, pelo método simplificado de Bailey (2000, 2000a) que inclui o efeito de membrana e por modelagem empregando o programa de computador Vulcan. O objetivo deste trabalho é comparar os resultados e verificar se há necessidade de alguma intervenção na construção, ou se poderiam ser elaborados projetos mais econômicos.

Palavras-chave: laje mista, incêndio, membrana, Bailey, Vulcan.

Abstract

In this paper three methods to design a composite steel-concrete slab are presented. The methods are applied to a real case. On the mezzanine of the subway station Butantã, Sao Paulo, are more than 20,000 people a day. According to the Fire Department of Sao Paulo State, Brazil, this mezzanine is exempt from the examination of the structures in fire. Even so, the Company of the Sao Paulo Metropolitan specified a time required for fire resistance of 90 min for the structure of the mezzanine which is composed of steel beams and composite steel-concrete slab. All the steel beams are protected to 90 min of ISO-fire according tests results in function of the section factor and fire resistance. In this paper, the fire resistance of the composite slab is verified according to procedures provided by the Brazilian standard ABNT NBR 14323: 2012, to the simplified method proposed by Bailey (2000, 2000a) including the membrane effect and modeling it with the software Vulcan. The objective is to compare the results from the three methods

Keywords: composite slab, fire, membrane, Bailey, Vulcan.

Lista de símbolos:

a : relação L/ℓ

A_i : área da seção transversal do perfil de aço

A_s : área das barras da armadura

b, k : parâmetros que definem a magnitude da força de membrana

$b_{ef}, b_1, b_2, b_b, t_c, h_f, h_{ef}$: dimensões da seção transversal da laje

c_0 a c_5 : coeficientes utilizados na determinação da temperatura na armadura

d_0 a d_4 : coeficientes utilizados na determinação da temperatura-limite

d' : distância do plano médio da malha à face superior da laje

E : módulo de elasticidade do aço

$e_{1,m}, e_{2,m}, e_{1,b}, e_{2,b}$: fatores de majoração devido à ação de membrana nos Elementos 1 e 2

e : fator de majoração global devido à ação de membrana

f : flecha da laje do painel de piso

f_y : resistência ao escoamento das barras da armadura

$g_{0,1}, g_{02}$: parâmetros que determinam a profundidade do bloco de tensão de compressão quando nenhuma força de membrana está presente

h_u : altura da laje comprimida em situação de incêndio

K : relação entre as taxas de armadura empregadas no menor vão e no maior vão

L, ℓ : maior e menor vão da laje

$M_{fi,Rd}$: momento fletor resistente de cálculo na seção de largura unitária da laje

$M_{fi,Rd,viga}$: momento fletor resistente de cálculo da viga mista interna com menor resistência em situação de incêndio

$M_{fi,Rd}^+, M_{fi,Rd}^-$: momentos fletores resistentes positivo e negativo

N_s^- : força de tração proporcionada pela armadura negativa

n : parâmetro que define a charneira plástica

n_{ub} : número de vigas secundárias não revestidas consideradas no painel estudado

$q_{fi,Rd}$: força uniformemente distribuída resistente de cálculo a uma temperatura específica de um painel

$q_{fi,Sd}$: força uniformemente distribuída solicitante de cálculo de um painel

$q_{fi,Rd,Laje}$: força uniformemente distribuída de cálculo no painel resistida pela laje mista

$q_{fi,Rd,viga}$: força uniformemente distribuída de cálculo no painel resistida pelas vigas mistas internas

u_{f1}, u_{f2}, u_{f3} : menores distâncias do eixo da barra da armadura em relação à fôrma de aço

y_f^+ : altura do bloco de concreto comprimido

z_0 : fator que indica a posição da armadura

A/L : relação entre a área da seção transversal de concreto dentro da nervura e a superfície da nervura

α : ângulo entre a alma da forma e o eixo horizontal em graus

α_c : coeficiente de dilatação térmica do concreto, igual a 10^{-5} C^{-1}

γ_B, γ_Q : fatores de ponderação

δ : parâmetro que define a largura do painel sob influência da viga mista

μ : coeficiente de ortotropia

θ_{c1}, θ_{c2} : temperaturas nas faces superior e inferior da laje

$\theta_s, \theta_i, \theta_{lim}$: temperaturas na armadura inferior, fôrma de aço e limite

ϕ : fator de vista da mesa superior da fôrma

1 Introdução

O método tradicional para o dimensionamento de uma laje mista com fôrma de aço incorporada para a situação de incêndio prevê a aplicação de revestimento contra fogo nas vigas de aço e o dimensionamento da laje mista conforme ABNT NBR 14323:2013. Isso exige grande consumo de material de revestimento e de armaduras de aço. Bailey (2000, 2000a) propôs um método simplificado para definir a capacidade de carregamento considerando o efeito de membrana em lajes de concreto sob grandes deslocamentos. Esse método considera que procedimentos correntes de dimensionamento desprezam o efeito de membrana no desempenho das lajes mistas em situação de incêndio, subestimando sua capacidade resistente. Nos métodos tradicionais, cada elemento é analisado isoladamente. Já no método proposto por Bailey ocorre a interação entre todos os elementos, com melhoria significativa do desempenho graças à habilidade das lajes mistas armadas conectadas a vigas de aço secundárias afetadas pelo incêndio, não revestidas contra fogo, transferirem o carregamento - a partir do efeito de membrana - para as partes não danificadas da estrutura de aço, que recebeu revestimento. Dessa forma, é possível reduzir a quantidade de material de revestimento nos pisos mistos, criando painéis nos quais as vigas do contorno, geralmente ligadas aos pilares, são revestidas, mas as vigas internas ao painel ficam sem revestimento. Neste texto, o termo “painel” será usado para designar certa divisão da laje. Um painel consiste em uma laje que incorpora vigas não revestidas e vigas do contorno revestidas ou dimensionadas para suportar o carregamento durante o incêndio, tal como apresentado na Figura 1. A vantagem mais significativa do método é a flexibilidade e a liberdade proporcionadas ao estruturista, com a opção de substituição do revestimento contra fogo pelo aumento da armadura, aumento da altura da laje ou aumento das seções dos perfis de aço. Com o intuito de comparar resultados, neste trabalho será realizado o dimensionamento como recomendado pela ABNT NBR 14323:2013 para uma laje mista com vigas revestidas para 90 min de incêndio-padrão, empregando o método de Bailey retirando-se o revestimento de algumas vigas secundárias e substituindo-se as armaduras e por meio de modelagem utilizando o programa de computador Vulcan versão 10.12.0. Para as duas últimas verificações se admitirá que algumas vigas secundárias não recebam revestimento. Para esse estudo,

optou-se por usar uma laje mista existente. Será analisado um piso misto de um mezanino de 21,46 m por 6,20 m, com vigas transversais a cada 2,68 m. A Figura 2 apresenta respectivamente a seção do mezanino e da laje mista, conforme projeto. As Figuras 3 e 4 apresentam fotos do mezanino já executado.

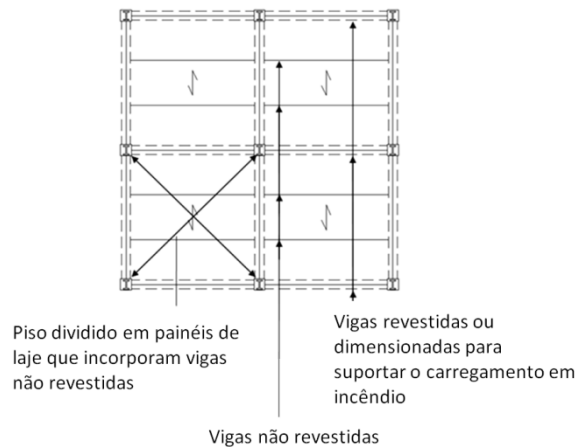


Figura 1 - Modelo de painel

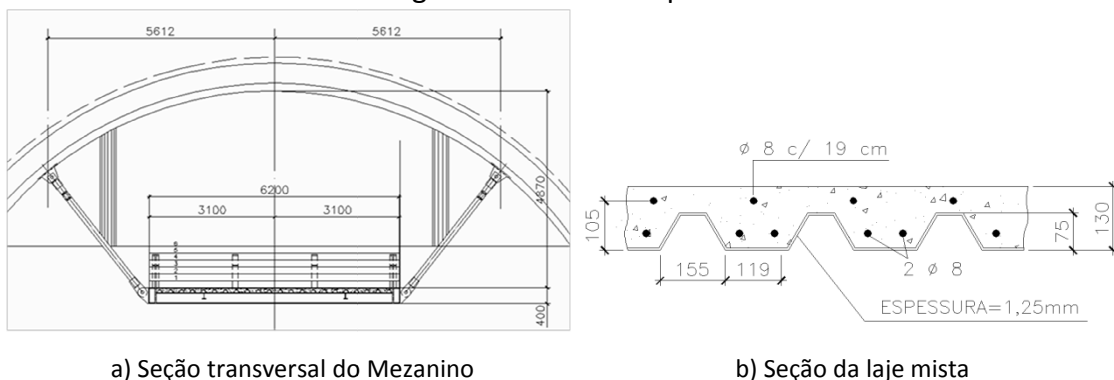


Figura 2 - Mezanino

A laje tem altura total de 130 mm. Possui fôrma trapezoidal de aço incorporada "Steel Deck" MF-75 (nervura de 75 mm de altura, espessura de 1,25 mm, aço ZAR-280 - $f_y = 28$ MPa). O catálogo da Metform indica que laje de 130 mm é adequada para lajes de forro. No entanto, um valor mínimo de altura de laje não é encontrado nem em catálogos de outros fabricantes, nem na norma brasileira. Para não haver dúvidas, a estrutura foi verificada em situação de incêndio e, neste texto, será aceita como piso. Foi executada com concreto de densidade normal e resistência característica à compressão de 35 MPa. Os demais materiais empregados na estrutura foram os seguintes: perfis, chapas e barras: aço ASTM – A36; tubos: ASTM – A120; armaduras superiores (negativas): $\phi 8$ c/ 19, aço CA50; armaduras inferiores (positivas): 2 $\Phi 8$ (100 mm²) por nervura de aço CA50. A soma das armaduras positivas e negativas (264,42 +

364,96 = 629,38 mm²/m) resulta 629,4 mm²/m, todas dispostas paralelamente às nervuras. A ABNT NBR 14323:2013 recomenda colocar armadura de retração ortogonal às nervuras, porém, não afetará a formulação empregada para o dimensionamento. Para o método de Bailey e programa Vulcan serão previstas alternativas de disposição de armaduras, conforme os métodos exigem.



Figura 3 - Mezanino em execução

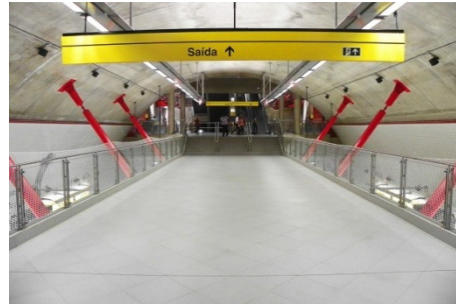


Figura 4 - Mezanino executado

A Figura 5 apresenta o modelo simplificado da laje empregado neste artigo. Para a análise via Vulcan foram incorporadas ao modelo as vigas das escadas que contribuirão para o equilíbrio do mezanino.

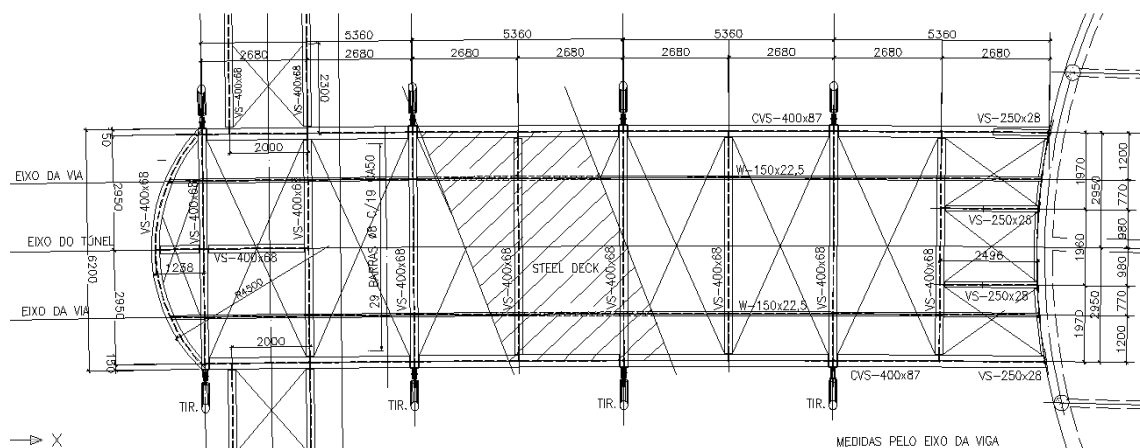


Figura 5 - Mezanino - Piso misto de 21,46 m por 6,20 m

2 Verificação conforme ABNT NBR 14323:2013

A seguir é apresentada a verificação da laje mista de acordo com a ABNT NBR 14323:2013 utilizando armaduras Φ 8 c/ 19 (face superior da laje) e 2 Φ 8 por nervura, conforme pode ser observado na Figura 2b.

2.1 Isolamento e estanqueidade

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, uma laje mista tem a estanqueidade garantida pela presença da fôrma de aço. Para que seja atendido o critério de isolamento térmico, a

espessura efetiva da laje, h_{ef} , deve ser maior ou igual ao valor fornecido na norma brasileira em função do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Para TRRF = 90 min, $h_{ef} \geq 100$ mm. Na equação a seguir é determinado o valor de h_{ef} , sendo que os parâmetros geométricos usados são definidos nas Figuras 2b e 6.

$$h_{ef} = t_c + \frac{h_F}{2} \left(\frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2} \right) = 55 + \frac{75}{2} \frac{(155 + 119)}{(155 + 115)} = 93 \text{ mm}$$

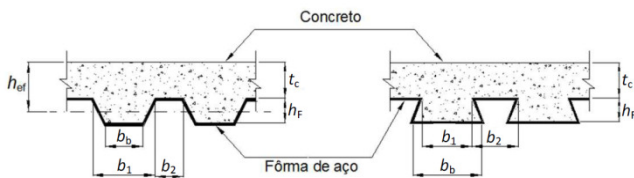


Figura 6 - Dimensões da seção transversal da laje (ABNT 14323:2013)

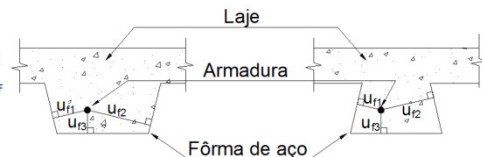


Figura 7 - Posição geométrica da armadura (ABNT NBR 14323:2013)

No entanto, deve ser considerado que há um revestimento sobre a laje com espessura de 70 mm. Dessa forma, o critério de isolamento térmico é atendido.

2.2 Condição de segurança

Para a segurança em situação de incêndio ser verificada, deve-se ter: $q_{fi,Sd} \leq q_{fi,Rd}$. Para laje com armaduras negativas nos dois apoios e armadura positiva, tem-se a condição necessária indicada na Equação 1, válida para o último vão da laje contínua.

$$q_{fi,Sd} \frac{L^2}{8} \leq q_{fi,Rd} \frac{L^2}{8} = M_{fi,Rd}^+ + 0,45M_{fi,Rd}^- \text{ ou } q_{fi,Sd} \leq q_{fi,Rd} = \frac{(8M_{fi,Rd}^+ + 3,6M_{fi,Rd}^-)}{L^2} \quad (1)$$

O valor característico do carregamento é constituído pelos pesos próprios da laje mista, das vigas de aço e do revestimento, iguais a $2,33 \text{ kN/m}^2$, $1,47 \text{ kN/m}^2$ e $2,00 \text{ kN/m}^2$, e sobrecarga de $5,00 \text{ kN/m}^2$, considerada pelo Metrô de São Paulo para áreas de acesso ao público. Para determinar o valor de cálculo em incêndio, emprega-se a combinação excepcional de ações com os fatores de ponderação γ_g igual a 1,10 para o peso próprio de estruturas metálicas, 1,15 para estruturas pré-moldadas e moldadas no local e elementos construtivos industrializados, 1,20 de elementos construtivos industrializados com adições "in loco", e γ_q igual a 0,28, fator de ponderação das ações decorrentes do uso (elevadas concentrações de pessoas). Para obtenção do carregamento uniformemente distribuído na laje tem-se:

$$q_{fi,Sd} = [1,10 (1,47) + 1,15 (2,33) + 1,20 (2,00) + 0,28 (5,00)] = 8,10 \text{ kN/m}^2$$

2.3 Determinação do momento positivo resistente

A força proporcionada pela armadura positiva é igual ao produto de sua área pela resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_s dada pela Equação 2.

$$\theta_s = c_0 + c_1 \frac{u_{f3}}{h_F} + c_2 z + c_3 \frac{A}{L_r} + c_4 \alpha + \frac{c_5}{b_2} \quad (2)$$

Na Equação 2, $\frac{A}{L_r} = \frac{h_F \left(\frac{b_b + b_1}{2} \right)}{b_1 + 2 \sqrt{h_F^2 + \left(\frac{b_b - b_1}{2} \right)^2}}$, $\alpha = \arctan \left(\frac{2h_F}{b_b - b_1} \right)$ e $\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_{f1}}} + \frac{1}{\sqrt{u_{f2}}} + \frac{1}{\sqrt{u_{f3}}}$

Os fatores c_i são apresentados na Tabela 1 (ABNT NBR 14323:2013). As características geométricas da armadura e laje mista são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Coeficientes c_0 a c_5 – Determinação da temperatura na armadura

$c_0(^{\circ}\text{C})$	$c_1(^{\circ}\text{C})$	$c_2(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^{0,5})$	$c_3(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^{-1})$	$c_4(^{\circ}\text{C}/^{\circ})$	$c_5(^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm})$
1342	-256	-235	-5,30	1,39	-1267

Tabela 2 – Características geométricas da armadura e laje mista

u_{f1}	45 mm	b_b	155 mm	t_c	55 mm
u_{f2}	84 mm	b_1	119 mm	h_F	75 mm
u_{f3}	30 mm	b_2	115 mm		

A partir das equações e tabelas fornecidas anteriormente, determinam-se:

$$\frac{A}{L_r} = 37,60 \text{ mm} \quad \alpha = 76,50^{\circ} \quad \frac{1}{z} = 0,439 \quad \theta_s = 600^{\circ}\text{C}$$

A partir da Tabela 2 da ABNT NBR 15200:2012 tem-se, para $\theta_s = 600^{\circ}\text{C}$, $k_{s,\theta} = 0,47$.

A determinação de $M_{fi,Rd}^+$ é feita de forma interativa. A favor da segurança, a fôrma de aço não será considerada no dimensionamento, já que atingirá elevadas temperaturas e o fator de redução da resistência ao escoamento será próximo de zero. Na primeira interação, considera-se a seção de concreto à temperatura ambiente (Figura 8).

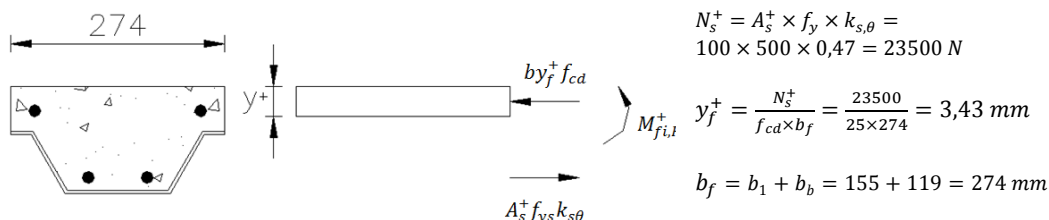


Figura 8 - Diagrama de forças para o momento positivo resistente

$$M_{fi,Rd}^+ = N_s^+ \left(d - \frac{y_f^+}{2} \right) = f_y \times A_s^+ \times k_{s\theta} \left(d - \frac{y_f^+}{2} \right) = \left[500 \times 100 \times 0,47 \left(96,57 - \frac{3,43}{2} \right) \right] / 0,274$$

$$= 8.131.088 \text{ Nmm/m} = 8,13 \text{ kNm/m (concreto em temperatura ambiente)}$$

A seguir são apresentadas as interações realizadas para determinação de $M_{fi,Rd}^+$ considerando a variação da temperatura na seção de concreto, com auxílio da Tabela A.1 da ABNT NBR 14323:2012 e Tabela 1 da ABNT NBR 15200:2012.

1ª interação: $y_f^+ = 3,43 \text{ mm}$

Segundo a Tabela A.1 (fatia 14), a temperatura para TRRF = 90 min vale 160 °C. Por interpolação pela Tabela 1 da ABNT NBR 15200:2012 determina-se $k_{c,\theta} = 0,97$.

2ª interação: $y_f^+ = \frac{f_y \times A_s^+ \times k_{s\theta}}{f_{cd} \times b_f \times k_{c,\theta}} = \frac{500 \times 100 \times 0,47}{25 \times 274 \times 0,97} = 3,53 \text{ mm}$

Recalculando o momento positivo $M_{fi,Rd}^+$, considerando variação de temperatura na seção de concreto, tem-se:

$$M_{fi,Rd}^+ = f_y \times A_s^+ \times k_{s\theta} \left(d - \frac{y_f^+}{2} \right) = \left[500 \times 100 \times 0,47 \left(96,47 - \frac{3,53}{2} \right) \right] 0,274 = 8.122.511 \text{ N mm} =$$

8,12 kN m (considerando variação de temperatura na seção de concreto)

É possível constatar que a consideração da temperatura na seção de concreto não afetou o valor de $M_{fi,Rd}^+$.

2.4 Determinação do momento negativo resistente

A força de tração proporcionada pela armadura negativa é determinada à temperatura ambiente como $N_s^- = A_s^- f_y$. O momento negativo resistente de cálculo é obtido utilizando-se uma seção transversal reduzida, desprezando-se a parte da seção com temperatura superior à temperatura-limite, θ_{lim} (Equação 3), com d_0 , d_1 , d_2 , d_3 e d_4 dados na Tabela 3. A capacidade resistente da parte restante pode ser tomada a 20 °C.

$$\theta_{lim} = d_0 + d_1 N_s^- + d_2 \frac{A}{L_r} + d_3 \Phi + d_4 \frac{1}{b_2} \quad (3)$$

Tabela 3 - Coeficientes d_0 a d_4 – Determinação da temperatura-limite

d_0 (°C)	d_1 (°C.N)	d_2 (°C.mm)	d_3 (°C)	d_4 (°C.mm)
1055	-0,00022	-9,91	-154	-1990

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

A isoterma para temperatura-limite pode ser determinada com base em quatro pontos característicos (Figura 9), cujas coordenadas são dadas pelas Equações 4. Na Tabela 2 são fornecidas as informações geométricas necessárias à verificação.

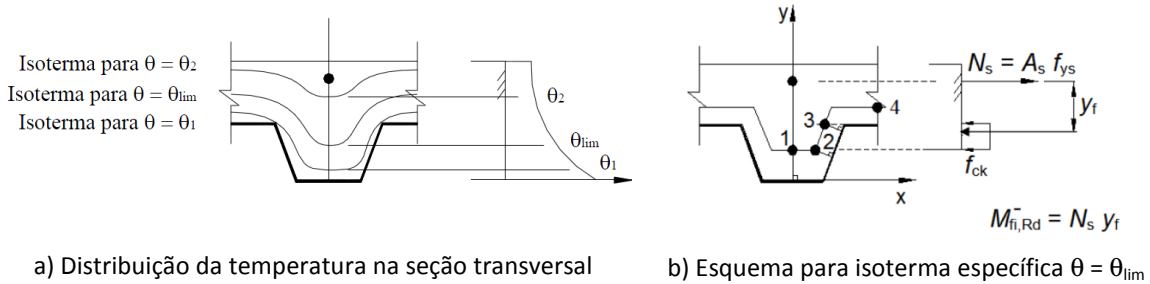


Figura 9 -Seção transversal da laje (ABNT NBR 14323:2013)

$$x_1 = 0; \quad y_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{z_0} - \frac{4}{\sqrt{b_b + b_2}}\right)^2}; \quad x_2 = \frac{b_1}{2} + y_1 \left(\frac{\cos\alpha - 1}{\sin\alpha}\right); \quad y_2 = y_1; \quad x_3 = \frac{b_b}{2} - \frac{b}{\sin\alpha}; \quad y_3 = h_F \quad x_4 = \frac{b_b}{2} + \frac{b_2}{2}; \quad y_4 = h_F + b; \quad b = \frac{b_b}{2} \sin\alpha \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 - 4a + c}}{a}\right); \quad a = b_b \sin\alpha \left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{\sqrt{h_F}}\right)^2 \quad (4)$$

$$c = -8(1 + \sqrt{1 + a}) \text{ para } a \geq 8 \quad c = 8(1 + \sqrt{1 + a}) \text{ para } a < 8$$

O valor de z_0 deve ser determinado como "z" da Equação 2, substituindo-se θ_s por θ_{lim} e $\frac{u_{f3}}{h_2} = 0,75$.

Pela equação 3, a temperatura da isoterma-limite vale: $\theta_{lim} = 564,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Para $\alpha = 76,50 \text{ } ^\circ\text{C}$ e das Equações 4 tem-se:

$$a = 38,7 \text{ mm} \quad b = 5,6 \text{ mm} \quad c = -58,4 \text{ mm} \quad x_1=0; \quad y_1 = 6,97 \text{ mm}; \quad x_2 = 54 \text{ mm}; \quad y_2 = 6,97 \text{ mm}; \quad x_3 = 71,74 \text{ mm}; \quad y_3 = 75 \text{ mm}; \quad x_4 = 135 \text{ mm}; \quad y_4 = 80,6 \text{ mm}$$

A força de tração na armadura negativa, lembrando-se que $\phi 8 \text{ c}/19$ para $b_f = 1000 \text{ mm}$, vale: $N_s^- = A_s^- f_y = 264 \times 500 = 132.000 \text{ N/m}$

Conhecida a isoterma-limite, por tentativas, determina-se y_f (Figura 9b) com o equilíbrio entre forças N_s^- e de compressão no concreto (inferior). $y_f = 31,12 \text{ mm}$.

$$\text{Portanto: } M_{fi,Rd}^- = N_s^- y_f = 132.000 \times 31,12 = 4.107.840 \text{ N mm} = 4,11 \text{ kN m}$$

2.4 Verificação da segurança

Com $L = 2,68 \text{ m}$, determina-se o valor da força resistente $q_{fi,Rd}$, considerando ainda uma faixa de $0,274 \text{ m}$ da laje, em situação de incêndio, que deve ser maior do que o $q_{fi,Sd} = 8,10 \text{ kN/m}^2$.

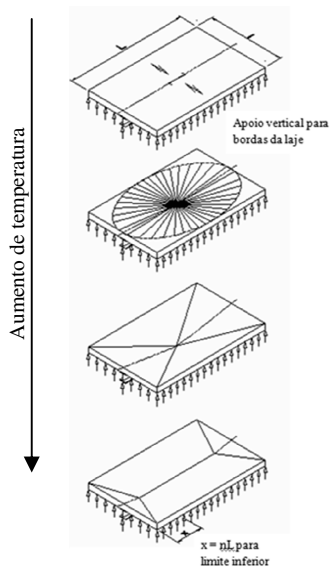
$$q_{fi,Sd} \leq q_{fi,Rd} = \frac{(8 \times 8,12 + 3,6 \times 4,11)}{2,68^2} = 11,10 \frac{kN}{m^2} \rightarrow 8,10 \frac{kN}{m^2} < 11,10 \frac{kN}{m^2}$$

Dessa forma, conclui-se que a segurança da laje do mezanino com armadura positiva $2\phi 8$ /nervura e negativa $\phi 8$ c/ 19 com vigas primárias e secundárias revestidas é verificada para a situação de incêndio com base no método simplificado recomendado pela ABNT NBR 14323:2013. Em vista da reserva de segurança encontrada para a situação de incêndio, é importante ressaltar que o projeto original está muito favorável à segurança para a temperatura ambiente.

3 Verificação pelo método de Bailey

3.1 Efeito de membrana

Bailey (2000, 2000a) mostrou que lajes mistas armadas, retangulares ou quadradas, verticalmente suportadas em seus vértices e submetidas a deslocamentos verticais consideráveis, têm a habilidade de desenvolver o efeito de membrana no interior da laje e assim suportar carregamentos adicionais aos calculados pelos procedimentos clássicos de dimensionamento de laje sob flexão. Para tanto, todo o piso deve ser dividido em painéis de lajes, com cada painel incorporando certo número de vigas sem revestimento. O contorno de cada painel tem de ser suportado verticalmente, durante o incêndio, usando vigas principais revestidas ou vigas que tenham sido projetadas para suportar o carregamento aplicado em situação de incêndio. Na Figura 10, representa-se o comportamento do painel de laje ao ser aquecido. O modo final do comportamento, conforme a capacidade da viga mista tende a zero, é devido à laje simplesmente apoiada em dois sentidos, abrangendo todo o carregamento aplicado. Em situação de incêndio, as vigas metálicas de apoio, que controlam o padrão das charneiras plásticas, têm sua capacidade resistente continuamente reduzida. Isso resultará na mudança do comportamento, com incremento da temperatura e mudanças contínuas no comportamento e no efeito de membrana. Para a capacidade resistente do sistema devido à laje mista, tem-se a formação de um anel de compressão nas bordas da viga devido ao momento negativo, enquanto na região central ocorre tração (Figura 11).



Laje mista unidirecional (direção da viga)

Charneiras plásticas se formam no centro da laje (radiais e a viga mista central apresenta grande flecha

Com o aumento da temperatura da viga mista forma-se uma rótula plástica tendo como consequência a formação de charneiras diagonais

Com a crescente perda de resistência da viga mista (tendendo a zero) as charneiras plásticas tendem a seguir o mecanismo de limite inferior, como se a viga não existisse

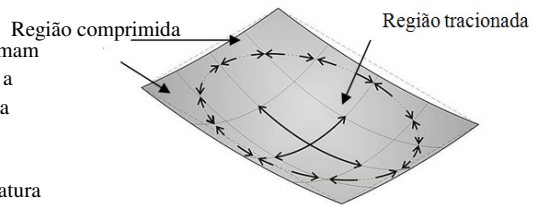


Figura 11 - Membrana

Figura 10 - Comportamento da laje mista com a temperatura (Fakury et al., 2004)

3.2 Método simplificado proposto por Bailey

O método simplificado proposto por Bailey (2000, 2000a) leva em consideração a interação entre a laje de concreto e as vigas de aço principais produzindo uma aproximação holística que reconhece o papel desempenhado pela laje mista armada em situação de incêndio. O carregamento suportado devido ao comportamento à flexão da laje mista é calculado com base no limite inferior da charneira plástica, assumindo que o efeito de membrana majora o desempenho da mesma. A capacidade de carga das vigas mistas e laje devem ser consideradas juntas. Assumindo um mecanismo de limite inferior associado ao efeito de membrana, sempre serão obtidas estimativas conservadoras para a capacidade resistente para lajes mistas. Para um modelo simplificado como o que será estudado, as capacidades resistentes da laje ($q_{fi,Rd,Laje}$) e da viga tem por base o mecanismo do limite inferior, por equilíbrio, dado pela Equação (5). Segundo Wood, apud Bailey (2000), a capacidade resistente unicamente da laje é dada pela Equação 5a. A partir do momento resistente da viga mista ($M_{fi,Rd,viga}$) é possível determinar a capacidade resistente por unidade de área conferida pela viga à laje conforme Equação 5b. O momento resistente da laje, $M_{fi,Rd}$, empregado na equação 5a, pode ser determinado por equilíbrio das forças longitudinais, obtendo-se a equação 5c. O momento resistente da viga é apresentado na equação 5d (Vassart, 2012a).

$$q_{fi,Rd,Laje} = 6 \frac{M_{fi,Rd,laje}}{n^2 a^2 \ell^2} \quad (5a) \quad q_{fi,Rd,viga} = \frac{8 M_{fi,Rd,viga} (1+n_{ub})}{\ell L} \quad (5b) \quad h_u = \frac{\sum A_i f_y k_{y,\theta}}{b_{ef} f_{ck} k_{c,\theta}} \quad (5e)$$

$$M_{fi,Rd} = A_s f_{y,\theta} \times d \times \frac{3+g_{0,2}}{4} \quad (5c) \quad M_{fi,Rd,viga} = \frac{A_i f_y k_{y,\theta}}{\gamma_{fi,a}} \left(\frac{H}{2} + h - \frac{h_u}{2} \right) \quad (5d)$$

Bailey (2000, 2000a) desenvolveu um método que estima a capacidade resistente de lajes armadas, para uma dada flecha, com base nas tensões no plano da laje. O procedimento proposto por Bailey (2000, 2000a) consiste nas seguintes etapas:

- determinar o valor do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF);
- calcular o carregamento total no Estado-Limite Último de Incêndio (ELI);
- dividir o pavimento (piso) em diversos painéis de lajes retangulares ou quadradas (Figura 1), que incorporem vigas mistas secundárias não revestidas e vigas principais revestidas ou dimensionadas para suportar o carregamento durante um incêndio;
- identificar a viga com maior taxa de carregamento solicitante;
- calcular a capacidade resistente no ELI da laje, considerando apenas a tela eletrossoldada e componentes do concreto utilizando a teoria das charneiras plásticas. - majorar a capacidade resistente da laje devido ao efeito de membrana, com base no deslocamento vertical admissível;
- calcular a capacidade resistente do painel incluindo o efeito de membrana da laje mista e a capacidade de vigas não revestidas. Se a capacidade resistente da laje e de vigas é maior que a solicitação, as vigas podem permanecer sem revestimento.

A formulação para a determinação do valor do fator de majoração da carga suportada pelo painel de laje devido ao efeito membrana é apresentada em Bailey (2000, 2000a) e transcrita em Fakury et al. (2004a). Vassart e Zhao (2012, 2012a) atualizaram essa formulação e é fornecida na Equação 6.

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} \quad (6)$$

onde:

$$e_{1,m} = \frac{4b}{3+g_{0,1}} \left(\frac{f}{d'} \right) \left((1 - 2n) + \frac{n(2+3k-k^3)}{3(1+k)^2} - \frac{nk^3}{3(1+k)^2} \right); \quad e_{2,m} = \frac{4bK}{3+g_{0,2}} \left(\frac{f}{d'} \right) \left(\frac{2+3k-k^3}{6(1+k)^2} \right)$$

$$e_{1,b} = 2n \left[1 + \frac{\alpha_1 b}{2} (k - 1) - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) + (1 - 2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2) \right]$$

$$e_{2,b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1) \quad e_1 = e_{1b} + e_{1m} \quad e_2 = e_{2b} + e_{2m}$$

$$\text{sendo: } \alpha_1 = \frac{2g_{0,1}}{3+g_{0,1}} \quad \beta_1 = \frac{1-g_{0,1}}{3+g_{0,1}} (\text{menor v\~{a}o}) \quad \alpha_2 = \frac{2g_{0,2}}{3+g_{0,2}} \quad \beta_2 = \frac{1-g_{0,2}}{3+g_{0,2}} (\text{maior v\~{a}o})$$

$$\mu = K \frac{3+g_{0,1}}{3+g_{0,2}} \quad g_{0,1} = 1 - \frac{2KA_s f_{y,\theta}}{0,85 \times f_{ck,\theta} \times d'} \quad g_{0,2} = 1 - \frac{2A_s f_{y,\theta}}{0,85 \times f_{ck,\theta} \times d'}$$

$$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2+1} + 1 \quad b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}; \frac{1}{kKA_s f_{y,\theta}} (0,85 \times f_{ck,\theta} \times 0,45d' - A_s \times f_{y,\theta}) \frac{K+1}{2} \right]$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} (\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1)$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+k} \right) \right) \left((nL)^2 + \frac{\ell^2}{4} \right) \right]$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{k^2}{1+k} \right) \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{k}{1+k} \right) \left((nL)^2 + \frac{\ell^2}{4} \right) \right] \quad C = \frac{\ell^2}{16n} (k - 1) \quad D = \left(\frac{L}{2} - nL \right) \left(\frac{L}{4} - \frac{n\ell}{2} \right)$$

A flecha f da laje do painel pode ser determinada por meio da Equação 7, onde se apresenta um limite superior que não pode ser superado ao se determinar a flecha.

$$f = \min \left\{ \frac{\alpha_c (\theta_{c2} - \theta_{c1}) \ell^2}{19,2h_{ef}} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0,5f_y}{E_s} \right) \frac{3L^2}{8}}; \frac{\ell}{30} \right]; \frac{\ell+L}{30} \right\} \quad (7)$$

3.3 Aplicação do método de Bailey

Não é possível a verificação do mezanino original empregando diretamente o método de Bailey por duas razões: 1) ele não apresenta armadura em ambas as direções, um pré-requisito para desenvolvimento da ação de membrana; 2) todas as vigas secundárias foram revestidas (uma ou mais vigas secundárias deveriam estar sem revestimento). Com isso em mente, partiu-se para a verificação de um mezanino com as mesmas dimensões, porém com armadura modificada, a partir do método de Bailey considerando uma tela eletrossoldada Gerdau (2012) colocada a 30 mm da face superior da laje.

3.3.1 Mezanino com tela eletrossoldada

O mezanino com a tela eletrossoldada Q 196 (Tabela 5) será verificado para a situação de incêndio. As dimensões do painel variam em função do número de vigas secundárias não revestidas. O primeiro caso estudado considera que uma viga secundária não será revestida, resultando em um painel de 5,36 m x 6,20 m (Figura 12b); o segundo, com duas vigas secundárias não revestidas resulta em um painel de 6,20 m x 8,04 m (Figura

12a). As vigas principais devem ser revestidas de maneira que os esforços solicitantes não excedam a capacidade resistente em situação de incêndio (Vassart, 2012, 2012a).

Tabela 5 - Telas de Aço Pré-Fabricadas Produzidas no Brasil – Gerdau (2012)

Designação	Abertura (mm x mm)	Ø (mm)	Seção (mm ² /m)	Massa (kg/m ²)
Q 196	100 x 100	5,0	196	3,11

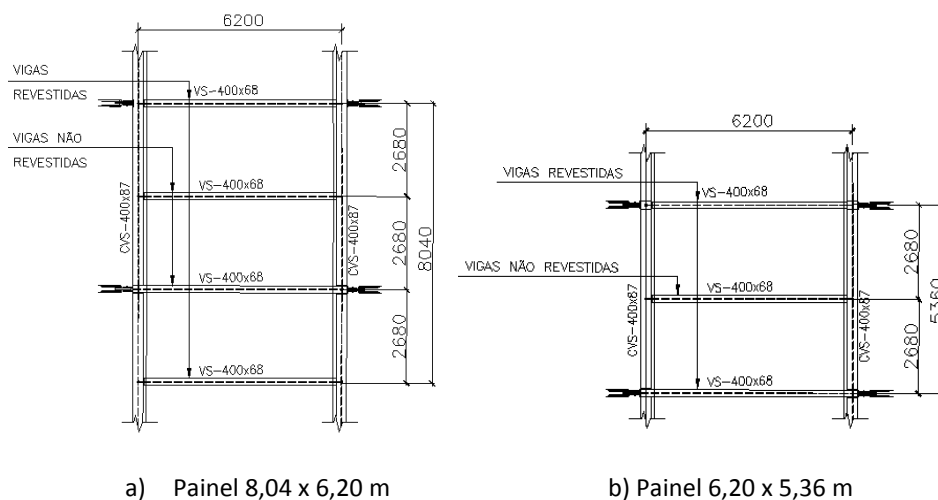


Figura 12 - Painéis considerados

A seguir, adotando-se a formulação previamente apresentada, será detalhada a verificação para o painel 5,36 m x 6,20 m. Conforme já calculada na seção 2.4, $q_{fi,sd}$ vale 8,1 kN/m². Uma viga de aço não revestida, em 90 min, atingirá uma temperatura muito próxima ao do incêndio-padrão, ou seja, 1003 °C, o que corresponde ao fator de redução da resistência ao escoamento do aço, $k_{y,\theta}$ igual a 0,04 conforme ABNT NBR 14323:2013. Para o concreto da laje mista de altura efetiva igual a 93 mm, chega-se à temperatura média de 160 °C, determinada conforme a Tabela A.1 da ABNT NBR 14323:2013, que corresponde a um fator de redução da resistência característica à compressão, $k_{c,\theta}$ igual a 0,97 de acordo com a ABNT NBR 15200:2012. Empregando-se o procedimento clássico de determinação de momento resistente de vigas mistas e considerando-se coeficientes de redução dos materiais obtidos, verifica-se que a linha neutra plástica (LNP) passa pela laje de concreto dentro da nervura. Os valores de cálculo das forças uniformemente distribuídas no painel resistidas pelas laje e vigas mistas internas são determinadas, respectivamente, pela aplicação das equações 5a a 5d, obtendo-se:

$$M_{fi,Rd,laje} = 3288 \text{ Nmm/mm} \rightarrow q_{fi,Rd,Laje} = 2,391 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{fi,Rd,viga} = 27,97 \text{ Nmm/mm} \rightarrow q_{fi,Rd,viga} = 3,77 \frac{kN}{m^2}$$

Utilizando a tabela A.1 da ABNT NBR 14323:2012 para o TRRF de 90 min, a temperatura na armadura, cujo eixo do conjunto se situa na camada de altura igual a 105 mm, é de 160 °C, temperatura que não leva à redução da resistência ao escoamento do aço, de acordo com ABNT NBR 14323:2012. A altura efetiva da laje já foi determinada ($h_{ef} = 93$ mm). Para determinação do deslocamento vertical do painel utiliza-se a Equação 7. O campo térmico da laje em estudo foi extraído a partir da Tabela A.1 da ABNT NBR 14323:2013. Para TRRF de 90 min, devido à elevada temperatura na fatia 1 ($k_{c,\theta} \leq 0,25$) a contribuição da fatia será muito pequena, praticamente não interferindo no resultado final sendo, portanto, desconsiderada. O uso das tabelas para a determinação das temperaturas e fatores de redução da resistência dos elementos do painel de laje são empregados sem prejuízo aos resultados previstos pelos procedimentos apresentados no método de Bailey (Vassart, 2012, 2012a). Assim, com $\theta_{c2} - \theta_{c1} = 578^\circ\text{C}$, $\alpha_c = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $f_y = 600 \text{ N/mm}^2$, $L = 620 \text{ cm}$, $\ell = 536 \text{ cm}$, obtém-se da equação 7 : $f = 255 \text{ mm}$.

A partir das equações apresentadas no item 3.2 deste trabalho obtêm-se:

$$a = 1,16 \quad n = 0,46 \quad k = 1,08 \quad b = 1,183$$

$$A = 973.356 \text{ mm}^2 \quad B = 1.757.705 \text{ mm}^2 \quad C = 330.417 \text{ mm}^2 \quad D = 26.201 \text{ mm}^2$$

$$g_{0,1} = 0,73 \quad g_{0,2} = 0,73 \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0,391 \quad \beta_1 = \beta_2 = 0,073 \quad \mu = 1,0, \quad \text{que}$$

$$\text{resulta: } e_{1b} = 0,94 \quad e_{1m} = 2,32 \quad e_1 = 0,94 + 2,32 = 3,26$$

$$e_{2,b} = 0,98 \quad e_{2,m} = 1,65 \quad e_2 = 0,98 + 1,65 = 2,63 \quad e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} = 3,09$$

$$q_{fi,Rd} = e \times q_{fi,Rd,laje} + q_{fi,Rd,viga} = 3,09 \times 2,391 + 3,77 = 11,16 \frac{kN}{m^2}$$

O carregamento solicitante em situação de incêndio vale 8,10 kN/m², enquanto a capacidade resistente do sistema – considerando o efeito de membrana – vale 11,16 kN/m², atendendo à verificação para TRRF de 90 min para o painel de 5,36 m x 6,20 m. Os momentos fletores de plastificação em situação de incêndio das vigas periféricas secundárias (CVS 400 x 87) e das vigas periféricas principais (VS 400 x 68) do painel 6,20 x 5,36 são calculados conforme equações apresentadas no item 6.2.1 de Cordeiro (2014).

$$M_{pd,fi,CVS400x87} = \frac{q_{pd,fi}L^2\ell - 8(M_{pd,fi,laje}(\ell - \sum_{i=1}^2 b_{ef,i}))}{12} =$$

$$\frac{11,16 \times 62^2 \times 5,36 - 8(3288 \times 10^{-3} (5,36 - (\frac{5,36}{8} + \frac{5,36}{8})))}{12} = 182,80 \text{ kNm}$$

$$M_{pd,fi,VS400x68} = \frac{q_{pd,fi}\ell^2L - 8(M_{pd,fi,laje}(L - nb_{ef} - \sum_{i=1}^2 b_{ef,i}) + nM_{pd,fi,viga})}{12} =$$

$$\frac{11,16 \times 5,36^2 \times 6,2 - 8(3288 \times 10^{-3} (6,2 - 1 \times 2,68 - (\frac{2,68}{2} + \frac{2,68}{2})) + 1 \times 27,97)}{12} = 133,42 \text{ kNm}$$

Assim, essas vigas devem receber revestimento de forma a garantir que os esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio, no tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF, não seja menor que os aqui calculados. Outras alternativas foram verificadas a seguir.

3.3.2 Alteração na armadura do mezanino

Uma vez que o mezanino com tela eletrossoldada Q196 atendeu às exigências de segurança, testes com outras armaduras mais leves foram realizados para verificar o comportamento da laje. A Tabela 6 apresenta telas de aço pré-fabricadas produzidas no Brasil (Gerdau, 2012) com aberturas quadradas e aço CA-60 ($f_{yk} = 600$ MPa). O mesmo processo apresentado no item anterior é realizado aqui. A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados considerando os painéis de 6,20 x 5,36 m e 8,04 m x 6,20 m. É possível constatar que, em situação de incêndio, considerando que uma ou duas vigas secundárias dentro do painel não tenham recebido revestimento, somente a tela Q196 atendeu às exigências de segurança. Também é possível observar como a variação nas taxas de armadura interfere de forma substancial no valor de $q_{fi,Rd}$. A verificação do painel 21,44 x 6,20 m foi feita aqui apenas a título didático, pois a verificação do limite superior da flecha da laje do painel dada pela Equação 7 não é atendida.

Tabela 6 – Telas de Aço Pré-Fabricadas Produzidas no Brasil – Gerdau (2012)

Designação	Abertura (mm x mm)	Φ (mm)	Seção (mm ² /m)	Massa (kg/m ²)
Q 92	150 x 150	4,2	92	1,48
EQ 98	50 x 50	2,5	98	1,54
Q 196	100 x 100	5,0	196	3,11

Portanto, a segurança da laje está verificada, empregando-se a tela Q196 para o painel 6,20 m x 5,36 m.

Tabela 7 - Resumo de resultados para telas pré-fabricadas

Tela		e	$Q_{fi,Rd,laje}$ (kN/m ²)	$Q_{fi,Rd,viga}$ (kN/m ²)	$Q_{fi,Rd}$ (kN/m ²)	$Q_{fi,Sd}$ (kN/m ²)	%	Verif.
Especificação	A_s (mm ² /m)							
Painel 6,20 m x 5,36 m								
Q 92	92,0	3,03	1,17	3,77	7,31	8,10	111%	NOK
EQ 98	98,0	3,04	1,24	3,77	7,54	8,10	107%	NOK
Q 196	196,0	3,09	2,39	3,77	11,16	8,10	72%	OK
8,04 m x 6,20 m								
Q 92	92,0	3,48	0,79	2,17	4,92	8,10	165%	NOK
EQ 98	98,0	3,49	0,84	2,17	5,11	8,10	159%	NOK
Q 196	196,0	3,56	1,62	2,17	7,95	8,10	102%	NOK

NOK: não atende às exigências de segurança da estrutura

4 Verificação em incêndio empregando o programa Vulcan

O programa de computador Vulcan (versão 10.12.0) foi desenvolvido na Universidade de Sheffield para análise tridimensional do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio. A modelagem do comportamento não linear é feita utilizando-se elementos de viga, mola e casca. Um modelo de fibras é utilizado para obtenção dos esforços resistentes e rigidezes, permitindo a consideração das relações tensão-deformação não lineares dos materiais, juntamente com deformações térmicas associadas à distribuição de temperatura ao longo da seção transversal. O Vulcan é um programa validado internacionalmente para uso comercial e de pesquisa, com uma vasta bibliografia de trabalhos realizados demonstrando suas aplicações (Abu, 2009; Wang, 2001). Serão analisados os modelos com as alternativas com telas eletrossoldadas. Segundo a ABNT NBR 5628:2001, "Quando a flecha atinge $f/30$ do vão livre, considera-se atingido o estado-limite último por deformação excessiva". Apesar de essa restrição ser aplicada a ensaios e de tratar-se de um risco virtual (uma forma de se proteger o forno contra o colapso da estrutura (Wang, 2001)), vai-se estender esse limite aos resultados obtidos pelo Vulcan. A estrutura modelada no Vulcan é apresentada na Figura 13. Todas as vigas do contorno e pilares foram revestidos com argamassa projetada Blaze Shield II. As duas vigas internas do painel não receberam revestimento contra incêndio. As fôrmas de aço não são consideradas no modelo. Os esforços solicitantes considerados no modelo são idênticos aos apresentados nas seções anteriores. Como o programa não realiza análise térmica foram consideradas para todos os modelos de mezanino estudados, as curvas de temperatura x tempo extraídas do

programa ATERM (Pierin, 2011), validado contra o programa Super Tempcalc (Anderberg, 2007). Na Figura 14 tem-se uma das saídas do programa para uma seção da laje. Foram determinadas curvas tempo x temperatura para lajes, vigas principais e secundárias. Foi empregado o incêndio-padrão (ABNT NBR 5628:2001). Os coeficientes de convecção e emissividade e as propriedades físico-térmicas do concreto foram os normatizados pela ABNT NBR 15200:2012. O material de revestimento contra fogo foi o Blaze shield, com espessura e propriedades físico-térmicas com base em Silva (2004).

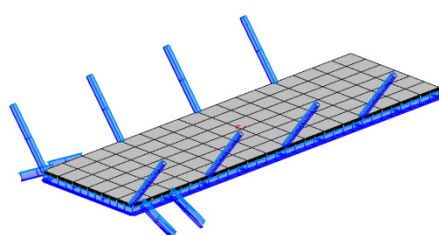


Figura 13 - Estrutura modelada no Vulcan

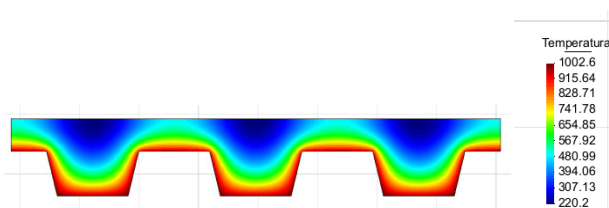


Figura 14 - Campo térmico da laje mais revestimento aos 90 min de incêndio-padrão

Para controle de deslocamento considerou-se o nó 54, no meio da laje. Na Figura 15, é possível verificar os deslocamentos encontrados nos painéis de 6,20 x 5,36 m (1), 8,04 x 6,20 m (2), 10,72 x 6,20 m (3) e 21,44 x 6,20 m (4), considerando todas as armaduras estudadas. Apenas o painel 21,44 x 6,20 m estudado via Vulcan atingiu o estado-limite último por deslocamento excessivo; os deslocamentos dos demais painéis estão dentro do limite adotado e, nesse caso, a estrutura do mezanino é considerada adequada. Verificou-se que o deslocamento no meio da laje (nó 54) não variou sensivelmente em função da alteração da taxa de armadura na laje.

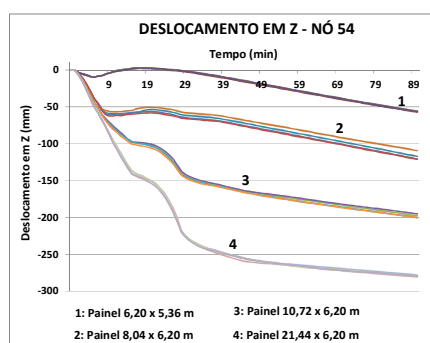


Figura 15 – Curvas tempo x deslocamento em Z – centro da laje

Arm	A_s (mm ² /m)	Deslocamento vertical (mm)			
		Painel 5,36 x 6,20	Painel 6,20 x 8,04	Painel 6,20 x 10,72	Painel 6,20 x 21,44
Q92	92	-55,83 $\ell/96$	-119,69 $\ell/52$	-195,07 $\ell/32$	-279,39 $\ell/22$
EQ98	98	-56,30 $\ell/96$	-116,65 $\ell/53$	-200,10 $\ell/31$	-278,18 $\ell/22$
Q196	196	-56,35 $\ell/96$	-121,14 $\ell/51$	-200,23 $\ell/31$	-279,32 $\ell/22$

Para vão livre de 620 cm deslocamento-limite: $\ell/30=207$ mm

Para vão livre de 536 cm deslocamento-limite: $\ell/30=179$ mm

1: Painel 6,20 x 5,36 m; 2: Painel 8,04 x 6,20 m;

3: Painel 10,72 x 6,20 m; 4: Painel 21,44 x 6,20 m

5 Conclusões

Neste trabalho aplicaram-se 3 métodos de dimensionamento em incêndio em um caso real de um mezanino construído com laje mista de aço e concreto sobre vigas de aço. O projeto original

previu revestimento contra fogo para 90 min de incêndio-padrão nas vigas. Analisou-se a laje para a situação de incêndio, empregando-se o método simplificado apresentado na ABNT NBR 14323:2013, um método desenvolvido por Bailey que considera o efeito de membrana e uma análise por elementos finitos utilizando o programa de computador Vulcan versão 10.12.0. A estrutura original, em que se incluem a armadura longitudinal e o revestimento das vigas secundárias, teve sua segurança em incêndio comprovada conforme ABNT NBR 14323:2013. Para o método de Bailey e o programa Vulcan foi necessária a substituição da armadura original por nova configuração da armadura negativa (em 2 direções) e as vigas secundárias não foram consideradas revestidas contra fogo, resultando em quatro painéis de laje a analisar: 6,20 x 5,36 m, 8,04 x 6,20 m. Pelo método de Bailey a segurança para o painel 6,20 x 5,36 m foi verificada apenas para a tela Q196, ocorrendo sensível variação da força resistente do painel em função da taxa de armadura empregada. A mesma análise foi realizada no programa Vulcan; como resultado, apenas o painel 21,44 x 6,20 ultrapassou o deslocamento-limite adotado. No exemplo estudado, empregando-se o método simplificado de Bailey que considera o efeito de membrana, consegue-se uma economia de armaduras em relação ao projeto original recalculado conforme procedimento detalhado na ABNT NBR 14323:2013. Considerando-se que as armaduras poderiam ser ainda em menor quantidade pelo Vulcan, conclui-se que o emprego do programa Vulcan levaria a uma solução mais econômica em termos de armaduras utilizadas.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia do Metropolitano de São Paulo, ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico, CNPq e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP.

7 Referências bibliográficas

Abu, A. K., Burgess, I. W. "The effect of edge support on tensile membrane action of composite slabs in fire", *Stability and Ductility of Steel Structures*, Rio de Janeiro, Brasil, 8-10, 2010.

Abu, A. K. "Behaviour of Composite Floor Systems in Fire", *Dissertação de Doutorado*, The University of Sheffield, United Kingdom, 2009.

Anderberg, Y. TCD 5.0 - User's Manual. *Fire Safety Design*, Lund, 2007

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5628 "Componentes Construtivos Estruturais - Determinação da Resistência ao Fogo". Rio de Janeiro, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800 "Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios". Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14323 “Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio”. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15200 “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

Bailey C.C., Moore D.B. “The structural behavior of steel frames with composite floors slabs subject to fire: Part 1: Theory”, *The Structural Engineer*, 78, No. 1 1, 6. 2000.

Bailey C.C., Moore D.B. “The structural behavior of steel frames with composite floors slabs subject to fire: Part 2: Design”, *The Structural Engineer*, 78, No. 1 1, 6. 2000a.

Bailey, C.C., White, D.S., and Moore, D.B. “The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions”, *Engineering Structures*, 22. 2000.

Cordeiro, L.C.S. “Sobre as Lajes Mistas de Aço e Concreto em Situação de Incêndio”, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2014.

Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Brussels, 2007.

Fabrizzi, M. A. “Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto”, Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos, 2007.

Fakury, R.H., Ribeiro, J.C.L., Las Casas, E.B. “Pisos Mistos Aço-Concreto em Situação de Incêndio”, XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, 2004.

Fakury, R.H., Ribeiro, J.C.L., de las Casas, E.B., Pannoni, F.D. Um método avançado de cálculo para pisos mistos de aço e concreto em situação de incêndio. In: XXV CILAMCE (Congresso Ibero Latino Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia). Recife. 2004a.

Gerdau S.A., sítio “www.gerdau.com.br”, consultado em 08 de março de 2012.

MACs+, sítio “www.macsfire.eu”, consultado em 10 de janeiro de 2013.

Metform, Catálogo técnico, Sítio “<http://www.metform.com.br/steel-deck-catalogo-tecnico.php>”, consultado em 08 de março de dia, 12 de fevereiro de 2012.

Oliveira, G., Rigobello, R., Munaiar Neto, J, Malite, M., “Código computacional integrado para cálculo de esforços resistentes em elementos mistos de aço e concreto” Anais do 19º SIICUSP - Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP. São Carlos. 2011.

Pierin, I. “A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio”, Dissertação de Doutorado, USP, São Paulo, 2011.

Silva, V. Pignatta. “Estruturas de aço em situação de incêndio”. Zigurate Editora. São Paulo, 2004. 249p.

Vassart, O., Zhao, B.: “Membrane Action of Composite Structures in Case of Fire – Design Guide”, 2012.

Vassart, O., Zhao, B.: “Membrane action of Composite Slab in Case of Fire – Engineering Background”, 2012a.

Vulcan, sítio “www.vulcan-solutions.com”, 2012.

Wang, Y.C. “Steel and Composite Structures Behaviour and design for fire safety”. University of Manchester, Spon Press, 2001.