

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

## **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Bianca do Valle Ventura Santos<sup>1</sup>

Débora Maia Guimarães<sup>2</sup>

Lucas Fadini Favarato<sup>3</sup>

Macksuel Soares de Azevedo<sup>4</sup>

### **Resumo**

Tradicionalmente, a formação dos profissionais do segmento da construção é voltada à utilização do concreto armado e protendido, dificultando a visibilidade dos sistemas estruturais em aço. Todavia, é possível observar um interesse crescente pela aplicação de estruturas de aço e mistas de aço e concreto devido a suas vantagens relacionadas à industrialização. Neste contexto, as lajes mistas se destacam como alternativa às lajes convencionais pois possibilitam otimizar o processo construtivo pela eliminação do escoramento e pela facilidade de montagem, além da redução do consumo de aço estrutural. Contudo, a escassez de ferramentas computacionais que dimensionem esses elementos estruturais, principalmente em situação de incêndio, desencorajam sua aplicação em projetos. Uma pesquisa do CTIF (International association of fire and rescue services) publicada em 2012 identificou que cerca de 30% dos incêndios ocorridos no mundo são em edificações, o que reforça a importância de verificar lajes mistas em altas temperaturas. Assim, este trabalho adiciona uma rotina computacional em Visual Basic for Applications (VBA) do Microsoft Excel para dimensionamento das lajes mistas em situação de incêndio a uma ferramenta programada para verificar o elemento em temperatura ambiente. Ademais, o *software* fornece as taxas de armaduras positivas para garantia da integridade do sistema estrutural.

**Palavras-chave:** Lajes mistas; Ferramenta computacional; VBA; Incêndio; Dimensionamento.

## **A COMPUTATIONAL TOOL FOR DESIGN OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLABS UNDER FIRE CONDITIONS**

### **Abstract**

Usually, the academic background of the construction segment is mainly focused on the application of reinforced and prestressed concrete, limiting the steel structural systems visibility. However, the interest in the application of steel and composite structures is growing due to their advantages related to industrialization. In this context, composite slabs stand out as an alternative to conventional slabs as they optimize the construction process by eliminating propping as well as by the ease assemble of shuttering, in addition to the reduction of structural steel consumption. Nevertheless, the lack of computational tools for design of such elements, mainly under fire conditions, inhibits their application in projects. An CTIF (International association of fire and rescue services) survey published in 2012 identified that about 30% of fires in the world are in buildings, which reinforces the importance of the composite slabs design at high temperatures. Thus, this work adds a design composite slabs under fire condition computational routine in Visual Basic for Applications (VBA) to a tool programed to verify the structural element in normal conditions. Additionally, the *software* provides the additional reinforcement areas to guarantee the system's integrity.

**Keywords:** Composite slabs; Computational tool; VBA; Fire conditions; Design.

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup> Mestranda em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As lajes mistas de aço e concreto, conhecidas também por serem lajes com fôrmas de aço incorporada (*steel deck*), são elementos estruturais compostos por uma fôrma de aço nervurada, conformada a frio, sobre a qual o concreto é depositado, conforme Figura 1. Após seu endurecimento, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, funcionando como parte ou como totalidade da armadura de tração da laje, conforme procedimentos descritos na NBR 8800 [1].



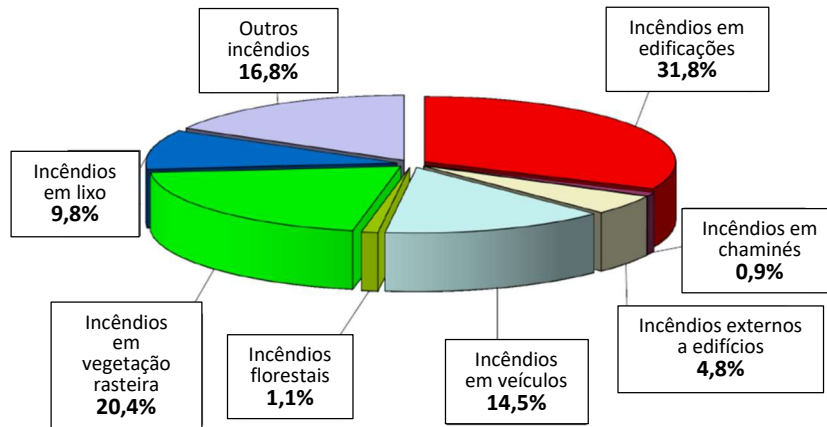
Fonte: Adaptado de ArcelorMittal Perfilor [18].

As lajes mistas ganham cada vez mais espaço na construção civil brasileira por serem uma boa alternativa para as lajes tradicionais de concreto armado, já que apresentam maior facilidade de instalação, podendo dispensar escoramentos, elevada rapidez de execução e reduzido consumo de aço estrutural [2]. Destaca-se que, por dispensar o uso de formas e escoramentos, gera-se menos resíduos nos canteiros de obras, tornando-os mais limpos. Entretanto, mesmo que as lajes mistas sejam amplamente empregadas nas construções metálicas no Brasil [3], esse sistema ainda encontra pontos críticos que afetam sua difusão no país, como a baixa variedade de perfis encontrados no mercado brasileiro [4]. Ademais, a falta de ferramentas computacionais que agilizem e automatizem o dimensionamento das lajes mistas também funcionam como barreiras para a sua disseminação.

Em se tratando do dimensionamento das estruturas, vale ressaltar a importância da verificação em situação de incêndio. Uma pesquisa realizada em 2010 pelo Centro de Estatística de Incêndio do CTIF (International association of fire and rescue services) [5] sobre o mapeamento de incêndios no mundo, onde 32 países foram considerados, apontou que cerca de um terço dos incêndios ocorreram em edificações, como é apresentado na Figura 2. Desse modo, nesses

casos, as estruturas ficam sujeitas ao aumento da temperatura que influencia diretamente na capacidade resistente dos materiais que as compõem, reduzindo suas propriedades mecânicas.

Figura 2 – Mapeamento de incêndios no mundo em 2010.



Fonte: Adaptado de Brushlinsky *et al.* [5].

No caso dos sistemas mistos de aço e concreto, a fôrma metálica fica exposta ao fogo e, por apresentar alta condutividade térmica, torna-se um ponto de atenção para o dimensionamento. Dessa forma, para amenizar esse efeito, pode ser adotado revestimentos para proteção contra o fogo, que se configuram como uma etapa a mais na obra e encarecem o seu custo, ou as lajes podem ser dimensionadas para resistir ao incêndio. Assim, a opção mais eficaz, já difundida, é o uso de armaduras positivas nas nervuras das lajes, que resistem aos esforços de tração em situação de incêndio, assumindo o papel que a forma de aço tem em temperatura ambiente.

Segundo Seito *et al.* [6], apesar dos trabalhos realizados, muito ainda deve ser estudado sobre os procedimentos de dimensionamento de lajes mistas. Nas últimas décadas, as pesquisas sobre lajes mistas de aço e concreto abordaram a avaliação do seu comportamento em situação de incêndio a partir de procedimentos prescritos em normas brasileiras e métodos avançados, como em Cordeiro [7], e até mesmo por meio de métodos numéricos [8, 9]. Além disso, alguns trabalhos como o de Bolina [10] e Sousa [11] também analisam experimentalmente o efeito do incêndio nas lajes mistas sob diferentes aspectos.

Todavia, poucos estudos são voltados ao desenvolvimento de ferramenta computacional que possibilite o dimensionamento das lajes mistas de aço e concreto, principalmente quando se trata de elevadas temperaturas. Para dimensionamento à temperatura ambiente, alguns *softwares* internacionais estão disponíveis, como o H60 Calculator [12] e COFRA 5: Design *software* for composite floors [13]. Recentemente, Silva *et al.* [14] elaboraram o *Scale Deck*, uma ferramenta computacional em Visual Basics for Application (VBA) no *software* Microsoft Excel para dimensionamento de lajes mistas compostas pela fôrma metálica Polydeck 59S em temperatura ambiente. Com isso, este trabalho visa incluir no programa computacional *Scale Deck* [14] uma rotina de cálculo para o dimensionamento das lajes mistas em situação de incêndio, indicando as taxas de armaduras positivas necessárias para a garantia da integridade do sistema estrutural, além de fornecer, adicionalmente, a tela anti-fissuração que deve ser usada para combater a fissuração do concreto por retração.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Dimensionamento das lajes mistas em situação de incêndio

Para o dimensionamento das lajes mistas em situação de incêndio, utilizou-se como base o anexo C da NBR 14323 [15], que apresenta método simplificado para os cálculos, considerando o elemento estrutural apoiado na direção perpendicular às nervuras e exposto ao incêndio padrão com o sentido de baixo para cima.

Em geral, a condição de segurança das estruturas é alcançada quando o esforço resistente de cálculo ( $R_d$ ) é maior do que o esforço solicitante de cálculo ( $S_d$ ), ou seja, durante o período em que o elemento estrutural ainda é capaz de manter sua capacidade portante diante das ações impostas a ele. Essa condição também deve ser atendida no caso de lajes mistas expostas a elevadas temperaturas. Com relação aos esforços solicitantes de cálculo para a situação de incêndio, deve-se considerar que a laje mista será exposta a cargas térmicas em um período curto de atuação, portanto, é preciso utilizar as combinações de ações últimas excepcionais de acordo com os procedimentos da NBR 8681 [16] para obter-se o valor desejado das ações para essa situação.

Para os esforços resistentes de cálculo, vale ressaltar que os componentes da laje mista (aço e concreto) ao serem expostos a elevadas temperaturas, têm suas propriedades mecânicas e térmicas modificadas, bem como sua capacidade resistente diminuída. Desse modo, considera-se que a laje apresenta capacidade portante durante o incêndio por um período estabelecido pelas normas brasileiras.

Esse período em que o elemento estrutural deve manter sua função é chamado de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) e pode ser determinado por meio do método tabular disponibilizado no anexo B da Instrução Técnica nº 08/2019 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo [17], onde é necessário conhecer a ocupação/uso da edificação e sua altura. Outra maneira de determinar o TRRF é através do método do tempo equivalente, apresentado no anexo F da NBR 14323 [15], em que devem ser conhecidas algumas características da edificação e de seus dispositivos de prevenção ao incêndio.

Em seguida, é possível verificar se todos os critérios da norma estão sendo atendidos. Primeiramente, apenas pelo fato de a laje mista conter a fôrma de aço, o critério da estanqueidade já é atendido. Para o critério do isolamento térmico, a espessura efetiva da laje ( $h_{ef}$ ), dada pela Equação 1, deve ser maior ou igual a espessura mínima da laje, que se dá em função do TRRF, como mostrada na Tabela 1.

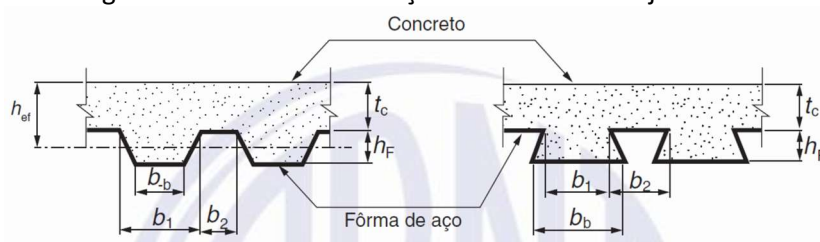
$$h_{ef} = t_c + \frac{h_f}{2} \left( \frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2} \right), \text{ para } \frac{h_f}{t_c} \leq 1,5 \text{ e } t_c > 40\text{mm}$$

ou

$$h_{ef} = t_c + \left( 1 + 0,75 \frac{b_1 + b_b}{b_1 + b_2} \right), \text{ para } \frac{h_f}{t_c} > 1,5 \text{ e } t_c > 40\text{mm}$$
(1)

Onde as dimensões  $t_c$ ,  $h_f$ ,  $b_1$ ,  $b_b$  e  $b_2$  são definidas de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Dimensões da seção transversal da laje mista



Fonte: NBR 14323 [13].

Tabela 1 - Espessura efetiva mínima da laje em função do TRRF

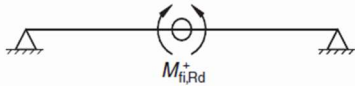


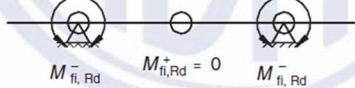
TRRF min	Espessura efetiva mínima $h_{ef}$ mm
30	60
60	80
90	100
120	120
180	150

Fonte: NBR 14323 [13].

Caso o critério do isolamento térmico seja atendido, independentemente de a laje mista ter ou não armadura adicional, a resistência ao fogo do elemento estrutural pode ser considerada de no mínimo 30 minutos.

Além desses critérios, a capacidade resistente das lajes mistas em situação de incêndio pode ser definida por meio da análise plástica global, considerando os valores dos momentos fletores resistentes de cálculo positivo e negativo e os possíveis modos de colapso da laje. Esses modos dependem da armadura positiva dentro das nervuras e/ou da tela soldada no interior do concreto e devem respeitar algumas equações para que a laje não colapse nessa situação, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Modos de colapso e condições a serem atendidas pelas lajes mistas

Sistema estático e modo de colapso <sup>a</sup>	Condição necessária
<p>Laje sem armadura negativa (colapso por rótula plástica sob momento positivo na seção central)</p> 	$M_{fi,Rd}^+ \geq q_{fi,d} \frac{L^2}{8}$ <p>ou</p> $q_{fi,d} \leq 8 \frac{M_{fi,Rd}^+}{L^2}$
<p>Laje com armadura negativa apenas em um apoio e armadura positiva</p> 	$M_{fi,Rd}^+ + 0,45 M_{fi,Rd}^- \geq q_{fi,d} \frac{L^2}{8}$ <p>ou</p> $q_{fi,d} \leq \frac{(8 M_{fi,Rd}^+ + 3,6 M_{fi,Rd}^-)}{L^2}$
<p>Laje com armaduras negativas nos dois apoios e armadura positiva</p> 	$M_{fi,Rd}^+ + M_{fi,Rd}^- \geq q_{fi,d} \frac{L^2}{8}$ <p>ou</p> $q_{fi,d} \leq \frac{8(M_{fi,Rd}^+ + M_{fi,Rd}^-)}{L^2}$
<p>Laje com armaduras negativas nos dois apoios e sem armadura positiva</p> 	$M_{fi,Rd}^- \geq q_{fi,d} \frac{L^2}{8}$ <p>ou</p> $q_{fi,d} \leq 8 \frac{M_{fi,Rd}^-}{L^2}$

<sup>a</sup> O símbolo "O" indica rótula plástica.

Fonte: NBR 14323 [15]

O momento fletor positivo resistente de cálculo ( $M_{fi,Rd}^+$ ) corresponde ao momento de plastificação obtido através do diagrama de tensões na seção da laje totalmente plastificada, considerando uma largura de influência igual à tomada para a carga distribuída de cálculo. Para o cálculo desse parâmetro, é tomado como princípio o equilíbrio das forças, onde a resultante da tração das barras de armadura deve estar em equilíbrio com a resultante de compressão suportada pelo concreto. De maneira conservadora, as contribuições de forças proporcionadas pela fôrma de aço e pela tela soldada podem ser desprezadas. A partir dessa análise, é obtida a Equação 2 para o cálculo do  $M_{fi,Rd}^+$ .

$$M_{fi,Rd}^+ = k_{s,\theta} f_{yk} A_s (h - u_{f3} - \frac{x_{fi}}{2}) \quad (2)$$

Onde:

$k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço das armaduras em temperatura elevada relativo ao valor a temperatura ambiente;

$f_{yk}$  é a resistência ao escoamento do aço do perfil à temperatura ambiente;

$A_s$  é a área da armadura positiva;

$h$  é a altura total da laje;

$u_{f3}$  é a menor distância do eixo da barra da armadura em relação a base da forma de aço;

$x_{fi}$  é a altura do concreto comprimido.

De forma análoga, o momento fletor negativo resistente de cálculo ( $M_{fi,Rd}^-$ ) corresponde, também, ao momento de plastificação. Nesse caso, portanto, a força de tração advinda da tela soldada deve estar em equilíbrio com a força de compressão apresentada pelo concreto. Para manter-se a favor da segurança, as contribuições de forças do concreto tracionado, da fôrma de aço e da armadura positiva nas nervuras são desprezadas. A partir dessas informações, é possível chegar à Equação 3 para a obtenção do  $M_{fi,Rd}^-$ .

$$M_{fi,Rd}^- = A_s^- f_{yk} (h - y_1 - d_s - \frac{x_{fi}}{2}) \quad (3)$$

Onde:

$f_{yk}$  é a resistência ao escoamento do aço do perfil à temperatura ambiente;

$A_s^-$  é a área da tela anti-fissuração;

$h$  é a altura total da laje;

$y_1$  é a altura da parte desconsiderada da seção reduzida da laje mista com temperatura superior à temperatura limite;

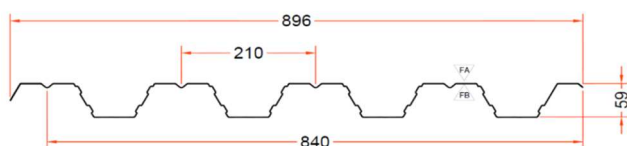
$d_s$  é a distância do eixo da tela anti-fissuração ao topo da laje mista;

$x_{fi}$  é a altura do concreto comprimido.

## 2.2 Fôrma metálica

O dimensionamento das lajes mistas tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio realizado pelo *software* desenvolvido adota como geometria para a fôrma de aço os valores apresentados pelo produto comercializado pela ArcelorMittal Perflor, o Polydeck 59S [18], fabricado com altura nominal das nervuras igual a 59 mm e espessura que varia de 0,80 a 1,25 mm, conforme Figura 4. Além disso, para os outros parâmetros geométricos da fôrma metálica utilizados para o dimensionamento, mostrados na Figura 5 (a), e para o posicionamento das armaduras na nervura da laje, observado na Figura 5 (b), foram utilizadas as distâncias apresentadas na Tabela 3.

Figura 4 – Polydeck 59S: (a) geometria da fôrma de aço e (b) fôrma produzida pela ArcelorMittal Perflor.



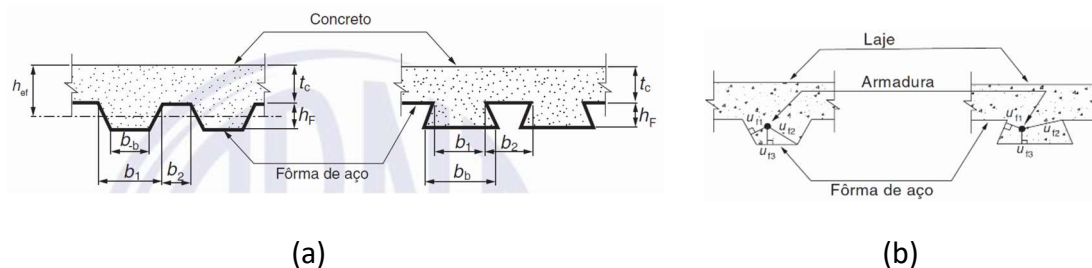
(a)



(b)

Fonte: Adaptado de ArcelorMittal Perflor [18].

Figura 5 – Parâmetros geométricos (a) do Polydeck 59S; (b) da posição das armaduras na nervura da fôrma.



Fonte: Adaptado de NBR 14323 [15].

Tabela 3 – Quantificação dos parâmetros do Polydeck 59S e do posicionamento das armaduras nas nervuras.

$h_F$ (mm)	59
$t_c$ (mm)	61
$b_1$ (mm)	126
$b_2$ (mm)	84
$b_b$ (mm)	61
$u_{r1}$ (mm)	45
$u_{r2}$ (mm)	35
$u_{r3}$ (mm)	55

Fonte: O autor.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Ferramenta computacional para dimensionamento de lajes mistas em situação de incêndio

##### 3.2.1 Aplicabilidade do programa

O programa de Silva *et al.* [14] que já englobava as verificações necessárias para os estados-limites últimos para a laje mista em temperatura ambiente, agora contém a verificação dos estados limites-últimos de momento fletor resistente positivo de cálculo, de momento fletor resistente negativo de cálculo e dos modos de colapsos possíveis, apresentados anteriormente, para a situação de incêndio, utilizando as fôrmas de aço galvanizado Polydeck 59S, comercializada no Brasil pela ArcelorMittal [18].

Cabe acrescentar que para este trabalho o dimensionamento em situação de incêndio não foi baseado em ensaios experimentais, mas em métodos analíticos de cálculo da NBR 14323 [15]. Nesta pesquisa, o método considerado foi o simplificado e foram excluídos da análise estrutural em situação de incêndio os casos de edificações destinadas ao depósito de materiais explosivos e à central de comunicação e de energia. Ademais, para a armação nas nervuras da laje, foi considerada a adição de uma barra de armadura, com o diâmetro variando de 5 até 12,5 mm,

ou duas barras de mesmo diâmetro com as mesmas opções apresentadas para a barra única. Essa seleção foi feita com base nas armaduras mais usuais; dessa forma, o programa não dimensiona lajes que necessitam de mais do que duas barras de 12,5 mm de diâmetro nas nervuras.

Além disso, como citado anteriormente, o dimensionamento é realizado em temperatura ambiente e verificado em situação de incêndio com cargas uniformemente distribuídas na superfície da laje. Desse modo, o estado-limite de resistência à punção para carregamento concentrado não foi contemplado e deve ser verificado separadamente.

Por fim, a implementação computacional dos fluxogramas de cálculo foi realizada no ambiente Visual Basic for Application (VBA) do Microsoft Excel. Este *software* foi escolhido pela facilidade na elaboração da interface, na implementação dos códigos e na depuração dos erros. Adicionalmente, objetivou-se disponibilizar aos projetistas e à comunidade acadêmica um programa de fácil acesso e entendimento, que possa ser utilizado em qualquer computador, sem grandes requisitos de sistema.

### 3.2.1 Interface do programa

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, o programa avalia todos os estados-limites aplicáveis e retorna o resultado do dimensionamento da laje em temperatura ambiente. Em seguida, o *software* apresenta o resultado do dimensionamento da laje para a situação de incêndio. Complementarmente, o programa informa qual foi o TRRF utilizado, se a verificação ao isolamento térmico foi atendida, a quantidade e o diâmetro das barras de armadura que devem ser adicionadas às nervuras e qual malha anti-fissuração deve ser utilizada para combater a fissuração por retração do concreto.

Os dados de entrada do programa são:

- Em relação às ações: cargas permanentes (peso próprio de estruturas metálicas, peso próprio de estruturas pré-moldadas, peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados, peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco, peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos) e as ações variáveis (ação do vento e sobrecarga de uso e ocupação), dadas em kN/m<sup>2</sup>. Adicionalmente, o usuário deve informar a natureza das ações consideradas, classificadas em estáticas ou dinâmicas fracas;
- Em relação às propriedades do concreto: a resistência característica à compressão (MPa);
- Em relação às propriedades do aço: a resistência característica ao escoamento à tração (MPa);
- Em relação às propriedades da fôrma: espessura da fôrma (mm);
- Em relação às propriedades da laje mista: a altura total da laje (cm), o vão da laje (mm), a quantidade de apoios e o modelo da tela de continuidade, caso a laje possua mais de dois apoios;
- Em relação à edificação: o uso/ocupação, a altura da edificação (m), a área de ventilação vertical (m<sup>2</sup>), a área de ventilação horizontal (m<sup>2</sup>), a altura do piso habitável mais elevado (m), a área de piso (m<sup>2</sup>) e a altura do compartimento (m);

- Em relação ao projeto contra o incêndio: existência de chuveiros automáticos, existência de brigada de incêndios e existência de detecção automática.

Por fim, os dados de saída são:

#### (A) DIMENSIONAMENTO EM TEMPERATURA AMBIENTE:

- Em relação à verificação estrutural: o programa indica se a laje dimensionada atende aos critérios de dimensionamento e se necessita de escoramento. Ainda, informa a sollicitação e a resistência para cada estado-limite e apresenta o valor da razão entre a sollicitação e resistência, denominada índice de aproveitamento;
- Em relação à fissuração do concreto: a malha anti-fissuração necessária para configuração apresentada;
- Em relação ao efeito do empoçamento do concreto: o programa indica se, para a configuração apresentada, o empoçamento do concreto foi considerado no dimensionamento, incluindo uma camada extra de concreto com espessura igual a 70% do deslocamento máximo, caso este exceda  $L_F/250$ .

#### (B) VERIFICAÇÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO:

- Em relação à verificação estrutural: o programa indica o TRRF calculado e se a laje dimensionada atende aos critérios de dimensionamento em situação de incêndio. Ainda, informa a sollicitação e a resistência para cada estado-limite e apresenta o valor da razão entre os esforços solicitantes e resistentes de cálculo, denominada índice de aproveitamento;
- Em relação à armação: a malha anti-fissuração necessária para configuração apresentada e a quantidade e diâmetro das barras de armadura necessária para adicionar às nervuras;

As interfaces do programa computacional desenvolvido são apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 – Interface inicial do programa computacional *Scale Deck* [12].



Fonte: O autor.

Figura 7 – Interfaces do programa: (a) ações; (b) dados de entrada para dimensionamento em temperatura ambiente; (c) resultados para o dimensionamento à temperatura ambiente.

Dados de Entrada - Ações | Dados de Entrada - Propriedades

### Ações Permanentes

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

### Ações Variáveis

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

kN/m<sup>2</sup>

(a)

Dados de Entrada - Ações | **Dados de Entrada - Propriedades**

### Propriedades

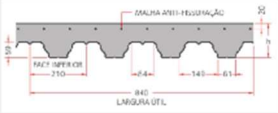
f<sub>ck</sub>  MPa      Forma

Espessura total da laje  cm      Espessura

Vão  mm      Agregado

Quantidade de apoios

Tela de Continuidade



(b)

**Resultados**

Antes da Cura			Depois da Cura			
	Valores Resistentes	Valores Solicitantes		Valores Resistentes	Valores Solicitantes	Índices de Aproveitamento
Cortante	<input type="text"/> kN/m	<input type="text"/> kN/m		<input type="text"/> kN/m	<input type="text"/> kN/m	<input type="text"/> %
Momento Fletor Positivo	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m		<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> %
Momento Fletor Negativo	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m		<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> %
Flecha	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm		<input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> %

**Malha Anti-Fissuração**

Modelo:

**Efeito do Empoçamento**

**Dimensionamento**

Imprimir Resultados

Dimensionar Novamente

Dimensionar para situação de incêndio

Voltar Fechar

(c)

Fonte: O autor.

Figura 8 – Interfaces do programa: (a) dados de entrada para dimensionamento em situação de incêndio; (b) resultados para o dimensionamento em situação de incêndio.

**PROPRIEDADES**

Uso/ocupação:

Descrição:

Altura da edificação: <input type="text"/> m	Área de ventilação vertical: <input type="text"/> m <sup>2</sup>	Existência de chuveiros automáticos: <input type="text"/>
f <sub>yk</sub> : <input type="text"/> MPa	Área de ventilação horizontal: <input type="text"/> m <sup>2</sup>	Existência de brigada contra incêndios: <input type="text"/>
Densidade do concreto: <input type="text"/>	Altura do piso habitável mais elevado: <input type="text"/> m	Existência de detecção automática: <input type="text"/>
Área de piso: <input type="text"/> m <sup>2</sup>	Altura do compartimento: <input type="text"/> m	

CALCULAR
VOLTAR

(a)

**RESULTADOS**

	Valores Resistentes	Valores Solicitantes	Índices de Aproveitamento	Verificação do isolamento térmico:
Momento Fletor Positivo	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> %	<input type="text"/>
Momento Fletor Negativo	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> kN.m/m	<input type="text"/> %	<input type="text"/>

**DIMENSIONAMENTO:**

Armação nas nervuras:  Malha anti-fissuração:

Imprimir Resultados  
Dimensionar Novamente  
VOLTAR
FECHAR

(b)

Fonte: O autor.

### 3.2 Validação da ferramenta computacional

Para a validação do programa computacional desenvolvido, comparou-se os cálculos de um exemplo específico de dimensionamento de laje mista biapoiada em situação de incêndio de Favarato [19] com os resultados obtidos pelo programa computacional desenvolvido. No exemplo, foi considerado um edifício comercial, com espessura total da laje de 12 cm, com um vão de 1,91 m, submetida aos carregamentos de peso próprio do concreto e da fôrma de aço, do revestimento do piso e da sobrecarga de utilização. Nos dois casos, o dimensionamento foi feito como descrito no item 2 deste artigo e a Tabela 4 mostra a comparação dos valores finais calculados.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos pelo programa computacional e os resultados de um exemplo específico.

	Valor calculado pelo programa ( $V_{PROG}$ )	Valor de cálculo para validação ( $V_{CALC}$ )	$V_{PROG}/V_{CALC}$
TRRF (min)	60	60	1
$\theta_s$ (°C)	339,45	339,48	0,9999
$k_{s,\theta}$	1	1	1
$x_{fi}$ (cm)	1,133	1,133	1
$N_{s,\theta}$ (kN/m)	39,27	39,50	0,9942
$\theta_c$ (°C)	324,48	324,40	1,0002
$k_{c,\theta}$	0,83	0,83	1
$N_{c,\theta}$ (kN/m)	39,27	39,49	0,9944
M+fi,Rd (kNm/m)	233,02	234,37	0,9942
Área de aço (cm <sup>2</sup> /m)	0,79 (1Ø10mm)	0,79 (1Ø10mm)	1
$\theta_{lim}$ (°C)	510,64	511,32	0,9987
$x_{fi}$ (cm)	0,50006	0,50006	1
$N_{s,\theta}^-$ (kN/m)	23,5	23,5	1
M-fi,Rd (kNm/m)	205,83	205,84	1
Tela (cm <sup>2</sup> /m)	0,47 (Q47)	0,47 (Q47)	1

Fonte: O autor.

Onde:

$\theta_s$  é a temperatura da armadura;

$N_{s,\theta}$  é força de tração proporcionada pela armadura em temperatura elevada;

$\theta_c$  é a temperatura do concreto;

$k_{c,\theta}$  é o fator de redução da resistência característica à compressão do concreto em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente;

$N_{c,\theta}$  é a força de compressão do concreto em temperatura elevada;

$\theta_{lim}$  é a temperatura limite que delimita a capacidade do concreto em resistir aos esforços em temperatura elevada;

$N_{s,\theta}^-$  é a força de tração proporcionada pela armadura negativa.

De acordo com os resultados apresentados acima, observa-se boa acurácia entre os valores calculados pelo programa computacional desenvolvido quando comparado ao exemplo de validação, uma vez que a razão entre os valores foi muito próxima de 1 em todos os casos, o que indica a eficácia do programa e a sua capacidade de dimensionar lajes mistas em situação de incêndio de maneira segura, conforme os padrões normativos.

#### 4 CONCLUSÃO

Neste artigo, foi desenvolvida uma ferramenta para um programa computacional já existente para o dimensionamento de lajes mistas em temperatura ambiente, denominada *Scale Deck* [14], para abranger também o cálculo do dimensionamento em situação de incêndio de acordo com as normas brasileiras e instruções técnicas aplicáveis. As verificações de cálculo foram feitas com base método simplificado apresentado no anexo C da NBR 14323 [15] e da Instrução Técnica nº 08/2019 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo [17].

A ferramenta computacional permite que o usuário escolha quais os dados de entrada serão usados para a verificação, não se limitando aos valores já tabelados em literatura. Além disso, o programa diferencia as cargas permanentes das cargas variáveis de sobrecarga, ponderando-as com os respectivos coeficientes, gerando um dimensionamento mais preciso e econômico.

Ademais, é importante ressaltar que não existem *softwares* para cálculo e dimensionamento de lajes mistas em situação de incêndio no mercado brasileiro. Esse fato faz com que a ferramenta seja uma inovação para o mercado, contribuindo para o aperfeiçoamento das técnicas de dimensionamento atuais e possibilitando uma opção mais rápida e eficiente aos catálogos comerciais utilizados atualmente.

A adição da verificação em situação de incêndio ao programa computacional *Scale Deck* [14] foi validada a partir de um exemplo numérico da literatura. Assim, pode-se atestar a praticidade, segurança, eficiência e especificidade nos cálculos de dimensionamento de lajes mistas. Por fim, vale pontuar que esta ferramenta foi produzida para facilitar e contribuir com o trabalho dos projetistas estruturais e a comunidade acadêmica.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo, à ArcelorMittal Tubarão e à ArcelorMittal Perfilor pelo suporte concedido para execução e conclusão deste projeto.

#### REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8880**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

2. FAKURY, R.; SILVA, A.; CALDAS, R. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
3. SALOMÃO, P. E. A; SANTOS, A. A; LORENTZ, L. P. A; PAULA, L. T. G. **Sistema misto Steel deck e suas aplicações na construção civil**. Research, Society and Development, Brasil, v.8, 2019. Disponível em: <https://rsd.unifei.edu.br/index.php/rsd/article/view/1364>. Acesso em: 07 jul. 2023.
4. Cichinelli, Gisele. **Sistema misto que dispensa parcial ou totalmente o escoramento, o steel deck agiliza a execução e reduz custos**. Revista Técnica, v. 179: Editora Pini, 2011.
5. BRUSHLINSKY, N. N.; HALL, J. R.; SOKOLOV, S. V.; WAGNER, P. **World Fire Statistics**. Report nº 17. Rússia: Center of Fire Statistics of CTIF (International Association of Fire and Rescue Services), 2012. Disponível em: [http://www.ctif.org/sites/default/files/ctif\\_report17\\_world\\_fire\\_statistics\\_2012.pdf](http://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report17_world_fire_statistics_2012.pdf). Acesso em: 15 mar. 2023.
6. SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; DA SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndios no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008.
7. CORDEIRO, Leila Cristina Santos. **Sobre as lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. 2014. 262 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
8. SANTOS, Daniel Bomfim Rocha dos. **Modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. 2014. 243 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
9. SILVA, F. B.; BOLINA, F. L. **Análise numérico-computacional de lajes mistas de aço e concreto (steel deck) em situação de incêndio**. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 10, 2018, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: 2018. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/102.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2023.
10. BOLINA, Fabrício Longhi. **Análise do efeito da continuidade de lajes mistas com chapa de aço colaborante em situação de incêndio**. 2021. 343 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Segurança Ao Incêndio, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.
11. SOUSA, Paulo Fernando Silva. **Lajes mistas com fôrma de aço incorporada em situação de incêndio - análises experimental e numérica**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
12. **H60 CALCULATOR**. Braga, Portugal: O FELIZ Metalomecânica, 2015. Disponível em: <http://www.ofeliz.pt/pt/content/h60-calculator>. Acesso em: 15 mar. 2023.



13. **COFRA 5: Design software for composite floors.** Europa: ArcelorMittal Europa. Disponível em: <https://construction.arcelormittal.com/cofra5/>. Acesso em: 15 mar. 2023.
14. SILVA, C. M.; MARTINS, M. B.; FAVARATO, L. F.; BARROS, B.; CALENZANI, A. F. G.. **Desenvolvimento de programa computacional para dimensionamento de lajes mistas.** In: XIII Congresso de Construção Metálica e Mista, 2021. Anais do XIII Congresso de Construção Metálica e Mista, 2021.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
17. CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica 08/19 – Segurança estrutural contra incêndio.** São Paulo, 2019.
18. ARCELORMITTAL PERFILOR. **Polydeck 59S - Forma-laje “Steel Deck”.** Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/polydeck-59s>. Acesso em: 18 mar. 2023.
19. FAVARATO, L. F. **Projeto, detalhamento e execução de lajes mistas de aço e concreto:** Aula 3 - Dimensionamento em situação de incêndio (notas de aula). ENGEDUCA, São Paulo, 2022.