



Aplicação de ferramenta computacional no ensino de estruturas de aço em situação de incêndio

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.4987

Autores: THAYNA COUTO DOS SANTOS MARCELINO

Resumo: O comportamento e o dimensionamento de estruturas de aço em temperatura ambiente já são bastante conhecidos e disseminados no Brasil, porém, o estudo desses elementos em situação de incêndio é mais recente e vem ganhando cada vez mais espaço. Em altas temperaturas, o aço sofre alterações em suas propriedades, perdendo resistência e rigidez, o que pode levar ao colapso da estrutura. Dessa maneira, para garantir a segurança, é necessário que os elementos sejam dimensionados também considerando os efeitos do incêndio, contudo, algumas vezes, tal conteúdo não é abordado nas grades curriculares dos cursos de graduação em engenharia civil. Além disso, nesse contexto, tem-se também os materiais de proteção contra fogo, que, devido à ausência de informações precisas a respeito de suas propriedades em altas temperaturas, tem sua espessura determinada empiricamente e apresentada por meio de cartas de cobertura e não por meio de dimensionamento adequado. Dessa maneira, este trabalho visa contribuir com a disseminação do assunto em questão. Tendo em vista a importância dos programas computacionais para o ensino e para o dimensionamento de estruturas, uma ferramenta computacional foi desenvolvida: o SSFire. A ferramenta foi disponibilizada gratuitamente e possibilitou sua aplicação no ensino de estruturas, de maneira prática e usual, além de auxiliar no correto dimensionamento dos materiais de proteção contra fogo.

Palavras-chave: Ferramenta computacional, Estruturas de aço, Incêndio, Proteção contra fogo, SSFire

APLICAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL NO ENSINO DE ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

1 INTRODUÇÃO

O cenário da Construção Civil, cada vez mais, busca por soluções mais eficientes e eficazes, que possibilitem a entrega de bons resultados, minimizando prazos, retrabalhos e desperdícios. Nesse contexto, tem se destacado o uso das estruturas de aço, não só devido à sua boa resistência mecânica, mas por uma série de vantagens, como a praticidade na montagem e a leveza, além de ser um material reciclável, que contribui para que os impactos causados pelo setor da construção sejam reduzidos.

No Brasil, o conhecimento sobre o comportamento dessas estruturas em temperatura ambiente já é bastante disseminado entre profissionais e estudantes de engenharia, sendo seu dimensionamento regido pela ABNT NBR 8800:2008. Contudo, o estudo de estruturas de aço em situação de incêndio é mais recente e, muitas vezes, não está presente nas grades curriculares dos cursos de graduação. Como discutem Seito *et al.* (2008), ainda há bastante coisa a ser feita e melhorada no que diz respeito à Segurança Contra Incêndio (SCI) no Brasil, que acompanha o modelo de desenvolvimento e crescimento do país.

Em altas temperaturas, o aço perde resistência e rigidez, devido às alterações sofridas em suas propriedades térmicas e mecânicas. Tal comportamento pode acarretar ocorrências severas, uma vez que a estrutura pode entrar em colapso. Dessa maneira, é necessário que as estruturas de aço sejam dimensionadas também considerando os efeitos do incêndio, sendo que a norma responsável por tais diretrizes é a ABNT NBR 14323:2013.

Além disso, para aumentar a segurança estrutural, também é possível adotar algumas medidas adicionais de proteção, como os materiais de revestimento contra fogo. Tais materiais, como tintas intumescentes e argamassas projetadas, são utilizados de forma a evitar o aumento excessivo da temperatura do elemento estrutural, funcionando como uma barreira térmica de proteção do aço (MRÓZ, HAGER E KORNIEJENKO, 2016).

Apesar da importância desses materiais, há uma limitação de informações a respeito de suas propriedades térmicas em elevadas temperaturas, fazendo com que não sejam dimensionados adequadamente. A determinação da espessura de material a ser aplicado nos elementos estruturais de aço acaba sendo feita de forma empírica, por meio de cartas de cobertura e, na maioria das vezes, ficando a encargo do fornecedor e não do engenheiro responsável.

Pensando nisso, neste trabalho, buscou-se uma maneira de contribuir com o assunto em questão. Como a tecnologia está cada vez mais presente na engenharia e os programas computacionais são grandes aliados quando se fala em dimensionamento de estruturas, desenvolveu-se uma ferramenta computacional de fácil acesso para auxiliar no ensino de estruturas de aço em situação de incêndio. A ferramenta foi disponibilizada de forma gratuita, contribuindo de maneira prática e usual para a disseminação do conhecimento entre estudantes e profissionais, para o aprimoramento do ensino de estruturas de aço em situação de incêndio e para o dimensionamento adequado dos materiais de proteção contra fogo.

2 METODOLOGIA

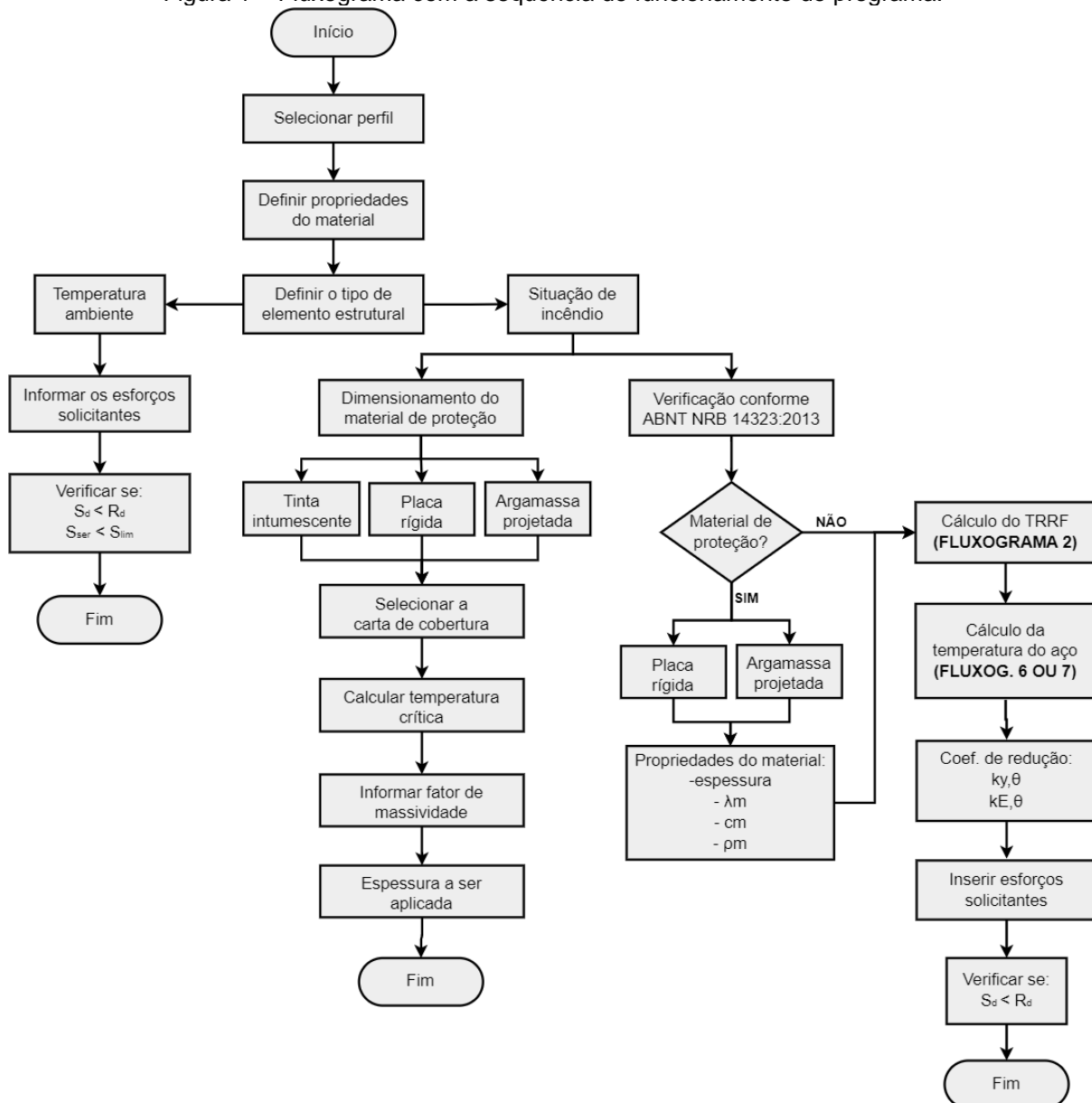
Para o desenvolvimento da ferramenta computacional, foi definida uma abordagem metodológica de forma a se chegar aos objetivos pretendidos. Os itens a seguir detalham a metodologia proposta.

2.1 Fluxogramas de cálculo

A fim de fornecer subsídios para a elaboração da ferramenta computacional, foram elaboradas rotinas de cálculo de forma a sistematizar os procedimentos de dimensionamento e, com isso, facilitar a implementação computacional.

Uma série de fluxogramas foram desenvolvidos, sendo que a Figura 1 apresenta o fluxograma com a ideia geral da ferramenta computacional. A partir desse, os demais fluxogramas foram elaborados, seguindo uma sequência lógica de dimensionamento em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Figura 1 – Fluxograma com a sequência de funcionamento do programa.



Fonte: Marcelino (2023).

2.2 Implementação computacional

A ferramenta computacional, denominada de SSFire – *Steel Structures in Fire* (Figura 2), foi totalmente desenvolvida no ambiente do Microsoft Excel, em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA).

O Microsoft Excel foi adotado para a implementação computacional por ser uma ferramenta de fácil acesso, normalmente presente nos computadores, possibilitando a facilidade de acesso à comunidade acadêmica. Além disso, possibilita a criação de interfaces gráficas de fácil interação com o usuário, que consegue inserir dados de entrada e obter dados de saída de forma rápida e clara.

O SSFire realiza a verificação de dois tipos de elementos: pilares comprimidos e flexo-comprimidos e vigas submetidas a esforços de flexão. Esses elementos podem ser analisados considerando-se diferentes situações: temperatura ambiente, situação de incêndio sem material de proteção e situação de incêndio com material de proteção. Dessa maneira, a ferramenta foi organizada em três grandes módulos:

- Módulo de verificação em temperatura ambiente, conforme os procedimentos da ABNT NBR 8800:2008;
- Módulo de verificação em situação de incêndio, conforme os procedimentos da ABNT NBR 14323:2013;
- Módulo para dimensionamento do material de proteção, realizado através de um procedimento incremental.

Figura 2 – Tela inicial de apresentação do SSFire.



Fonte: Marcelino (2023).

Ao escolher o módulo em que se deseja trabalhar, o estudante necessita inserir as informações solicitadas e, após o processamento, a ferramenta apresenta em tela os dados de saída, que também podem ser impressos em um relatório de projeto.

Com isso, disponibilizou-se para a comunidade acadêmica, uma ferramenta que permite a verificação de elementos de aço de acordo com as diretrizes das normas brasileiras em vigor atualmente. Dessa maneira, juntamente com o conteúdo ensinado em aula, os professores podem utilizar a ferramenta como apoio para formar um estudante com uma base teórica sólida e bem fundamentada, apto a analisar os resultados encontrados de forma crítica e coerente.

Além disso, por se tratar de uma ferramenta que realiza o dimensionamento dos materiais de proteção, também auxilia os projetistas para que esse cálculo seja realizado adequadamente, em vez de adotar valores padrões tabelados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ferramenta computacional foi o principal produto gerado neste trabalho, contudo, outros resultados ligados ao uso da ferramenta também foram obtidos e têm tanta importância quanto o próprio SSFire. Esses resultados serão apresentados e discutidos neste item, bem como uma breve abordagem sobre o funcionamento do programa desenvolvido.

3.1 Ferramenta computacional

O acesso às funcionalidades da ferramenta computacional desenvolvida se dá por meio de telas. De acordo com a análise desejada e escolhida pelo usuário, uma tela é aberta, o programa solicita dados de entrada e, posteriormente, apresenta os dados de saída.

A primeira tela apresentada ao usuário após a tela inicial de abertura é a apresentada na Figura 3, onde define-se o elemento estrutural a ser avaliado (sujeito à compressão, flexão ou flexo-compressão) e o tipo de verificação que vai ser feita (em temperatura ambiente ou em situação de incêndio).

Figura 3 – Definição do elemento e do ambiente de verificação.

Fonte: Marcelino (2023).

Caso o estudante opte por fazer uma verificação em temperatura ambiente, ele é direcionado para o primeiro módulo mencionado na subseção 2.2 e abre-se a tela “Temperatura Ambiente” (Figura 4). O programa pede, então, para que sejam informados os esforços que solicitam o elemento estrutural e posteriormente calcula-se os esforços resistentes. Após fazer uma comparação entre os esforços resistentes calculados e os esforços solicitantes inseridos, a ferramenta informa se o elemento está aprovado ou não.

Figura 4 – Tela para verificação em temperatura ambiente.

Barra flexo-comprimida (Temperatura Ambiente)

Perfil Selecionado

*Unidades em mm

Esforços solicitantes

Nc,Sd (kN) 1000 Vxsd (kN) 0
Mx,Sd (kN.cm) 0 Vysd (kN) 0
My,Sd (kN.cm) 0 δ (cm) 0,5

Travamento contínuo

Sim Não
Comprimento destravado (cm)
Fator de modificação - Cb Definir

Calcular Voltar

Resultados

Flambagem Local

Elementos AL - Qs: 1,00
Elementos AA- Qa: 1,00
Q = Qs x Qa: 1,00

Instabilidade Global

Nex 7.538,18 kN
Ney 1.675,64 kN
Nez 2.874,54 kN
Ne 1.675,64 kN

Índice de esbelteza reduzido (λ0): 0,97
Fator de redução (γ): 0,67

Compressão

$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$
1.000,00 kN ≤ 966,73 kN

Flexo-compressão

$\frac{N_{c,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$
- ≤ 1,0

FLM

λ 8,09
λp 9,15 λr 23,89
Mrdx 11.893,09 kN.cm
Mrdy 4.356,41 kN.cm

FLA

λ 25,97
λp 90,53 λr 137,24
Mrdx 11.893,09 kN.cm

FLT

λ -
λp - λr -
Mrdx sem FLT
Mrdy 4.356,41 kN.cm

Cortante em x

λ 25,97
λp 59,22 λr 73,76
Vxsd ≤ VxRd
0,00 kN ≤ 234,51 kN
OK, PERFIL ADEQUADO!

Cortante em y

λ 8,09
λp 29,01 λr 36,13
Vysd ≤ VyRd
0,00 kN ≤ 633,42 kN
OK, PERFIL ADEQUADO!

ELS

δ ≤ δlim
0,50 cm ≤ 1,00 cm
OK, PERFIL ADEQUADO!

Compressão pura

Gerar relatório

Fonte: Marcelino (2023).

Se, contudo, a opção de estudo escolhida for em situação de incêndio, o SSFire solicitará que o estudante indique em qual dos dois últimos módulos informados na subseção 2.2 quer trabalhar. Caso o usuário queira fazer uma verificação conforme a ABNT NBR 14323:2013, abre-se a tela mostrada na Figura 5.

Nessa tela, solicita-se que o estudante indique se a verificação em incêndio será feita considerando-se ou não o uso do material de proteção contra fogo. Após isso, deve-se preencher as demais informações solicitadas e aguardar que o programa calcule a temperatura do aço e os coeficientes de redução, que serão importantes no cálculo dos esforços resistentes de cálculo. Além disso, a ferramenta também apresenta as curvas de incêndio desenhadas para o elemento estrutural avaliado.

Com esses resultados calculados, pede-se para que o usuário clique no botão “Próximo”, onde ele será redirecionado para uma janela de verificação semelhante à que foi apresentada na Figura 4. Nesse caso, novamente, o estudante informa os esforços solicitantes, que serão comparados com os esforços resistentes calculados pelo SSFire. A ferramenta, então, indica a aprovação ou reprovação do elemento estrutural.

Figura 5 – Tela para verificação em situação de incêndio.

Barra flexo-comprimida (Situação de Incêndio)

Material de Proteção Passiva: Sem proteção Com proteção

Material: Argamassa Placa

Propriedades do aço: c_a (J/kg°C): 600; P_a (kg/m³): 7850; α_c (W/m°C): 25

Propriedades do material: Espessura (m): 0,01; c_m (J/kg°C): 2300; P_m (kg/m³): 240; λ_m (W/m°C): 0,15

Fator de massividade: 4 lados expostos Definir o fator de massividade

Resultados: TRRF Método tabular: 60,00 min; Método do tempo equivalente: 59,10 min; TRRF: 59,10 min; Fatores de redução: k_y 0,132; k_E 0,097; k_s 0,081

Carga de incêndio: 700 MJ/m²; Temperatura do aço: 781,50 °C

TRRF Características da edificação: Área de piso - A_f (m²): 366; Altura do compartimento - H (m): 3; Área de ventilação vertical - A_v (m²): 45,75; Tipo de ocupação: Serviços profissionais, pessoais e técnicos; Descrição: Escritórios

Medidas de segurança: Chuveiro automático; Brigada de incêndio; Detecção automática

Risco de ativação do incêndio: Pequeno Normal Médio Alto

1. Clique no botão "Calcular" para encontrar a temperatura do elemento estrutural;
2. Para seguir para a janela de verificação do elemento, clique no botão "Próximo".

Voltar Calcular Próximo

TEMPERATURA DOS GASES E TEMPERATURA DO AÇO COM E SEM PROTEÇÃO

| TEMPO (min) | Temp. gases (°C) | Aço sem proteção (°C) | Aço com proteção (°C) |
|-------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | ~700 | ~700 | ~400 |
| 40 | ~850 | ~850 | ~600 |
| 60 | ~900 | ~900 | ~750 |

Fonte: Marcelino (2023).

Por fim, também é possível fazer o dimensionamento dos materiais de proteção. Caso seja a escolhida, abre-se a tela indicada na Figura 6 e o estudante pode optar por dimensionar três materiais: argamassa projetada, placa rígida e tinta intumescente.

Figura 6 – Tela de dimensionamento do material de proteção.

Barra flexo-comprimida (Situação de Incêndio)

Material: Argamassa Projetada Placa rígida Tinta intumescente

Esforços solicitantes: $N_{fi,Sd}$ (kN): 600; $V_{x,fi,Sd}$ (kN): 0; $M_{x,fi,Sd}$ (kN.cm): 0; $V_{y,fi,Sd}$ (kN): 0; $M_{y,fi,Sd}$ (kN.cm): 0; K : 1,0

Cartas de cobertura: Elemento: Pilar Viga; Ambiente: Interno Externo; Tempo de resistência: 60 min

Travamento contínuo: Sim Não; Comprimento destravado (cm): ; Fator de modificação - C_b : Definir

Propriedades do Aço: Calor específico - c_a (J/kg°C): 600; Massa específica - P_a (kg/m³): 7850; Coef. cond. térmica - α_c (W/m°C): 25

Fator de massividade: 4 lados expostos 3 lados expostos Definir o fator de massividade

Resultados: Temperatura crítica: 577,25 °C; Espessura de tinta: 0,973 mm

Calcular Voltar Gerar relatório

Fonte: Site Lemnara Eixo. (2023)

Fonte: Marcelino (2023).

O SSFire solicita que o usuário informe os dados de entrada e, a partir disso, calcula duas informações de saída muito importantes: a temperatura crítica do elemento estrutural e a espessura de material de proteção necessário para proteger o elemento por um determinado período previamente definido pelo usuário.

Em todas essas telas é possível gerar um relatório de cálculo que informa todos os dados calculados pela ferramenta, possibilitando que uma memória de cálculo seja gerada e analisada por quem estiver utilizando o programa.

3.2 Benefícios da aplicação da ferramenta

Quando se fala em estruturas, sabe-se que no Brasil há um grande foco em estruturas de concreto. As estruturas de aço, como explicado ao longo do texto, vem ganhando espaço, contudo, o estudo de estruturas de aço em situação de incêndio ainda é mais recente.

Conseqüentemente, tudo isso é refletido nas faculdades e cursos de graduação. Em muitas grades curriculares, tem-se duas ou três disciplinas destinadas ao estudo de estruturas em concreto armado, enquanto todos os aspectos das estruturas metálicas são condensados em uma única disciplina, sem abordar o comportamento do aço em altas temperaturas.

Dessa maneira, o SSFire se mostrou uma ferramenta que pode auxiliar no ensino, no caso de grades que tenham a disciplina de estruturas de aço em situação de incêndio, e na introdução do conhecimento, em casos em que não há a disciplina, mas há um interesse por parte do estudante ou dos próprios professores e profissionais em estudar o assunto.

O departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), por exemplo, oferece uma disciplina optativa com foco no estudo de estruturas de aço em situação de incêndio. Nessa situação, o SSFire se mostra uma boa opção de ferramenta de apoio, possibilitando que o estudante, já com uma base teórica bem fundamentada, possa utilizar a ferramenta em exercícios e trabalhos, analisando a coerência dos resultados de forma crítica e consciente.

Além disso, a ferramenta também foi disponibilizada no site do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), juntamente com o Manual de Segurança das Estruturas de Aço em Situação de Incêndio, de Vargas e Silva (2023). Dessa forma, através do manual, é possível fornecer a base teórica necessária ao entendimento do assunto e, através do software, é possível aplicar o que foi estudado, obtendo resultados práticos e visuais que complementam o aprendizado. Com isso, foi possível ajudar na formação de novos especialistas, incluindo estudantes e profissionais que talvez não tenham estudado o assunto durante a graduação.

Um outro impacto obtido com a ferramenta computacional foi a possibilidade de ajudar profissionais e estudantes (futuros profissionais) a dimensionar corretamente os materiais de revestimento contra fogo. O procedimento utilizado atualmente, que consiste em utilizar valores fixos e tabelados, como explicam Jowsey e Scott (2014), muitas vezes conduz a um volume de material não otimizado, influenciando diretamente nos custos de proteção. Dessa maneira, o desenvolvimento do SSFire trouxe um impacto positivo também nesse sentido.

3.3 Vídeo tutorial

Junto com a ferramenta computacional também foi elaborado um vídeo tutorial ensinando como utilizar a ferramenta desenvolvida. Esse vídeo mostrou-se importante, pois permite que, tanto pessoas com domínio, quanto iniciantes no assunto, utilizem a ferramenta e consigam extrair ao máximo tudo o que ela oferece.

É um instrumento auxiliar que, em conjunto com o SSFire e com o Manual de Segurança das Estruturas de Aço em Situação de Incêndio, possibilita que estudantes e profissionais tenham entendimento e acesso pleno a um conhecimento tão importante e atual, que são as estruturas de aço em situação de incêndio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desse trabalho foi contribuir com o ensino de estruturas de aço em situação de incêndio e, conseqüentemente, com a disseminação do assunto em questão. Para isso, uma ferramenta computacional foi desenvolvida e disponibilizada gratuitamente.

A ferramenta, SSFire, realiza a verificação de vigas e pilares de aço em temperatura ambiente e em situação de incêndio, além de realizar o dimensionamento dos materiais de proteção contra fogo. Notou-se que sua utilização apresenta uma série de benefícios.

Em grades curriculares que contemplam o estudo de estruturas em situação de incêndio, o SSFire se mostra uma boa ferramenta de apoio, complementando o conhecimento teórico aprendido na disciplina. Quando o estudante ou profissional não teve esse conteúdo em sua graduação, o SSFire, juntamente com outros materiais disponíveis, se mostra uma boa ferramenta para a formação de novos especialistas. E, além disso, se mostra uma ferramenta eficaz no dimensionamento de materiais de proteção contra fogo, auxiliando profissionais da área.

Dessa maneira, observa-se a importância do software desenvolvido para o ensino de estruturas de aço em situação de incêndio, além da importância da elaboração de novas ferramentas que auxiliem estudantes de forma prática e usual.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e à CAPES pelo apoio prestado durante o desenvolvimento desta pesquisa, e também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

REFERÊNCIAS

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, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

JOWSEY, A.; SCOTT, P. An overview of optimising passive fire protection using a limiting temperature by structural assessment. **Journal Of Structural Fire Engineering**, Inglaterra, v. 5, n. 1, p. 25-33, 2014.

MARCELINO, Thayná Couto dos Santos. **Impacto do cálculo da temperatura crítica no dimensionamento de materiais de revestimento contra fogo**. 2023. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2023.

MRÓZ, K.; HAGER, I.; KORNIEJENKO, K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 284-291, 2016.

SEITO, Alexandre Itiu *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto editora. 2008. 496p. ISBN: 978-85-61295-00-4.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. **Segurança das estruturas de aço em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA. 2023.

APPLICATION OF COMPUTATIONAL TOOL IN THE TEACHING OF STEEL STRUCTURES IN FIRE SITUATION

Abstract: *The behavior and design of steel structures at room temperature are already well known and widely disseminated in Brazil. However, the study of these elements in fire situations is more recent and is gaining more attention. At high temperatures, steel presents changes in its properties, losing strength and stiffness, which can lead to structural collapse. Therefore, to ensure the safety, it's necessary that the elements are designed also considering the effects of the fire, however, sometimes this content is not covered in the curricula of civil engineering undergraduate courses. Additionally, in this context, there are also fire protection materials, which due to the lack of precise information about their properties at high temperatures, have their thickness empirically determined and presented by means of thickness table rather than through a proper design. Thus, this work aims to contribute to the dissemination of the subject at hand. Considering the importance of computer programs for teaching and designing structures, a computational tool was developed: the SSFire. The tool was made freely available and enabled its application in teaching of structures in a practical and common way, as well as assisting in the correct design of fire protection materials.*

Keywords: *Computational tool, Steel structures, Fire, Fire protection, SSFire.*

