



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA**

**FERNANDA DE FREITAS ALVES
IGOR ANTÔNIO SILVA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS INTERNOS DE TRELIÇAS PLANAS
COMPOSTAS POR PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

OURO BRANCO – MG

NOVEMBRO DE 2021



Universidade Federal
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

FERNANDA DE FREITAS ALVES
IGOR ANTÔNIO SILVA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS INTERNOS DE TRELIÇAS PLANAS
COMPOSTAS POR PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

Artigo apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^a Dra. Dalilah Pires Maximiano

OURO BRANCO – MG
NOVEMBRO DE 2021

FERNANDA DE FREITAS ALVES
IGOR ANTÔNIO

***AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS INTERNOS DE TRELIÇAS PLANAS
COMPOSTAS POR PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 0 9 / 1 1 / 2 0 2 1

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.^a Dra. Dalilah Pires Maximiano (Orientadora)

Prof.^a Dra. Ana Amélia Oliveira Mazon – UFSJ

Banca Examinadora

Prof. Dr. Lucas Roquete Amparo – UFSJ

Banca Examinadora

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS INTERNOS DE TRELIÇAS PLANAS COMPOSTAS POR PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

RESUMO

A utilização dos perfis formados a frio é evidente nas últimas décadas e motivada pela sua eficiência estrutural em função da relação entre a capacidade resistente e peso, e pela facilidade de fabricação que proporciona uma diversificação de seções transversais. Sua aplicação é abrangente seja em edifícios ou galpões, no entanto, devido à esbeltez dos elementos, os projetos envolvendo esses perfis são governados pelos fenômenos de instabilidade (local, distorcional, global). Em uma situação de incêndio, sabe-se que a temperatura elevada provoca alterações nas características físicas e mecânicas dos materiais. Tais características se deterioram durante a exposição ao fogo e a capacidade resistente e a rigidez dos elementos estruturais se reduzem consideravelmente com o aumento da temperatura. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo a análise de duas treliças submetidas à ação do fogo. Através do programa CSA-ASA/FA define-se o campo de temperaturas dos perfis formados a frio sem proteção térmica. Pelo método simplificado da NBR 14323 é possível obter a temperatura na seção das treliças considerando uma proteção térmica tipo caixa. Uma vez estabelecida a temperatura dos elementos estruturais, é avaliado o comportamento do esforço normal na barra mais solicitada em função do aumento de temperatura (ou do tempo de exposição ao fogo). Os resultados mostraram a importância da utilização de material de proteção térmica na redução da temperatura dos elementos de aço. Além disso, mostraram que a magnitude do esforço normal aumenta com o tempo de exposição ao fogo o que contribui significativamente para a perda de resistência estrutural.

Palavras-chave: Perfil formado a frio, Análise térmica, Situação de incêndio, CS-ASA/FA.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	6
PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	6
ANÁLISE EM INCÊNDIO.....	7
CS-ASA/FA	8
A temperatura do aço segundo a NBR 14323 (2013)	9
EXEMPLOS NUMÉRICOS	10
Treliça 1	10
Treliça 2	12
CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	17

1 INTRODUÇÃO

A popularização dos perfis formados a frio (PFF) é evidente nas últimas décadas. A utilização desse tipo de perfil teve início principalmente em galpões e nos dias de hoje se faz presente também em construções residenciais com o novo método construtivo em ascensão, o Light Steel Frame. A difusão do PFF pode ser justificada pelas vantagens como, por exemplo, o peso. Uma estrutura mais leve gera fundações menos robustas. O transporte também é facilitado, o que reduz a quantidade e complexidade dos equipamentos necessários e pode resultar em um menor custo final, quando comparado aos perfis soldados ou laminados. O tempo de execução é outro ponto positivo pois, por se tratar de uma estrutura pré-moldada, montável e leve, sua execução é mais rápida e prática. A grande variedade de seções transversais garante ao PFF uma boa versatilidade na construção civil. No entanto, associada ao aumento da diversificação de utilização de PFF, vem a necessidade de verificação da segurança em situação de incêndio. Isso devido ao fato de que o comportamento em elevadas temperaturas é diferente daquele à temperatura ambiente. Embora as probabilidades de ocorrência de incêndios sejam pequenas trazem, em geral, consequências catastróficas.

Seguindo essa mesma linha, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dos esforços internos de duas treliças planas, compostas por PFF. Mais especificamente, é utilizado o módulo computacional CS-ASA/FA (*Computational System for Advanced Structural Analysis/Fire Analysis;*) (PIRES et al., 2015, 2018) para obter o campo de temperaturas nas diferentes seções transversais que compõem as barras das treliças através de uma análise térmica em regime transiente. Em seguida, o software Ftool é usado para avaliar o comportamento dos esforços internos normais levando em consideração a elevação de temperatura. Adicionalmente, é considerado um material de revestimento térmico protegendo as treliças considerando o método simplificado para obtenção da temperatura do elemento estrutural apresentado na NBR 14323 (2013). As treliças são revestidas por placas de gesso acartonado, com o objetivo de verificar a influência no comportamento dos esforços internos desses sistemas estruturais.

2 PERFIS FORMADOS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Todos os materiais estruturais de uso comum na construção civil tais como concreto, aço, madeira ou alumínio apresentam profundas alterações em suas propriedades quando sujeitos às altas temperaturas. Uma estrutura de aço, submetida a 600°C, pode chegar a perder cerca de 50% da sua capacidade resistente relativa e atingir o colapso rapidamente (MENDES

et al., 2006). No caso dos PFF, a esbeltez do elemento é um fator que contribui para o rápido aquecimento do elemento estrutural, principalmente quando desprotegidos. Atualmente como alternativas de proteção passiva ao fogo, pode-se envolver os perfis metálicos em material de proteção térmica. A maioria das proteções utilizam argamassas projetadas de baixa densidade apresentado menor custo e maior velocidade de aplicação para atingir o objetivo. No entanto, a aplicação desse material dificulta, ou pode até inviabilizar, a utilização de perfis formados a frio, uma vez que são constituídos por chapas finas (máximo 8 mm de espessura), enquanto o material projetado necessita de espessuras variando de 5 a 20 mm, resultando em um peso próprio final bastante elevado (MENDES *et al.*, 2006). Como alternativa, tem-se as placas de gesso acartonado que se assemelham às placas de gesso convencional, porém possuem fibras de vidro e vermiculita na sua composição, garantindo características específicas para a proteção contra incêndio.

Alguns trabalhos envolvendo a aplicação de revestimento térmico em PFF podem ser destacados: Soares e Rodrigues (2002) apresentaram o dimensionamento de uma viga tipo caixa, composta por dois perfis formados a frio tipo U enrijecido sujeita à flexão simples sem e com revestimento térmico do tipo argamassa de gesso, placas de gesso, argamassa de fibras minerais e fibra mineral projetada. Feng *et al.* (2002) estudaram, experimental e numericamente, o comportamento térmico de painéis compostos por perfis formados a frio tipo U e placas de gesso. Mendes *et al.* (2006) propôs a utilização de placas de gesso para a proteção térmica de treliças de sustentação de piso compostas por perfis formados a frio.

A garantia da estabilidade de um elemento estrutural de aço sob a ação do fogo é verificada por meio do domínio do tempo, da temperatura e da resistência. A NBR 14323 (2013) estabelece os requisitos para o projeto das estruturas de aço e das estruturas mista de aço e concreto em situação de incêndio de edificações cobertas pelas NBR 8800 (2008) e NBR 14762 (2010), conforme os requisitos de resistência ao fogo, prescritos pela NBR 14432 (2000) ou legislação brasileira vigente.

3 ANÁLISE EM INCÊNDIO

A verificação de elementos estruturais em situação de incêndio exige, para os métodos simplificados e para os métodos avançados de cálculo, a determinação da distribuição de temperatura nesses elementos. A análise térmica de um elemento estrutural submetido à situação de incêndio consiste em determinar a variação de temperatura ou o campo de

temperaturas no elemento de interesse, a partir das condições de contorno provenientes do modelo de incêndio adotado. Nos problemas de estruturas em situação de incêndio, a análise térmica envolve, basicamente, duas partes: a determinação do calor transferido por convecção e radiação, proveniente do incêndio, no contorno do elemento de interesse; e, a determinação da transferência de calor por condução no interior dos elementos estruturais (MAXIMIANO, 2018).

Nos modelos simplificados de cálculo, a elevação de temperatura é considerada de forma homogênea para toda a seção transversal e ao longo do comprimento do elemento estrutural de interesse, empregando-se simples equações analíticas no caso do aço. Já nos modelos avançados de cálculo, aplicam-se métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos para obter o campo de temperaturas no elemento estrutural de forma mais realista ao longo do processo de aquecimento.

É importante destacar que a temperatura no elemento estrutural depende da temperatura provocada pelo incêndio, ou seja, da temperatura dos gases presentes em determinada compartimentação. A curva de incêndio adotada no presente trabalho, incêndio-padrão da ISO 834-1 (1999), para a análise térmica é dada pela Eq. (1).

$$T_{gases} = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

em que T_{gases} é a temperatura dos gases em °C, T_0 é a temperatura ambiente inicial, geralmente adotada igual a 20 °C, e t é o tempo de exposição ao fogo em minutos.

3.1 CS-ASA/FA (PIRES et al., 2015, 2018)

No presente trabalho, o módulo computacional CS-ASA/FA (*Computational System for Advanced Structural Analysis/Fire Analysis;*) (PIRES et al., 2015, 2018) é usado para realizar a análise térmica em regime transiente nas diferentes seções transversais que compõem as barras das treliças estudadas. Tal módulo foi desenvolvido com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) (COOK et al., 1989) e faz parte de um amplo sistema computacional denominado CS-ASA (SILVA, 2009). Dentro do CS-ASA, o CS-ASA/FA é capaz de realizar a análise térmica de seções transversais em regime permanente e transiente bem como, a análise termoestrutural de estruturas quando acoplado ao módulo CS-ASA/FSA (*Fire Structural Analysis*, 2020).

Vale destacar que é importante entender adequadamente os mecanismos de

transferência de calor, por convecção, radiação e condução, os quais possibilitam determinar a transferência de energia para um elemento/corpo qualquer. Além disso, para determinação correta da transferência de calor no interior dos elementos estruturais, é necessário considerar a variação das propriedades térmicas dos materiais constituintes em função da temperatura. Admite-se que a distribuição de temperaturas ao longo de cada elemento estrutural é uniforme e igual àquela estimada para a seção transversal. A análise térmica é então realizada exclusivamente no plano da seção transversal através de modelos numéricos de transferência de calor que possibilitam a determinação da distribuição de temperaturas em diferentes pontos da seção. A formulação presente no CS-ASA/FA e maiores detalhes referente ao módulo computacional podem ser consultados em Pires *et al.* (2015, 2018).

3.2 A temperatura do aço segundo a NBR 14323 (2013)

Pelo modelo térmico simplificado apresentado na NBR 14323 (2013), a elevação de temperatura em elementos estruturais de aço, submetidos a uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e situado no interior da edificação é dada pela Eq. (2), considerando a não utilização e a utilização de revestimento contra fogo, respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{a) } \Delta T_{\text{aço,t}} &= k_{\text{sh}} \frac{(u/A)}{c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}}} \phi \Delta t & \text{b) } \Delta T_{\text{aço,t}} &= \frac{\lambda_m (u_m/A)}{t_m c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}}} \frac{(T_{\text{gases,t}} - T_{\text{aço,t}}) \Delta t}{1 + (\xi/4)} - \frac{\Delta T_{\text{gases,t}}}{(4/\xi) + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Mas } \Delta T_{\text{aço,t}} \geq 0 \text{ se } \Delta T_{\text{gases,t}} > 0, \text{ e ainda com: } \xi = \frac{c_m \rho_m}{c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}}} t_m (u_m/A) \quad (3)$$

em que, na Equação (2a), k_{sh} é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que pode ser tomado como igual a 1; $c_{\text{aço}}$ é o calor específico do aço; $\rho_{\text{aço}}$ é a massa específica do aço considerada independente da temperatura igual a 7850 kg/m³; Δt é o intervalo de tempo em segundos, não podendo ser tomado como maior que 5s; u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural, em metros (m); e A é a área bruta da seção transversal do elemento estrutural em aço, em m². A relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal (u/A), para barras prismáticas de comprimento L , define o fator de massividade. Verifica-se claramente que, para elementos estruturais com seção transversal de mesma área, o aumento de temperatura ocorrerá mais rapidamente para aquele que possuir maior superfície exposta ao incêndio. Ainda da Equação (2a), ϕ é o fluxo de calor por unidade de área, expresso em Watts por m² (W/m²). Na Equação (2b), λ_m , t_m , c_m e ρ_m são a condutividade térmica, a espessura, o calor específico e a massa específica do material de revestimento contra fogo,

respectivamente; $T_{aço,t}$ é a temperatura do elemento estrutural em aço, no passo de tempo corrente; $\Delta T_{gases,t}$ é a variação de temperatura dos gases, no passo de tempo corrente; u_m é o perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo em m; a relação u_m/A define o fator de massividade do elemento estrutural protegido; Δt , neste caso, não pode ser adotado maior que 30 s. Assim, para ambos os casos tratados, a temperatura no elemento estrutural em aço, no instante de tempo corrente, é dada da seguinte forma:

$$T_{aço,t} = T_{aço,t-\Delta t} + \Delta T_{aço,t} \quad (4)$$

O procedimento apresentado para a determinação da elevação de temperatura nos elementos estruturais de aço, com e sem proteção térmica, é do tipo incremental simples para quaisquer curvas de incêndio.

4 EXEMPLOS NUMÉRICOS

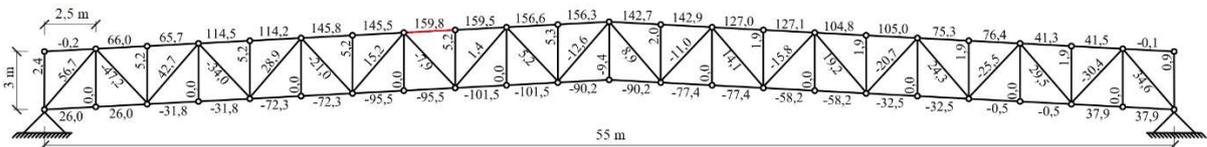
Esta seção tem como objetivo obter o campo de temperaturas nas diferentes seções transversais que compõem as barras de duas treliças considerando as situações: sem proteção térmica e com proteção térmica. A análise sem proteção térmica é realizada em regime transiente usando o módulo computacional CS-ASA/FA. Para a consideração do revestimento térmico, é adotado o método simplificado para obtenção da temperatura do elemento estrutural apresentado na NBR 14323 (2013) descrito pela Eq. (2b). Com o campo de temperaturas estabelecido para as duas situações (sem e com proteção), os esforços normais internos nas barras das treliças são avaliados utilizando o software Ftool.

Como mencionado, duas treliças distintas são analisadas neste trabalho, ambas destinadas à cobertura de edifícios industriais. Para as duas treliças analisadas, é considerada uma carga de 0,27 kN/m que corresponde ao peso próprio e sobrecarga, a carga de vento foi calculada de acordo com a NBR 6123 (2013) e todas as cargas utilizadas no desenvolvimento do trabalho são descritas no APÊNDICE A. Para a determinação da influência da temperatura nos elementos estruturais estudados, foi considerada a exposição ao fogo em todas as faces. Para a análise considerando o revestimento térmico, são empregadas placas de gesso acartonado com 12,5 mm de espessura, que é classificado como revestimento do tipo caixa (aqueles que contornam a estrutura a ser protegida, de modo que o revestimento assuma forma similar a de uma caixa) baseado no estudo de Mendes *et al.* (2006). As propriedades térmicas do material usado são: densidade igual a 800 kg/m³, calor específico igual a 1700 J/kg°C e condutividade térmica igual a 0,20 W/m°C.

4.1 Treliça 1

A primeira treliça analisada compõe o pavilhão Central de Eventos do Ceará (CEC), localizado em Fortaleza (CE). Essa treliça faz parte de um estudo realizado por Pillar (2013). O pavilhão possui 260 m de extensão e sua cobertura é composta por duas águas com inclinação de 3°, apoiadas na treliça 1, com um vão livre de 55 m, conforme ilustrado na Figura 1. Os perfis adotados são formados a frio e possuem seção transversal U enrijecido sendo perfis Ue 300x100x60x6,3 para os banzos e perfis Ue 200x100x50x6,3 para montantes e diagonais. O aço é do tipo ASTM A-572 Grau 50, com tensão de escoamento equivalente a 345 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa em temperatura ambiente. A geometria da Treliça 1 e condições de contorno, com e sem proteção térmica, são ilustradas na Figura 2.

Figura 1 - Treliça 1: geometria e esforços normais a temperatura ambiente



Fonte: Autoria própria

Figura 2 - Treliça 1: seção transversal e condições de contorno.



a) Sem proteção térmica

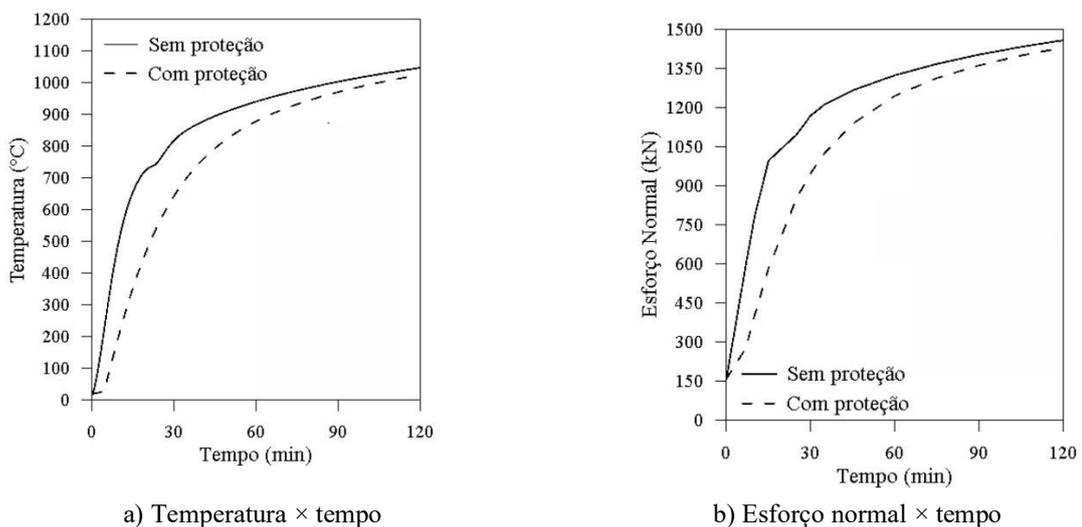
b) Com proteção térmica

Fonte: Autoria própria

Nos gráficos da Figura 3 são mostradas as curvas temperatura *versus* tempo considerando os perfis componentes da treliça desprotegidos e considerando a treliça com a proteção térmica tipo caixa e as curvas do comportamento do esforço normal na barra mais solicitada da treliça em função do tempo de exposição ao fogo também considerando as situações de com e sem proteção térmica (Figura 3b).

Mesmo considerando os perfis de forma isolada na análise térmica sem proteção térmica, pode-se observar no gráfico da Figura 3a uma diferença significativa em relação a curva com proteção térmica. É possível perceber que a proteção térmica promove uma redução considerável na temperatura da seção transversal da treliça se mostrando uma alternativa eficiente na análise em situação de incêndio. Com relação ao comportamento do esforço normal na barra mais solicitada, observa-se pelo gráfico da Figura 3b que a magnitude desse esforço aumenta com o tempo de exposição ao fogo, ou seja, forças internas devido à temperatura estão surgindo na estrutura em função de restrições à dilatação o que contribui significativamente para a perda de resistência estrutural.

Figura 3 - Análise térmica e comportamento do esforço normal: Treliça 1

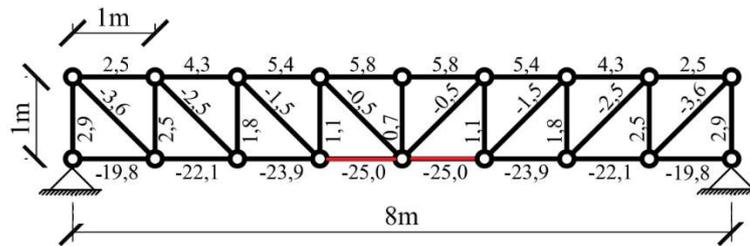


Fonte: autoria própria

4.2 Treliça 2

O segundo exemplo numérico analisado é uma treliça de 8 m de comprimento, sem inclinação, apresentada na Figura 4. Esse sistema estrutural também foi estudado por Mendes *et al.* (2006). A treliça 2 é composta por 3 perfis de seções transversais distintas, sendo 2L 63x63x3,18 para os tirantes diagonais, 2L 51x51x2,65 para os tirantes montantes e U 150x50x3,8 para os banzos. A geometria da Treliça 2 e condições de contorno, com e sem proteção térmica, são ilustradas na Figura 5.

Figura 4 - Treliça 2: geometria e esforços normais em temperatura ambiente



Fonte: autoria própria

Figura 5 - Treliça 2: seção transversal e condições de contorno.



a) Sem proteção térmica

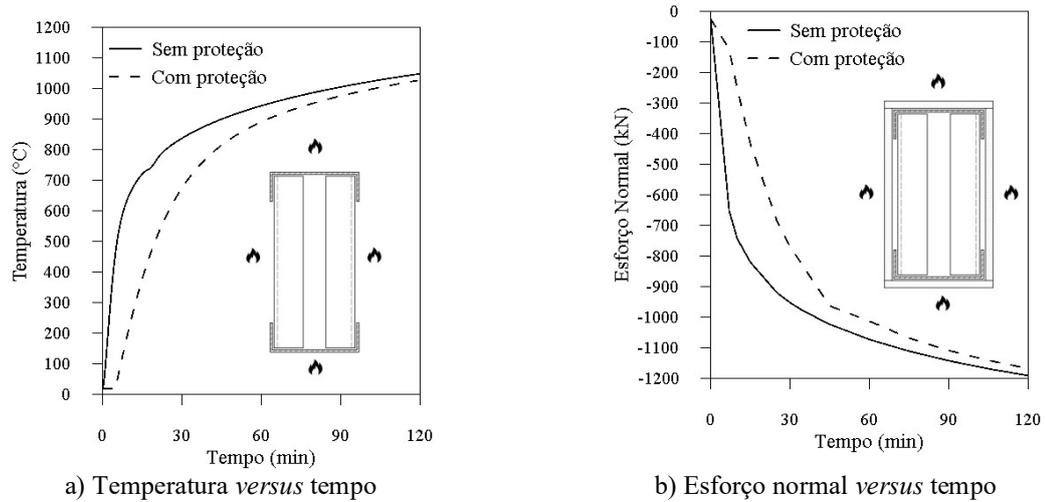
b) Com proteção térmica

Fonte: Autoria própria

Na Figura 6a é apresentada a análise térmica para os perfis formados a frio que constituem a treliça. Assim como no exemplo anterior, as curvas temperatura *versus* tempo são mostradas considerando os perfis desprotegidos e considerando a treliça com a proteção térmica tipo caixa. Já na Figura 6b, o comportamento do esforço normal na barra mais solicitada, em função do tempo de exposição ao fogo, pode ser observado.

De acordo com a Figura 6a, a diferença significativa entre as curvas temperatura *versus* tempo para as situações sem e com proteção térmica também é observada neste exemplo. O que reforça a importância de se adotar um material de revestimento térmico para estruturas em aço. Na Figura 6b, é possível observar mais uma vez o surgimento de forças internas em função da temperatura o que promove um aumento no esforço normal das barras destacadas.

Figura 6 - Análise térmica e comportamento do esforço normal: Treliça 2



Fonte: autoria própria

5 CONCLUSÃO

No desenvolvimento do presente trabalho realizou-se a análise de duas treliças submetidas à ação do fogo. Através do programa CSA-ASA/FA (PIRES et al., 2015, 2018) definiu-se o campo de temperaturas dos perfis formados a frio sem proteção térmica. Pelo método simplificado da NBR 14323 (2013) foi possível obter a temperatura na seção das treliças considerando uma proteção térmica tipo caixa. Uma vez estabelecida a temperatura dos elementos estruturais, avaliou-se o comportamento do esforço normal na barra mais solicitada em função do aumento de temperatura (ou do tempo de exposição ao fogo). Diante dos resultados alcançados, pode-se concluir primeiramente que a utilização de proteção térmica na estrutura é eficaz e importante pois reduz, de forma considerável, a temperatura dos elementos estruturais em aço. Além disso, conclui-se também que forças internas adicionais devido à temperatura surgiram nas duas treliças em função de restrições à dilatação. Essa é uma conclusão importante pois reforça a atenção que se deve ter na análise em situação de incêndio já que solicitações adicionais não previstas em projetos a temperatura ambiente podem comprometer significativamente a resistência do sistema estrutural.

As pesquisas desenvolvidas ao longo do presente Trabalho de Conclusão de Curso proporcionaram a publicação no evento científico: XLII CILAMCE-2021 | 3rd PANACM 2021.

FREITAS, F., RODRIGUES, I., PIRES, D., BARROS, R.C., SILVEIRA, R.A.M., 2021. Evaluation of Internal Forces in Cold-Formed Steel Truss exposed to Fire. XLII IberoLatin-American Congress on Computational Methods in Engineering | 3rd Pan American Congress on Computational Mechanics, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, R.C. *Avaliação numérica do comportamento não linear e resistência de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, 2021.

COOK, R., MALKUS, D., PLESHA, M.. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. New York: John Willey & Sons, 3rd ed., 1989.

FENG, M., WANG, Y. C., DAVIES, J. M.. *Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire*. *Fire Safety Journal*, v. 38, p. 365-394, 2002.

ISO 834-1. *Fire resistance tests – Elements of buildings construction, Part 1: General requirements*. ISO – International Organization for Standardization, Geneva, 1999.

MAXIMIANO, D. P. *Análise Numérica Avançada de Estruturas de Aço e de Concreto Armado em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2018.

NBR-14432, 2000. *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

NBR-14323, 2013. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

NBR-14762, 2010. *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

NBR-6123, 2013. *Forças devidas ao vento em edificações*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

NBR-8800, 2008. *Projeto de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

MENDES, C. L., MUNAIAR NETO, J., MALITE, M.. *Revestimentos térmicos em perfis de aço formados a frio no contexto do projeto estrutural em situação de incêndio*. *Revista Minerva*, vol. 3, pp. 69-81, 2006.

PILLAR, R.V. (2013). *Estudo de Viabilidade de Cobertura Metálica com Alternativas em Perfis Formados a Frio, Laminados Abertos ou Tubulares*. Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2013.

PIRES, D., BARROS, R.C., LEMES, I.J.M., SILVEIRA, R.A.M., ROCHA, P.A.S.. *Análise térmica de seções transversais via método dos elementos finitos*. XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

PIRES, D., BARROS, R.C., SILVEIRA, R.A.M., LEMES, I.J.M., ROCHA, P.A.S.. *An efficient inelastic approach using SCM/RPHM coupling to study reinforced concrete beams, columns and frames under fire conditions*. Engineering Structures, vol. 219, pp. 1-25, 2020.

PIRES, D., BARROS, R.C., SILVEIRA, R.A.M., ROCHA, P.A.S.. *Behavior of steel-concrete composite cross sections exposed to fire*. Revista Escola de Minas, vol. 71(2), pp. 149-157, 2018.

SILVA, A.R.D. *Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, 2009.

SOARES, C. H., RODRIGUES, F. C. *Dimensionamento de perfis de aço formados a frio em situação de incêndio*. Congresso Internacional de Construção Metálica, São Paulo, Brasil, 2002.

APÊNDICE A

1 MEMORIAL DE CÁLCULOS

1.1 Sem Revestimento Térmico

Para iniciar o processo de análises, o primeiro passo a se tomar é a modelagem da seção transversal desejada. O software utilizado para esta etapa foi o autocad, para ser pós-processado no GiD, onde foi definido o material e suas propriedades, além da geometria da malha e condição de contorno a que as peças seriam submetidas.

Feito isso, a matriz de entrada está pronta para a análise no CS-ASA (FSA), onde foi selecionado o procedimento de solução, no caso, o incremental simples, que utiliza a Eq. (2a). Nesta etapa, obtém-se a variação da temperatura em relação ao tempo.

1.1.1 Cálculo das cargas atuantes

Para a avaliação dos esforços internos das treliças, além dos resultados obtidos na etapa anterior, foi necessário calcular os carregamentos a serem aplicados nas treliças.

1.1.1.1 Cargas Permanentes

As cargas permanentes foram definidas com base no trabalho de Pillar (2013) e são expostos a seguir:

- Peso próprio da estrutura: Calculado pelo programa;
- Forro de gesso: O forro de gesso adotado é Gyptone Base 31, cujo peso específico é de $0,09 \text{ kN/m}^2$. Foi considerado $0,15 \text{ kN/m}^2$ a fim de prever demais peças de instalação;
- “Joists”: $2,9 \text{ kN/m}^2$;
- Telha: A telha adotada é a telha zipada LR-ZIP 53, com peso específico de $0,09 \text{ kN/m}^2$. Adotou-se $0,1 \text{ kN/m}^2$, para considerar peças de fixação.

1.1.1.2 Cargas variáveis

As cargas variáveis atuantes são:

- Sobrecarga: Como as cargas de instalações foram previstas nos itens anteriores, foi adotada a sobrecarga mínima prevista por norma, de $0,20 \text{ kN/m}^2$.
- Vento: Calculada a seguir.

(a) Cálculo da ação do vento

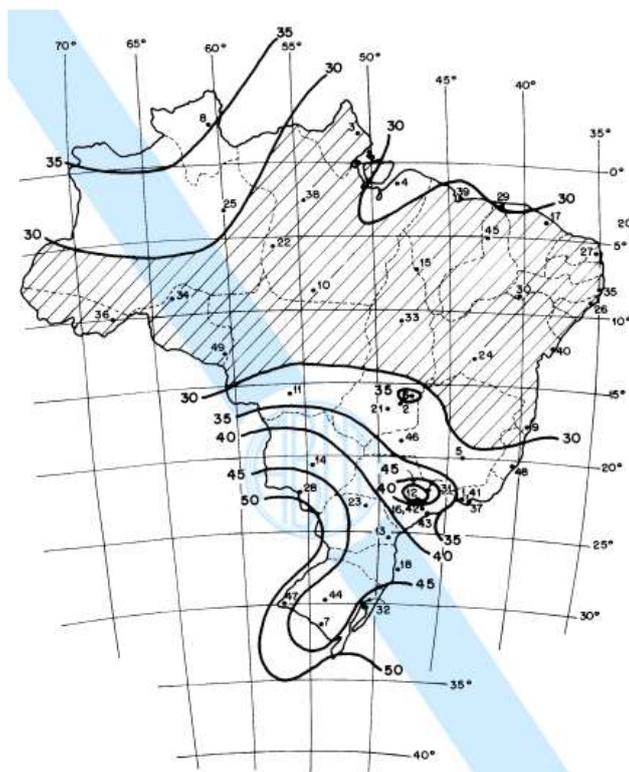
Para cálculo da ação do vento, utilizou-se o software Vento 2.14, bem como a NBR 6123, considerando a incidência à 90° nas fachadas laterais.

(i) Velocidade básica do vento, V_0

Para obtenção da velocidade básica de vento, definida como a máxima velocidade média medida sobre 3 s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m do nível do terreno em lugar aberto e plano, utilizou-se a Figura 7, da NBR 6123¹.

Para Fortaleza - CE, adotou-se, portanto, uma velocidade básica de 30 m/s.

Figura 7. Isopletas da velocidade básica de vento, em m/s,



Fonte: NBR 6123, 2013.

(ii) Fator topográfico, S_1

Para obtenção do fator topográfico, considerando as variações do relevo do terreno, adotou-se a configuração de terreno plano ou fracamente acidentado, o que gera um fator de $S_1 = 1,0$.

(iii) **Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator S_2**

- A rugosidade do terreno foi resignada como Categoria II (terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas);
- As dimensões da edificação foram resignadas como Classe C (Toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície exceda 50m);
- Altura acima do nível do terreno: $z=20m$.

Portanto, $S_2 = 0,96$.

(iv) Fator estatístico, S_3

O fator estatístico considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, baseado na probabilidade que a velocidade básica seja igualada ou excedida num período de 50 anos. Para o projeto foi adotado o grupo 2 (edificações para hotéis e residências, edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação) sendo $S_3 = 1,00$. Velocidade característica de vento, V_k .

A velocidade característica de vento se dá pela Equação (5).

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (5)$$

Assim, obtém-se $V_k = 28,8 m/s$.

(v) Coeficiente de pressão interna, C_{pi}

Para edificações efetivamente estanques e com janelas fixas que tenham uma probabilidade desprezável de serem rompidas por acidente, o coeficiente de pressão interna deve ser considerado o valor mais nocivo entre 0 e -0,2.

(vi) Coeficiente de atrito, C_f

O coeficiente de atrito corresponde à existência de uma força de atrito, entre vento e superfície, caracterizada pelo formato das fachadas e da cobertura e telhado. Para paredes de alvenaria, dada a inexistência de nervuras, $C_f = 0,1$.

1.1.2 Análise dos esforços internos

No software Ftool, foi feita a modelagem da treliça a ser analisada, bem como definido seu material, propriedades e cargas atuantes. A partir dos diagramas gerados pelo programa, foram produzidos os gráficos de esforço normal versus tempo.

1.2 Com revestimento térmico

Como citado anteriormente, o CS-ASA ainda não permite realizar análises para a situação onde existe proteção passiva do tipo caixa, por isso, esta etapa foi feita por meio de uma planilha no Excel, contendo a Eq. (2b).

A partir disso, fez-se necessário conhecer o fator de massividade de cada treliça. A NBR14323:2013 descreve o cálculo do fator de massividade para o caso onde existe a aplicação do revestimento térmico do tipo caixa, dado pela seguinte forma:

$$\text{Fator de massividade} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção da peça de aço}} \quad (6)$$

As análises das treliças com revestimento térmico foram realizadas considerando a seção transversal da treliça como uma peça única, como representado nas figuras (2b) e (4b). Portanto, para este cálculo, o valor de b foi definido como a largura da seção transversal, d como a altura e a área se resulta na soma das áreas das seções transversais de cada treliça.

De posse dos dados necessários, com a planilha, foi encontrada a variação da temperatura da treliça em relação ao tempo.

Para a obtenção da variação do esforço normal versus tempo, os procedimentos adotados foram idênticos ao caso sem revestimento térmico.