

Tema: Construções leves estruturadas em aço

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E ESTRUTURAL DE UM PAINEL STEEL-FRAME
FORMADO A FRIO EM CONDIÇÃO DE INCÊNDIO**

Felipe Frizon¹

Diego Rizzotto Rossetto²

Paulo. A. G. Piloto³

Resumo

O sistema construtivo Light Steel Frame (LSF) é composto por estruturas fabricadas em perfis formados a frio de aço leve e galvanizado. Com a união desses perfis são montados quadros estruturais e não estruturais, como vigas de pisos e paredes, lajes, tesouras, entre outros componentes. Sobre a estrutura metálica é aplicado um revestimento por placas cimentícias, *drywall*, *smartsid* ou *siding vinílico*. Essas placas podem conter camadas de revestimento acústico, térmico e com resistência ao fogo. Por possuir uma estrutura de sustentação metálica, as construções LSF sofrem grande influência em situação de incêndio, uma vez que as altas temperaturas modificam as propriedades físicas e mecânicas do aço. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de um painel estrutural do tipo Steel Frame, revestido com placas de gesso, em uma situação de incêndio, analisando a influência do aumento da temperatura nas propriedades mecânicas dos perfis estruturais que o constituem. Para o cumprimento desse objetivo, foram realizadas análises numéricas com auxílio do software comercial ANSYS, onde avaliou-se os modos de instabilidade, a capacidade portante e a influência da ação térmica no quadro. Com o resultado das análises foi possível obter a resistência ao fogo da estrutura.

Palavras-chave: Estruturas LSF; Incêndio; Elementos Finitos.

**THERMAL AND STRUCTURAL BEHAVIOR OF COLD-FORMED STEEL FRAME UNDER FIRE
CONDITION**

Abstract

The Light Steel Frame building system is composed of structures manufactured in cold-formed profiles of light and galvanized steel. With the union of these profiles structural and non-structural frames are assembled, such as floor and wall beams, slabs, among other components. Over the metallic structure, a coating is applied by cement boards, drywall, smartsid, or vinyl siding. These plates can contain acoustic, thermal and fire-resistant coating layers. Because it has a metal support structure, LSF buildings receive great influence in fire situations, since high temperatures modify the physical and mechanical properties of steel. The present paper aimed to evaluate the behavior of a structural panel of the steel frame type, covered with gypsum plasterboards, in a fire condition, analyzing the influence of temperature increase on the mechanical properties of the structural profiles that constitute it. To achieve this objective, numerical analyses were performed with the commercial software ANSYS, where the instability modes, the loadbearing capacity and the influence of the thermal action



on the frame were evaluated. With the result of the analyses, it was possible to obtain the fire resistance of the structure.

Keywords: LSF structures; Fire; Finite Elements Method.

¹ Engenharia mecânica, acadêmico, departamento de engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil.

¹ Engenharia mecânica, Doutor, professor, departamento de engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil.

³ Engenharia mecânica, Doutor, professor, departamento de mecânica aplicada, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.

1 INTRODUÇÃO

Repensando as construções civis de uma forma otimizada, a Construção Energética Sustentável (CES) aparece como uma alternativa ao elevado gasto de materiais dos métodos convencionais. Um dos principais métodos da CES são as construções do tipo Steel Frame. Esse sistema construtivo é constituído por perfis leves em aço galvanizado, que formam quadros estruturais que posteriormente recebem painéis de fechamento. Os principais benefícios apresentados por esse sistema são a rapidez de execução da obra e a redução de desperdícios, que ocasionam a diminuição de custos. [1]

Um dos principais agentes destrutivos de estruturas civis é o fogo. Um incêndio quando não controlado pode representar o colapso catastrófico de uma construção. No entanto, mesmo quando controlado, um incêndio pode danificar irreparavelmente os elementos estruturais submetidos a alta temperatura, condenando a utilização do ambiente. Quando comparado com a alvenaria, o aço apresenta desvantagem em uma situação de incêndio, uma vez que esse material possui elevada condutividade térmica, que ocasionalmente afeta suas propriedades resistentes com o aumento da temperatura. O aço imerso em um ambiente de temperatura homogênea de 550 °C, sob influência da carga total, irá perder sua margem de segurança definida no projeto, iniciando um processo de flambagem localizada na estrutura. Além disso, a diferença de temperatura entre as mesas do perfil estrutural, gera uma flexão do montante em relação ao eixo de maior inércia e ao deslocamento do centro de rigidez em direção à mesa mais fria, uma vez que o módulo de elasticidade, nessa região, sofre menor redução [2].

O comportamento dos perfis formados a frio, principalmente em altas temperaturas, apresenta elevado grau de não linearidade geométrica e do material. Dessa forma, uma análise analítica do comportamento térmico e estrutural tornam-se onerosas e inviáveis, necessitando que sua rigorosa determinação seja feita com o auxílio de normas técnicas ou ferramentas numéricas computacionais, como é o caso dos métodos dos elementos finitos. Esse método é pautado na discretização de um sistema contínuo e um número finito de elementos com geometria simples, que possibilitam avaliar o comportamento global da estrutura através do comportamento de cada um de seus elementos. [3]

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de um painel estrutural do tipo steel frame em uma situação de incêndio, analisando a influência do aumento da temperatura nas propriedades mecânicas dos perfis estruturais. Para isso será analisada a encurvadura elástica para determinação da carga crítica e dos modos de instabilidade, a capacidade portante da estrutura, o gradiente térmico para uma hora de exposição ao fogo, e por último será determinada a resistência ao fogo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ANÁLISES NUMÉRICAS

O modelo analisado consiste em um quadro estrutural formado por dois perfis U93x43x1.5 horizontais, fixando três montantes verticais em perfis UE90x43x15x1.5. Nos montantes são fixadas placas de gesso de 12.5 mm de espessura, 975 mm de largura e 1000 mm de altura, conforme demonstra a Figura 1.

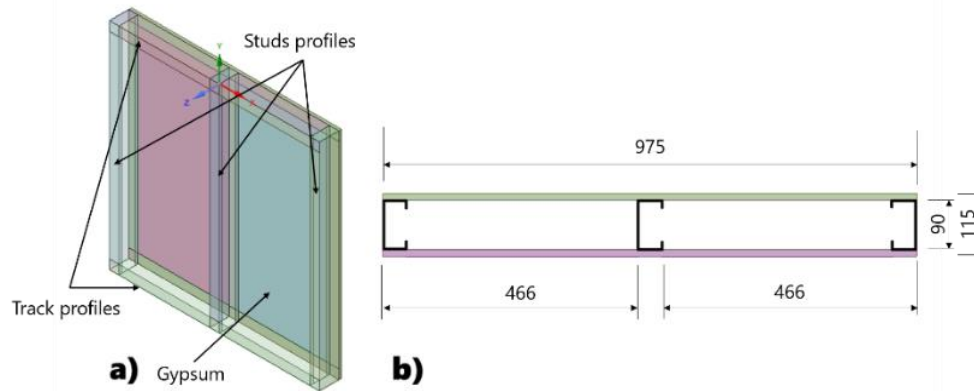


Figura 1 – Representação da estrutura analisada

Para o desenvolvimento das análises, foi criado um modelo de elementos finitos conforme a Figura 2. Onde os perfis formados a frio foram modelados por elementos de placas retangulares, discretizados com altura e largura iguais a 5 mm. As placas de gesso foram divididas em elementos sólidos de arestas 15 mm, pois para análise transiente térmica não é necessária uma discretização muito refinada [4].

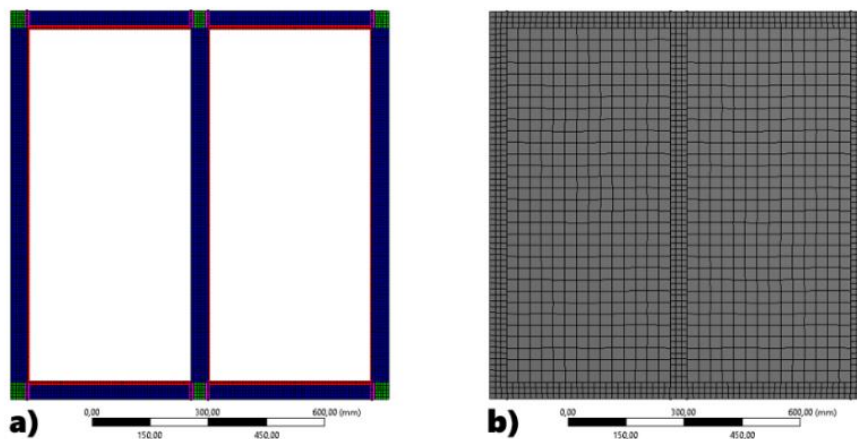


Figura 2a: Estrutura interna e elementos de placa, Figura 2b: Placas de gesso e elementos sólidos

As junções entre os perfis U e os montantes UE foram consideradas como perfeitamente rígidas e com elementos com o dobro da espessura, conforme as regiões em verde na Figura 2a. Para representar a junção entre as placas de gesso e os perfis foi utilizada uma condição de contato *bonded*.

Após a definição do modelo geométrico foi aplicado como material para os perfis o aço EN10326 S280GD formado a frio, suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas em temperatura ambiente são apresentadas na Tabela 1. As propriedades das placas de gesso em temperatura ambiente não foram configuradas pois somente as análises de instabilidade e capacidade portante foram realizadas nessa condição, uma vez que as placas não apresentam função estrutural. [5]

Tabela 1 - Propriedades físicas, mecânicas e térmicas para o aço S280GD Cold Rolled – EN10326 (2004)

| Propriedades S280GD formado a frio em temperatura ambiente | |
|--|---------|
| Limite de resistência [MPa] | 360 |
| Limite de escoamento [MPa] | 280 |
| Módulo de elasticidade [GPa] | 210 |
| Módulo de cisalhamento [GPa] | 81 |
| Coefficiente de Poisson | 0.29 |
| Alongamento (80 mm) [%] | 18 |
| Densidade [kg/m ³] | 7800 |
| Calor específico [J/kgK] | 465 |
| Condutividade térmica [W/mK] | 59 |
| Coefficiente de expansão térmica [1/K] | 1.04E-5 |

2.1.1 Carga crítica e modos de instabilidade

A primeira análise realizada consiste em uma verificação da carga crítica da estrutura e seu respectivo modo de instabilidade. Para isso foi aplicado uma restrição fixa na base do quadro, e aplicadas três cargas unitárias de 1N no perfil U superior, sendo divididas nas posições médias entre os montantes e na extremidade superior do montante intermediário. Para representar uma distribuição da carga, a espessura da alma do perfil U superior foi considerada como 20 vezes a espessura real, evitando assim uma deformação localizada. As espessuras dos perfis são representadas na Figura 3a, onde as regiões em azul possui 1.5 mm, regiões em verde 3.0 mm e a região em vermelho 30 mm.

Model
04/07/2022 17:13

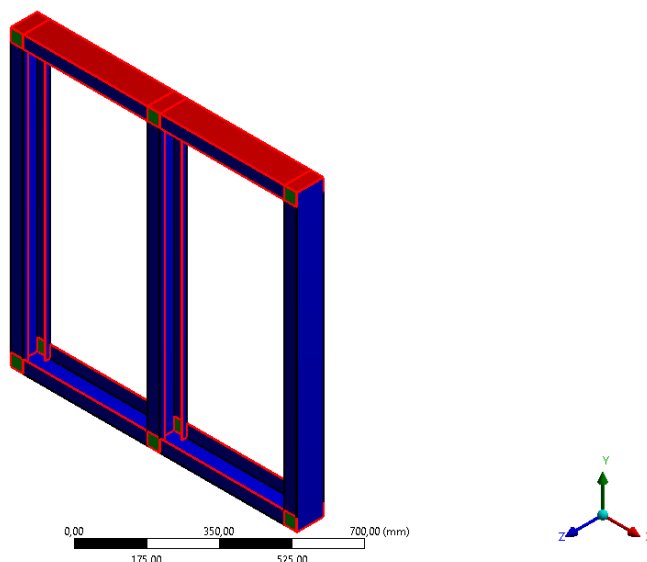


Figure 3: Estrutura submetida a análise 1

2.1.2 Capacidade portante

Com o modo de instabilidade obtido através da análise 1, foi realizada uma análise não linear quanto a geometria e material, possuindo imperfeição geométrica inicial. As deformações

iniciais aplicadas a geometria da análise 2 foram obtidas importando a malha de elementos finitos deformada na análise 1, com a aplicação de um fator multiplicativo dos deslocamentos. Esse fator foi obtido pela equação 1, que relaciona comprimento que pode ser deslocado na alma do perfil (w) pelo deslocamento máximo gerado no modo de instabilidade ($u_x \max$) [6].

$$factor = \frac{w}{u_x \max} \quad (1)$$

Para determinação da capacidade portante, foi considerado apenas os perfis estruturais, sem as placas de gesso. O material dos perfis foi modelado como elástico perfeitamente plástico conforme a Figura 4.

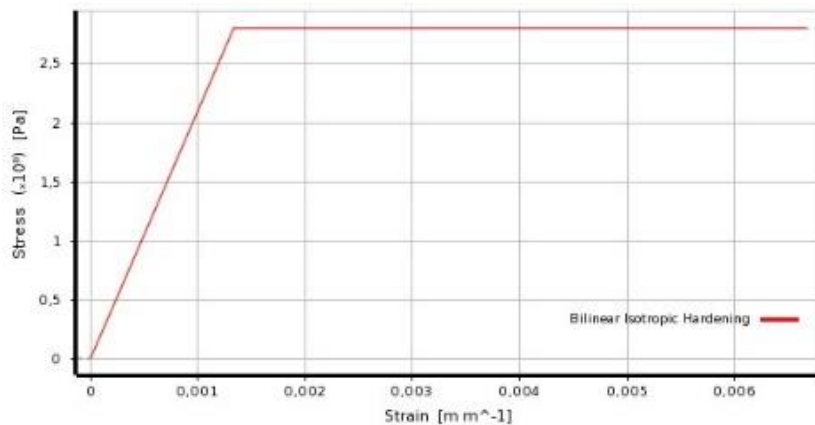


Figura 4. Modelo elástico perfeitamente plástico do material

Com a definição do material e do modelo geométrico, foram aplicadas três cargas nodais na alma do perfil superior e uma condição de restrição lateral ao quadro, representando os fixadores das placas de gesso. Por fim foi desenvolvida uma análise não-linear pelo *Arc Length Method*. Esse método de solução numérica é muito eficiente para sistemas de equações não lineares com pontos críticos em sua curva, pois modela comportamentos *Snap-Through* e *Snap-Back*. O primeiro caso ocorre quando há uma diminuição da força aplicada com um aumento do deslocamento, o segundo caso é quando a força e o deslocamento diminuem para em seguida ter um aumento de ambos. O critério de convergência foi utilizado com base no deslocamento, com um valor calculado pelo solver, uma tolerância de 5% e um valor de referência igual 0 mm.

2.1.3 Análise transiente térmica

Após realizar as análises de instabilidade e capacidade portante para temperatura ambiente, foi desenvolvida uma análise térmica transiente. O modelo de elementos finitos utilizado consiste em uma estrutura steel frame em elementos de placa retangulares, com placas de gesso modeladas em elementos sólidos, fixadas por contato. As propriedades térmicas, em função da temperatura, de calor específico, condutividade térmica e alongamento para o aço utilizado são apresentadas na Figura 5a, 5b e 5c respectivamente, com base no EN1991-1-2. [7].

Para realizar esta análise foi necessário configurar as propriedades térmicas das placas de gesso em função da temperatura. Esses dados são apresentados na Tabela 2 e foram obtidos com base em estudos de Alves e Batista (2007) [4] a partir de dados de Feng et al (2003) [8].

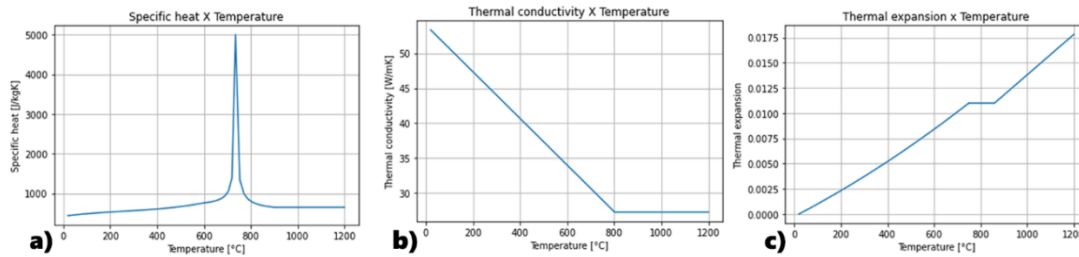


Figura 5a. Calor específico, Figura 5b. Condutividade Térmica, Figura 5c. Alongamento

Tabela 2. Propriedades térmicas do gesso Alves e Batista [4] apud Feng et al [8]

| Densidade [kg/m ³] | Temperatura [°C] | Condutividade térmica [W/m°C] | Calor específico [JKg °C] |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 727 | 10 | 0.2 | 925.04 |
| | 95 | 0.21092 | 941.54 |
| | 125 | 0.21478 | 24572.32 |
| | 155 | 0.103 | 953.14 |
| | 900 | 0.25734 | 1097.5 |
| | 1200 | 0.3195 | 1097.5 |

As cavidades foram consideradas com isolamento térmico, desprezando os efeitos de transferência por elas. Essa simplificação admite que a transferência será realizada apenas pela condução entre os perfis. Como condição de contorno foram aplicadas três formas de transferência de calor, sendo elas: condução, convecção e radiação.

O mecanismo de transferência por condução ocorre tanto em um meio sólido quanto em um meio líquido em estado estacionário. Esse comportamento se dá devido a propagação de energia entre partículas mais energéticas para partículas menos energéticas, onde o fluxo de energia segue de partículas com temperaturas mais altas que se chocam e agitam as moléculas de um corpo com temperatura mais baixa. A condução no modelo analisado é realizada entre as faces por meio da estrutura interna, essa que tem suas propriedades térmicas em função da temperatura conforme demonstrado na Figura 5. [9]

O processo de convecção é dado pela transferência de energia térmica devido o deslocamento de fluido. Esse processo abrange o mecanismo de transferência de energia por difusão no movimento molecular aleatório, e também pelo mecanismo de movimento global macroscópico do fluido. Dessa forma, esse comportamento físico é criado pela diferença de temperatura dos gases na região entre a placa de gesso e a fonte de calor, como também nas cavidades entre as placas, quando não há isolamento. Para definir o fluxo de calor gerado por esse mecanismo de transferência na face exposta ao incêndio, foi adotado um coeficiente de transferência de calor na convecção igual a 25 W/m²K, enquanto na face não exposta foi adotado como 9 W/m²K, para assim incluir os efeitos de radiação. [9]

A radiação ocorre através da energia térmica emitida ou absorvida pela matéria de um corpo que apresenta temperatura diferente de zero, independente da forma da matéria. Essa emissão se dá através de ondas eletromagnéticas (fótons), não necessitando de um meio material para se propagar. No modelo analisado observam-se radiações da fonte emissora (incêndio) e da superfície da placa de gesso, nas cavidades, todas as superfícies irradiam calor, no entanto como há a presença de um isolamento, esses efeitos são desprezíveis. Na face não exposta ao incêndio há radiação apenas da superfície da placa de gesso ao meio externo que se encontra à temperatura ambiente e não emite calor. A emissividade da radiação gerada pelas chamas foi adotada igual 1 na face exposta. Na face não exposta, os efeitos de radiação foram considerados no coeficiente de transferência devido a convecção. [9]

O modelo analisado é representado na Figura 6a, enquanto a temperatura aplicada na face exposta ao incêndio é representada pela curva da Figura 6b, seguindo o modelo definido pela ISO834 [10].

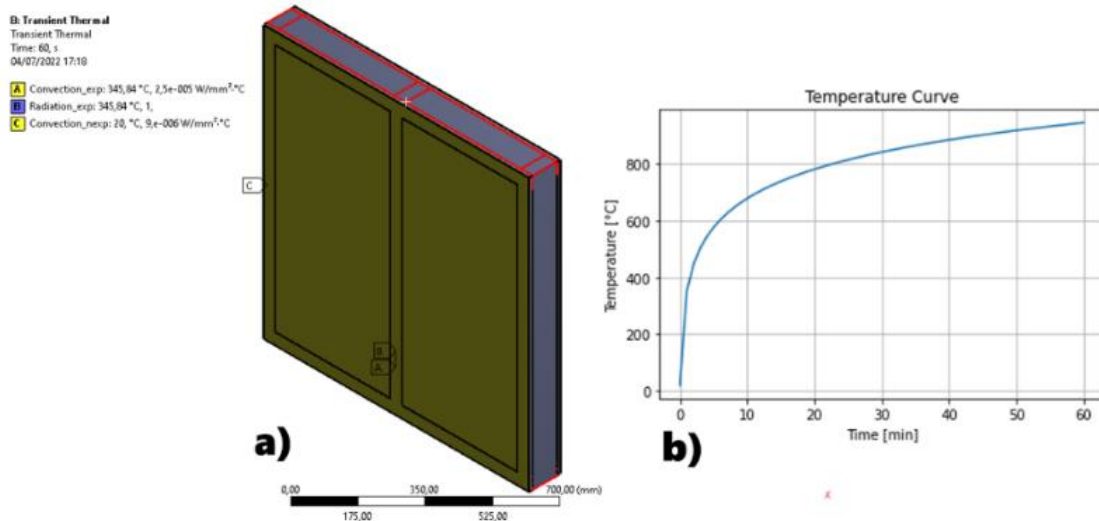


Figura 6a. Condições de contorno aplicadas ao modelo da análise 3. Figura 6b. Curva da temperatura

Com a condições de contorno aplicadas foi realizada uma análise transiente térmica não linear incremental no tempo, com uma divisão em 60s e divisão mínima em 1s. Para o critério de convergência foi utilizado uma condição de fluxo térmico com uma tolerância de 0.1% e um valor mínimo de referência igual a 1E-06 [6].

2.1.4 Resistencia ao fogo

Com o histórico do gradiente de temperatura foi realizada uma análise não linear quanto ao material e geometria, aplicando diferentes porcentagens de carga em 40,50,60,70 e 80% conforme desenvolvido por Piloto [6]. Essa porcentagem da carga é referente a capacidade portante máxima para temperatura ambiente obtida com a análise 2.

As condições de restrição para essa análise foram as mesmas da análise 2, com uma fixação na base e uma fixação lateral no ponto dos prendedores, no entanto foi aplicado o histórico do gradiente de temperatura obtido na análise 3. Além disso foram removidas as placas de gesso, pois não apresentam função estrutural para análise da capacidade portante. Para a solução foi

utilizado o método de *Newton-Raphson*, pois segundo Alves Filho [3] esse é um dos métodos mais eficientes para a solução numérica de problemas do tipo $f(x) = 0$. Os parâmetros da solução foram definidos com uma divisão de tempo em 60 s e divisão mínima de 1s. O critério de convergência foi utilizado com base no deslocamento, com um valor calculado pelo solver, uma tolerância de 5% e um valor de referência igual 0 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Carga crítica e modos de instabilidade

Como a análise de instabilidade realizada representa uma flambagem linear, foi utilizado o método de Lanczos para obtenção do primeiro modo de instabilidade, esse que é representado na Figura 7.

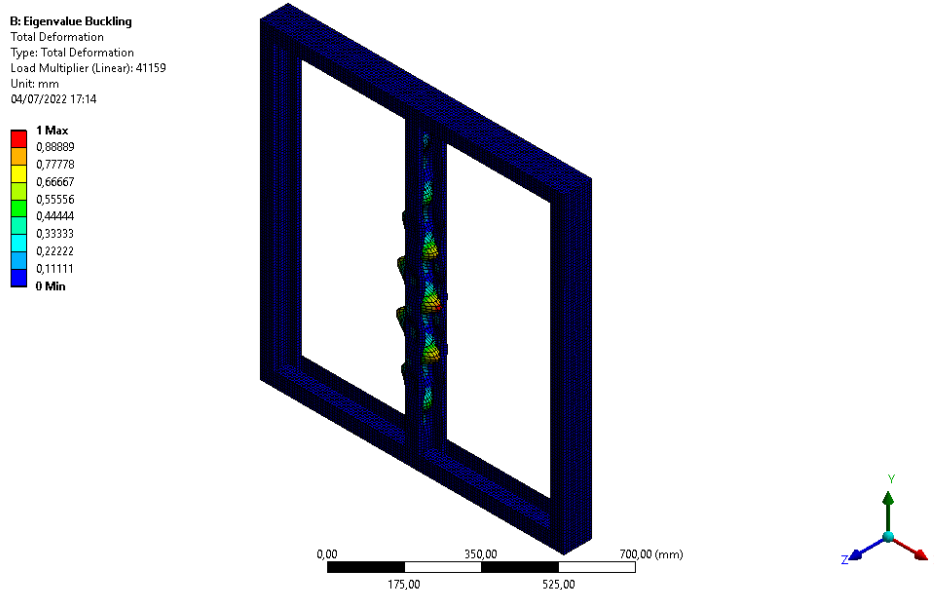


Figure 7: Modo de instabilidade atuante na estrutura

A instabilidade verificada é do tipo localizada, atuando na alma do montante intermediário. Esse modo de instabilidade apresenta deformações nas paredes do perfil mantendo seu eixo reto, sendo causada principalmente pela alta esbelteza das paredes do perfil formado a frio.

3.2 Capacidade portante

Com a análise estrutural não-linear em temperatura ambiente, foi obtida uma capacidade portante máxima de 32.570 N. A Figura 8 representa a tensão equivalente de Von Mises obtida com a análise 2.

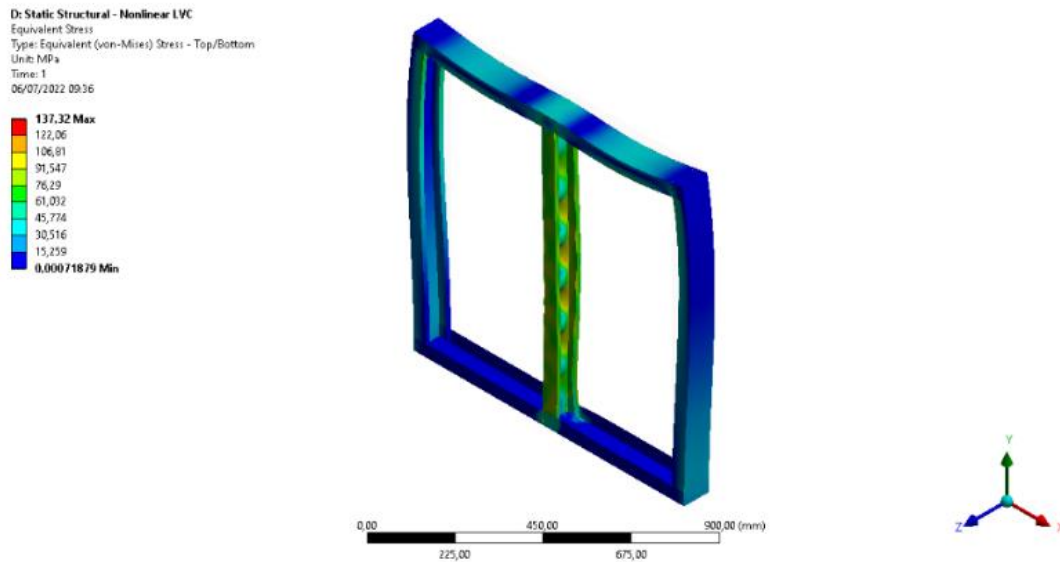


Figure 8. Condição deformada e tensões de Von-Mises obtidas pela análise 2

Analisando a Figura 8 é possível observar que a condição deformada está coerente com o modo de instabilidade obtido na análise 1, apresentando a instabilidade localizada na alma do montante intermediário.

3.3 Análise transiente térmica

Com a análise transiente térmica foi possível obter os tempos para as temperaturas médias e máximas, essas que são definidas pela Equação 2. [11]

$$\begin{aligned} T_{max} &= \bar{T}_0 + 180 \\ T_{ave} &= \bar{T}_0 + 140 \end{aligned} \quad (2)$$

Os tempos para atingir a temperatura máxima e media no lado não exposto foi de aproximadamente 35 minutos e 33 minutos respectivamente.

3.4 Resistencia ao fogo

A análise estrutural para verificação da resistência ao fogo foi realizada com o histórico de temperatura. A Figura 9 demonstra a condição deformada da estrutura para essa análise.

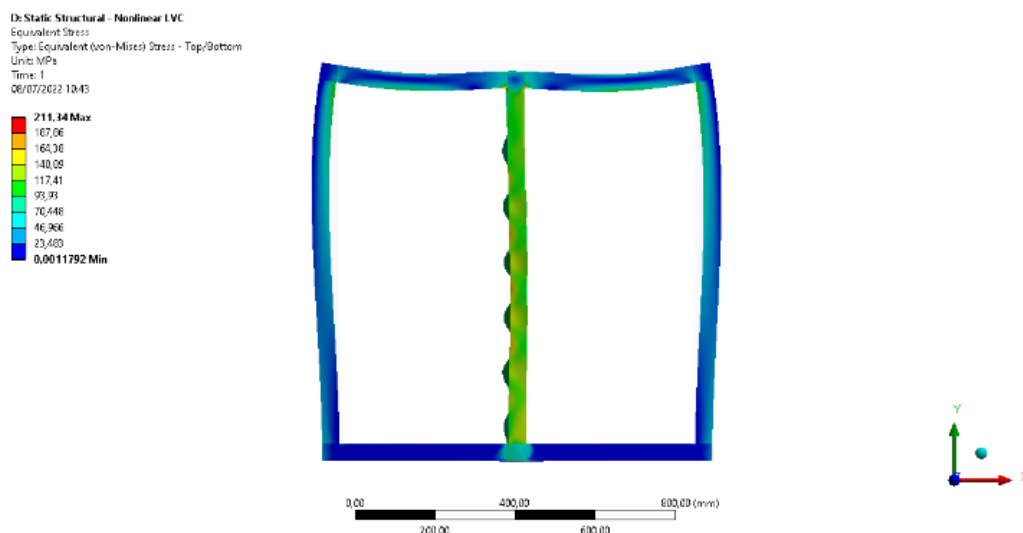


Figure 9. Condição deformada e tensões de Von-Mises obtidas pela análise 4.

Para esse modelo foram avaliadas as temperaturas mínimas, médias e máximas, como também a resistência ao fogo em minutos, para diferentes percentuais da carga obtida na análise 2. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência ao fogo para cada percentual da capacidade portante da estrutura

| Percentual da carga [%] | Temperatura mínima do aço [°C] | Temperatura média do aço [°C] | Temperatura máxima do aço [°C] | Resistência ao fogo (R) [min] |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 40 | 527 | 559 | 590 | 48 |
| 50 | 472 | 512 | 552 | 45 |
| 60 | 406 | 461 | 516 | 40 |
| 70 | 310 | 377 | 443 | 34 |
| 80 | 214 | 300 | 385 | 28 |

Com os resultados obtidos é possível verificar uma diminuição da temperatura crítica e na resistência ao fogo da estrutura conforme há um aumento do percentual da carga aplicada.

4 CONCLUSÃO

Através da análise 1 foi obtida a carga crítica e o modo de instabilidade da estrutura, servindo de base para definir as imperfeições geométricas aplicadas na análise 2. Com essa análise foi obtida a capacidade portante para temperatura ambiente, essa que aplicada junto com o histórico de temperaturas da análise 3, forneceu a resistência ao fogo através da análise 4. Com a resistência ao fogo obtida, é possível determinar o tempo de exposição ao fogo que a estrutura leva para perder suas características físicas, sendo essa informação de extrema importância para o projeto de uma estrutura e o controle de um possível incêndio. Ao fim, vale salientar a importância de

trabalhos futuros considerando diferentes tipos de isolamento, e um modelo que avalie os efeitos de convecção nas cavidades vazias da estrutura analisada.

Agradecimentos

Os autores agradecem a fundação araucária pelo incentivo financeiro à pesquisa e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio prestado.

REFERÊNCIAS

- [1] GRUBB, P J; GORGOLEWSKI, M T; LAWSON, R M. Light Steel Framing in Residential Construction. London Uk: The Steel Construction Institute, 2001. 107 p.
- [2] PANNONI, Fábio Domingos. Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio. 5. ed. São Paulo: Gerdau, 2011. 76 p
- [3] ALVES FILHO, Avelino, 1951- Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE: Análise não linear / Avelino Alves Filho. – 6. Ed. – São Paulo: Érica, 2012.
- [4] ALVES, Maurício C.; BATISTA, Eduardo de Miranda. Análise computacional do fenômeno de transferência de calor em paredes divisórias do tipo dry wall. Ouro Preto: Rem, 2007.
- [5] CEN- European Committee for Standardization, EN 1326: Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels - Technical delivery conditions, CEN-Europ, CEN- European Committee for 527 Standardization, Brussels, 2004.
- [6] P.A.G. Piloto, M.S. Khetata, A.B.R. Gavilán., Fire performance of non-loadbearing light steel framing walls - numerical simulation, in: 7th Int. Conf. Mech. Mater. Des., INEGI/FEUP, Albufeira, Portugal, 2017: pp. 1603–1610.
- [7] CEN- European Committee for Standardization, EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on 537 structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, CEN- 538 European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [8] 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, n. 4, pp. 365-394, 2003.
- [9] INCROPERA, Frank P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019
- [10] International Organization for Standardization, ISO834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, International Organization for Standardization, 1999.