

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE AÇO SOB INCÊNDIO VIA MÉTODO SIMPLIFICADO E MÉTODO AVANÇADO

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE DESIGN OF STEEL ELEMENTS
UNDER FIRE USING THE SIMPLIFIED METHOD AND THE ADVANCED
METHOD

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS
DE ACERO BAJO INCENDIO MEDIANTE EL MÉTODO SIMPLIFICADO Y EL
MÉTODO AVANZADO

José Geraldo de Araújo Silva¹, Paulo Santos Assis², Antônio Maria Claret de Gouveia³, Erivelto
Luiz de Souza⁴, Hisashi Inoue⁵, Gustavo Oliveira Daumas⁶, Lucas Teixeira Araújo⁷

DOI: 10.54899/dcs.v22i83.3626

Recibido: 12/09/2025 | Aceptado: 03/10/2025 | Publicación en línea: 22/10/2025.

RESUMO

As normas técnicas desempenham um papel fundamental ao garantir que os trabalhos sejam executados conforme o estado da arte e em conformidade com as melhores práticas e tecnologias, promovendo a segurança e economia na fabricação, fornecimento e utilização de produtos e serviços. No setor de construção civil, o avanço constante das pesquisas e a melhoria da qualidade dos materiais e técnicas de dimensionamento estrutural tornam necessária a revisão e atualização das normas técnicas para refletir a realidade atual. A norma ABNT 14323:2001, que regula a verificação da estabilidade de estruturas de aço sob altas temperaturas (incêndio), passou por revisões desde sua publicação, mas sem incorporar plenamente métodos avançados de verificação estrutural. Inicialmente, a norma baseava-se em dados de pesquisas da década de 1980, focando no aquecimento de corpos de prova em regime transiente e tração direta. Nos anos 1990, os incêndios controlados em edifícios, conhecidos como Testes de Cardington, forneceram informações valiosas sobre o comportamento estrutural sob incêndio e ajudaram a validar softwares de simulação. Desde então, os métodos de dimensionamento estrutural evoluíram

¹Doutor em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: jgaraujo@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7439-1505>

²Doutor em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: assis@ufop.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0874-4162>

³Doutor em Engenharia de Ciências de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: amclaretgouveia@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9924-7676>

⁴Doutor em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: souza.erivelto@ufsj.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3382-6987>

⁵Doutor em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: hisashi@ufsj.edu.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8503-3829>

⁶Doutorando em Engenharia de Infraestruturas. Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: gustavo.daumas@ga.ita.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4214-6983>

⁷Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil. E-mail: lucas.araujo1@aluno.ufop.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-9297-4615>

significativamente. Hoje, análises complexas podem ser realizadas utilizando computadores pessoais e softwares, como o Vulcan e o Safir. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os resultados obtidos em uma dissertação de mestrado de 2001 (onde se utilizou o método tabular proposto pela NBR14323) e aqueles obtidos pela análise através do método dos elementos finitos (MEF), via software Vulcan. O foco da comparação está nos aspectos de economia de proteção e segurança estrutural. Através desta comparação, buscou-se evidenciar as melhorias e as limitações dos métodos atuais em relação às normas tradicionais.

Palavras-chave: Norma NBR 14323. Comportamento Estrutural sob Incêndio. Método dos Elementos Finitos. *Software* Vulcan. Economia de Proteção Passiva. Segurança Estrutural.

ABSTRACT

Technical standards play a fundamental role in ensuring that work is carried out in accordance with the state of the art and in compliance with best practices and technologies. They promote both safety and cost-effectiveness in the manufacturing, supply, and use of products and services. In the construction sector, the continuous advancement of research and the improvement of material quality and structural design techniques make it necessary to review and update technical standards so they reflect current realities. The ABNT NBR 14323:2001 standard, which governs the verification of steel structures under high temperatures (fire), has undergone revisions since its publication but has not yet fully incorporated advanced methods of structural verification. Initially, the standard was based on research data from the 1980s, focusing on the heating of test specimens under transient conditions and direct tension. In the 1990s, controlled building fire experiments, known as the Cardington Tests, provided valuable information on structural behavior under fire and helped validate the Vulcan simulation software. Since then, structural design and calculation methods have advanced significantly. Today, complex analyses can be performed using personal computers and advanced software such as Vulcan and Safir. This study presents a comparative analysis between the results obtained in a 2001 master's dissertation (which applied the tabular method proposed by NBR 14323) and those obtained through finite element method (FEM) analysis using the Vulcan software. The comparison focuses on the economic aspects of fire protection and on structural safety. Through this comparison, we aim to highlight the improvements and limitations of current methods in relation to traditional standards..

Keywords: NBR 14323 Standard. Structural Behavior Under Fire. Finite Element Method (FEM) Software. Fire Protection Economy. Structural Safety.

RESUMEN

Las normas técnicas desempeñan un papel fundamental al garantizar que los trabajos se ejecuten conforme al estado del arte y en conformidad con las mejores prácticas y tecnologías. Promueven la seguridad y la economía en la fabricación, suministro y utilización de productos y servicios. En el sector de la construcción civil, el avance constante de las investigaciones y la mejora de la calidad de los materiales y de las técnicas de dimensionamiento estructural hacen necesaria la revisión y actualización de las normas técnicas para reflejar la realidad actual. La norma ABNT 14323:2001, que regula la verificación de la estabilidad de estructuras de acero bajo altas temperaturas (incendio), ha pasado por revisiones desde su publicación, pero sin incorporar plenamente métodos avanzados de verificación estructural. Inicialmente, la norma se basaba en

datos de investigaciones de la década de 1980, centradas en el calentamiento de probetas en régimen transitorio y tracción directa. En los años 1990, los incendios controlados en edificios, conocidos como Ensayos de Cardington, proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento estructural bajo incendio y ayudaron a validar el software de simulación Vulcan. Desde entonces, los métodos de cálculo y dimensionamiento estructural han evolucionado significativamente. Hoy en día, es posible realizar análisis complejos utilizando computadoras personales y softwares avanzados, como Vulcan y Safir. Este trabajo presenta un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en una disertación de maestría de 2001 (donde se utilizó el método tabular propuesto por la NBR14323) y aquellos obtenidos mediante el análisis a través del método de los elementos finitos (MEF), usando el software Vulcan. El foco de la comparación está en los aspectos de economía de protección y seguridad estructural. A través de esta comparación, buscamos evidenciar las mejoras y las limitaciones de los métodos actuales en relación con las normas tradicionales.

Palabras clave: Norma NBR 14323. Comportamiento Estructural Bajo Incendio. Método de los Elementos Finitos. Software Vulcan. Economía de Protección Contra Fuego. Seguridad Estructural.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Os metais, pelas suas boas características, sempre foram utilizados pela sociedade para os mais diversos fins. Especificamente, o aço, devido às suas excelentes características tem sido elemento importante para construção de viadutos, ginásios poliesportivos e edifícios altos, com um crescente exponencial nos últimos anos.

Por outro lado, quando na presença do calor, os metais perdem suas principais características mecânicas, que são a resistência (limite de escoamento) e o módulo de elasticidade (módulo de Young) o que há tempos é uma preocupação para os engenheiros estruturais. Os pesquisadores têm procurado maneiras de quantificar como e o quanto estas características variam quando da ocorrência de um sinistro.

Uma vez instalado em uma obra, todo e qualquer elemento estrutural deve resistir à ação do tempo e às intempéries, para que sejam garantidas as suas qualidades. Assim sendo, quando da ocorrência de um sinistro (incêndio) as colunas e vigas metálicas devem manter a sua estabilidade durante certo período de tempo, garantindo assim a fuga dos ocupantes e a ação da guarnição do corpo de bombeiros.

Visando evitar a perda de resistência das estruturas de aço durante um incêndio, as normas

exigem que as peças sejam protegidas contra o aumento de temperatura, o que pode inviabilizar o empreendimento. Destarte, deve ser procurada a forma mais econômica de se proteger o aço, quer seja no método de análise quanto no material de proteção.

A norma NBR 14323, baseada no método dos estados limites, estabelece os requisitos mínimos para verificação de projetos de estrutura de aço e de estruturas mistas (aço e concreto) em situação de incêndio para edificações dimensionadas através das normas NBR 8800 e NBR 14432, permite a utilização do método simplificado e de métodos avançados de análise.

O método simplificado (tabular) baseia-se na análise de barras isoladas e na utilização direta da tabela que fornece (de maneira aproximada) os valores relativos do módulo de elasticidade e do limite de escoamento, como foram obtidos no ensaio de tração direta realizado por Kirby e Preston na década de 1980 (apenas tração direta de uma barra aquecida). Por se tratar de uma metodologia que apresenta diversas aproximações, leva a resultados conservadores, elevando o custo da proteção passiva contra incêndio. Os valores adotados pela NBR 14323 para redução do módulo de elasticidade e da resistência do aço (tensão de escoamento) estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1

Fatores de redução das características do aço em temperatura elevada.

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000
^a Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.		

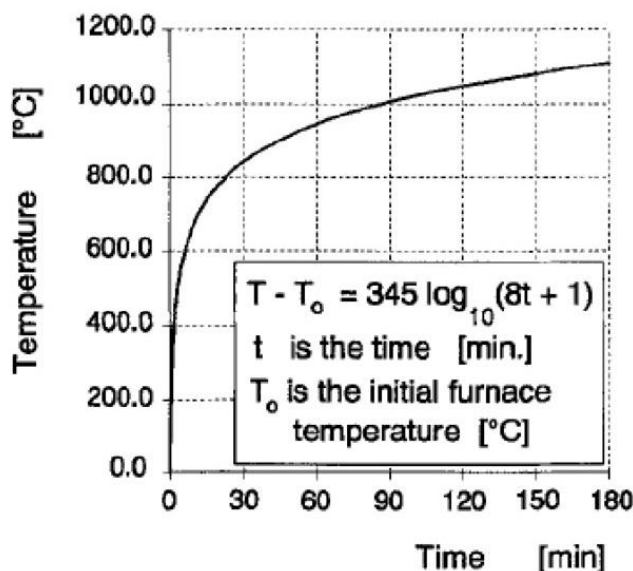
O Item 6.1.4 da NBR 8800 define os métodos avançados de dimensionamento como “aqueles em que os princípios da engenharia de segurança contra incêndio são aplicados de maneira realística a situações específicas”. Em complementação, o Item 10.1.1 da mesma norma diz “métodos avançados de dimensionamento são aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio e podem ser usados para elementos estruturais individuais com qualquer tipo de seção transversal, incluindo elementos estruturais mistos, para subconjuntos ou para estruturas completas, internas, externas ou pertencentes a elementos de compartimentação. Esses métodos devem ter por base o comportamento físico fundamental de modo a levar a uma aproximação confiável do comportamento esperado dos componentes da estrutura em situação de incêndio.” Este método tem maior acurácia e exige a utilização de *softwares* específicos para esta finalidade, sendo os mais utilizados o Vulcan e o Safir.

DESENVOLVIMENTO

Incêndios são fenômenos aleatórios que devido à grande quantidade de variáveis presentes não se repetem da mesma forma. Após observações da dinâmica do fogo, as entidades normativas propuseram uma curva teórica que atendessem à termodinâmica de aquecimento dos gases no interior de uma edificação quando da ocorrência de um sinistro. A Figura 1 apresenta a curva ISO 834.

Figura 1

Curva representativa do aquecimento de gases no interior de uma edificação sob incêndio ISO 834



A análise da parte direita da curva permite afirmar que a temperatura dos gases num incêndio, desde que não ocorresse falta de combustível, se estabilizará em torno de 1.150°C , o que corresponde à realidade, pois nesta temperatura o incêndio já está estabilizado, ocorrendo o equilíbrio térmico entre o calor produzido (fogo) e o calor externado (fumaça). A maior parte dos incêndios ocorre em tempo menor que 180 minutos, o que garante credibilidade à curva.

Durante um incêndio as estruturas (colunas, vigas e lajes) aquecerão e por consequência perderão a sua estabilidade, o que torna imperativo a garantia da segurança aos usuários e ao patrimônio. Assim sendo a verificação estrutural sob alta temperatura se fez necessária e pode ser realizada através do método simplificado e do método avançado.

Método Simplificado de Cálculo

Este método de verificação estrutural tem sua origem na norma europeia ENV 1993-1-2 e está presente na NBR14323, podendo ser utilizado para grande parte dos perfis (laminados e soldados) e ligações utilizados no cotidiano dos projetistas de estruturas em aço brasileiros.

A metodologia adotada, como o próprio nome indica, é de simplificar os cálculos, resultando em um sistema com vigas e sistemas de proteção passiva superdimensionados. As suas principais premissas são:

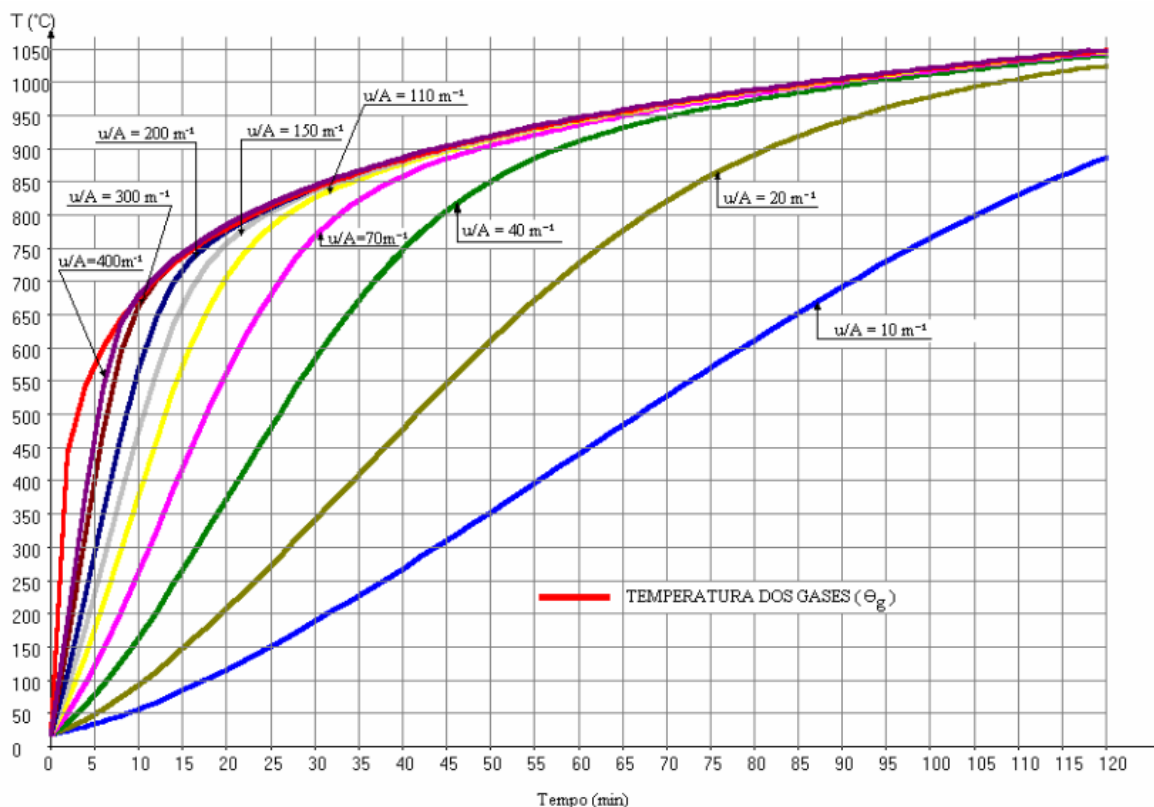
- O elemento estrutural a ser verificado deve estar dimensionando à temperatura ambiente segundo a norma NBR8800
- A distribuição de temperaturas na seção transversal e ao longo do comprimento dos elementos estruturais de aço é constante;
- Os efeitos das expansões térmicas são desprezados;
- A temperatura varia inearmente na alma do perfil.;
- O módulo de elasticidade do aço constante e igual ao seu valor em temperatura elevada em todos os elementos afetados pelo incêndio
- Apenas as deformações térmicas resultantes ao longo da altura da seção transversal das barras precisam ser considerados;
- Os efeitos das expansões térmicas podem ser desprezados.

A temperatura de um perfil em aço, sem proteção, durante um incêndio é obtida em função da relação entre o perímetro da seção transversal do perfil exposta ao fogo (u) e a área da seção transversal do perfil (A). Esta relação (u/A) é denominada massividade e é representada pela letra grega μ . A Figura 2 apresenta o gráfico de aquecimento de perfis de diversas massividades quando presentes em um incêndio padrão (ISO 834).

Conhecido o perfil adotado (já verificado sob temperatura ambiente), basta procurar nas curvas a que mais se aproxima da massividade do perfil e então terá a variação da temperatura do perfil em função do tempo de exposição ao fogo (tempo de incêndio).

Figura 2

Curvas de aquecimento de perfis em aço com diversas massividades quando num incêndio padrão.



Uma vez conhecida a curva de aquecimento do perfil (através da massividade) e o tempo desejado para a estrutura permanecer estável (eixo das abscissas), através da intersecção dos dois valores traça-se uma linha horizontal e o encontro desta com o eixo das ordenadas obtem-se a temperatura que o perfil atingiu.

Finalizando, uma vez conhecida a temperatura do perfil, parte-se para verificação do mesmo sob incêndio, adotando os valores do módulo de elasticidade e de tensão de escoamento à temperatura encontrada, utilizando os valores relativos constantes na Tabela 1.

Método Avançado de Cálculo

A NBR14432 define como “métodos avançados de dimensionamento aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio e podem ser usados para elementos estruturais individuais com qualquer tipo de seção transversal, incluindo

elementos estruturais mistos, para subconjuntos ou para estruturas completas, internas, externas ou pertencentes a elementos de compartimentação”.

Esses métodos devem ter por base o comportamento físico fundamental de modo a levar a uma aproximação confiável do comportamento esperado dos componentes da estrutura em situação de incêndio. Os métodos avançados podem incluir modelos separados para:

- O desenvolvimento e a distribuição de temperatura nas peças estruturais (análise térmica);
- O comportamento mecânico da estrutura ou de alguma de suas partes (análise estrutural)

Quaisquer modos de ruína potenciais que não sejam cobertos pelo método empregado (por exemplo, instabilidade local e colapso por cisalhamento) devem ser impedidos de ocorrer por meio de um projeto estrutural adequado

Os métodos avançados podem ser usados em associação com qualquer curva de aquecimento, desde que as propriedades do material sejam conhecidas para a faixa de temperatura considerada.

Por utilizar o método dos elementos finitos como ferramenta de cálculo, a acurácia obtida quando se utiliza esta ferramenta é grande, garantindo economia e segurança às estruturas.

Análise Comparativa dos Métodos

Seja, para ilustrar, o caso de um pórtico plano modificado de Martins (2000, p. 96). Os perfis dos pilares são CS 300 x 115 e da viga do 2º piso, VS 650 x 114. A viga da cobertura é um perfil PS 70 x 70 x 7 x 14 equivalente a 2 cantoneiras de abas iguais utilizadas L76.2 x 7.94. O aço é o A572 GR 50 com tensão de escoamento $f_y=345$ MPa.

As cargas permanentes atuantes sobre esse pórtico estão demonstradas na Figura 4, sendo as atuantes sobre o segundo piso de grande variabilidade. A Figura 5 mostra as sobrecargas atuantes sobre a viga do segundo piso. Nesse exemplo, não será considerado o efeito de vento. A combinação de carga a ser utilizada para a situação de incêndio será a correspondente à segunda hipótese de carga do item 6.3.1 da NBR 14323: 2013), isso é, respectivamente, sobre a viga da cobertura, a viga do segundo piso e os pilares:

$$N_1 = 1.15 \times 4.20 = 4.83 \text{ kN}$$

$$N_2 = 1.15 \times 74.97 + 0.28 \times 1.20 \times 63 = 107.38 \text{ kN}$$

$$N_3 = 1.15 \times 75.92 + 0.28 \times 1.20 \times 31.50 = 97.89$$

Figura 3

Cargas permanentes no pórtico

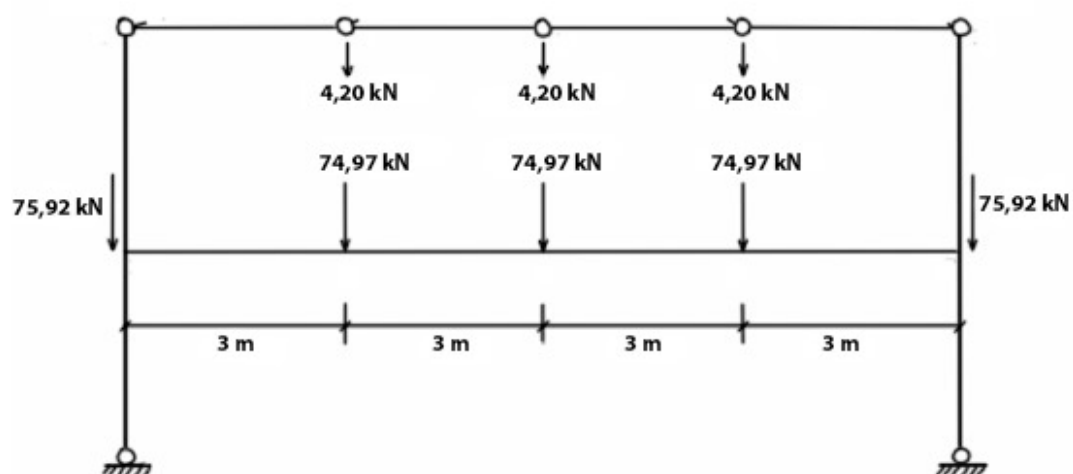
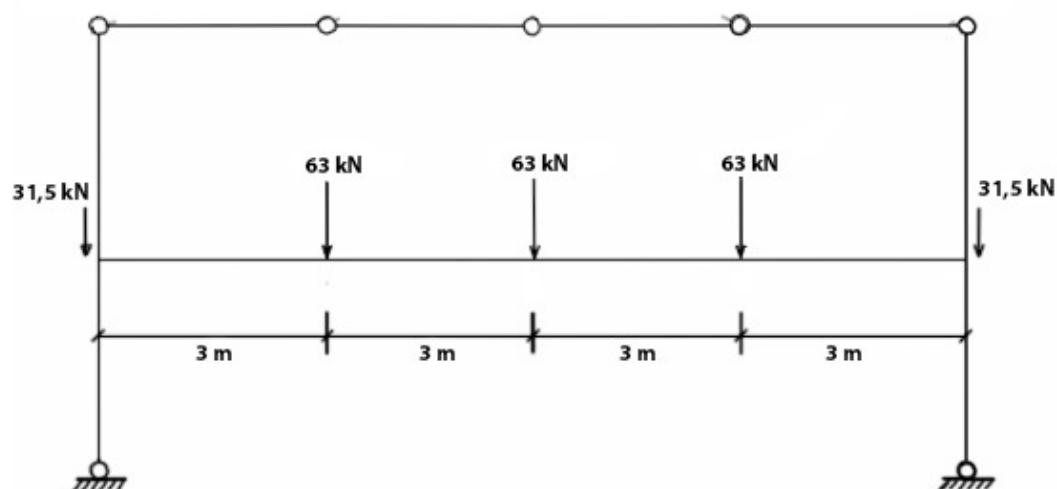


Figura 4

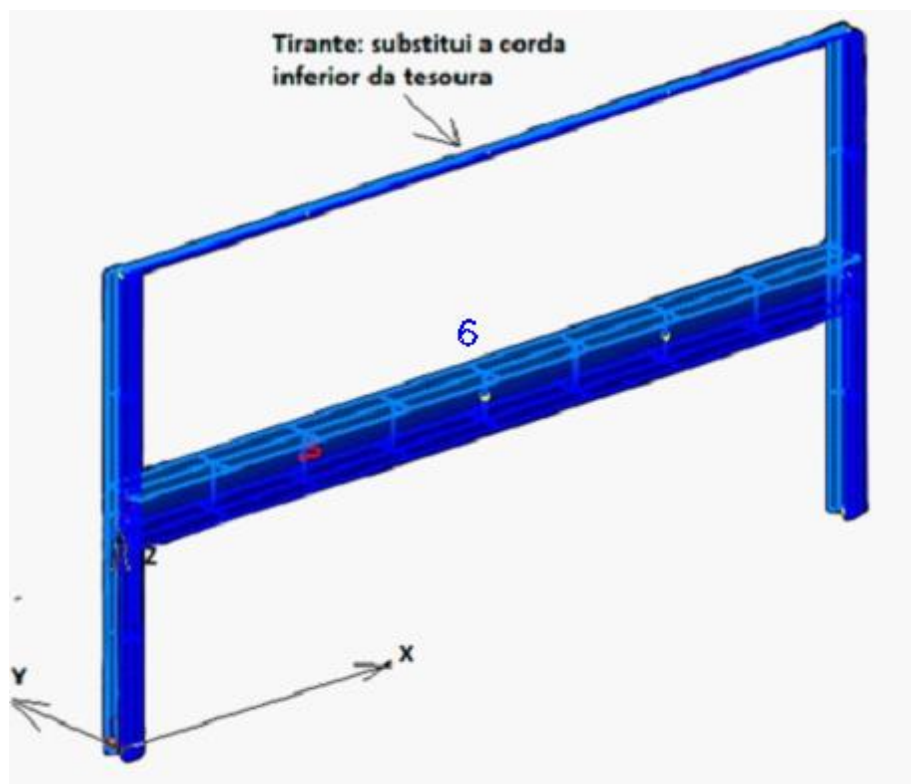
Sobrecargas atuantes no 2º piso



A renderização do pórtico através do software Vulcan está mostrada na Figura 5.

Figura 5

Modelo renderizado do pórtico, com substituição da corda inferior da treliça por um tirante

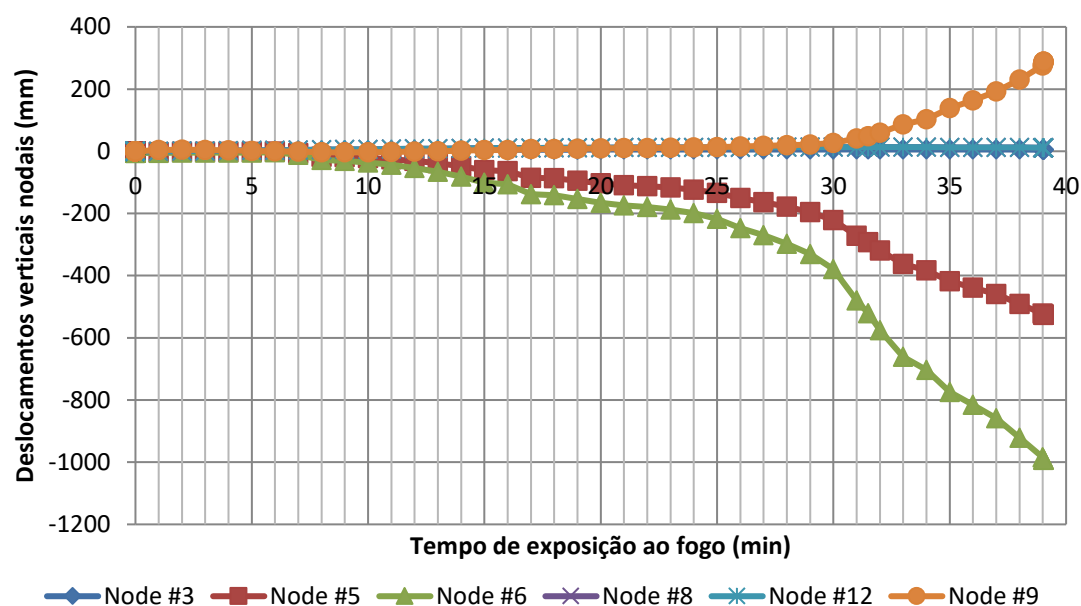


As curvas de aquecimento dos pilares e da viga do segundo piso são determinadas seguindo a metodologia do item 8.5.1.1.1 da NBR 14323:2013. Os pilares têm fator de massividade 123m^{-1} e a viga do 2º piso, 127m^{-1} . O tirante, como tem massividade muito alta, é admitido com a temperatura dos gases de incêndio. A viga é considerada sob ataque de fogo em 3 lados e os pilares, sob ataque de fogo nas 4 faces. Desta estrutura, pede-se um TRRF de 60 minutos.

As curvas de deslocamentos dos nós notáveis da estrutura, Figura 6, permitem concluir que o nó que mais se deforma é o nó 6 que apresenta um deslocamento igual a $L/20 = 600\text{mm}$ a 32 minutos de exposição ao fogo. Portanto, para obter o $\text{TRRF} = 60 \text{ min}$, uma estratégia de proteção deve ser adotada.

Figura 6

Deslocamentos nodais calculados no modelo renderizado



Seja o material de proteção com as seguintes propriedades: massa específica $\rho_m = 550 \text{ kg/m}^3$; condutividade térmica 0.11 W/m K ; calor específico $c_m = 920 \text{ J/kg K}$. Uma espessura inicial de 10mm será utilizada. As Figuras 8 e 9 mostram as curvas de elevação de temperatura dos pilares e da viga com essa proteção:

Figura 7

Elevação de temperatura do perfil CS300x115 com proteção de 10mm

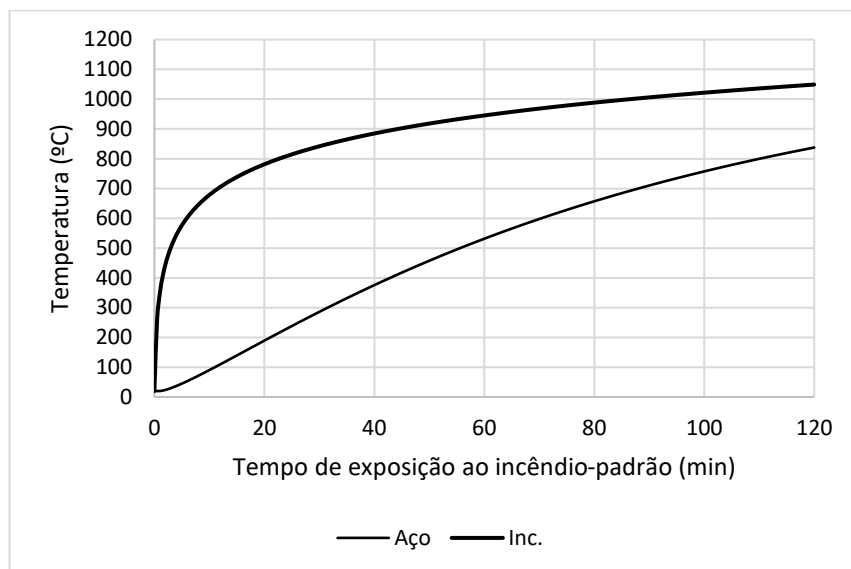
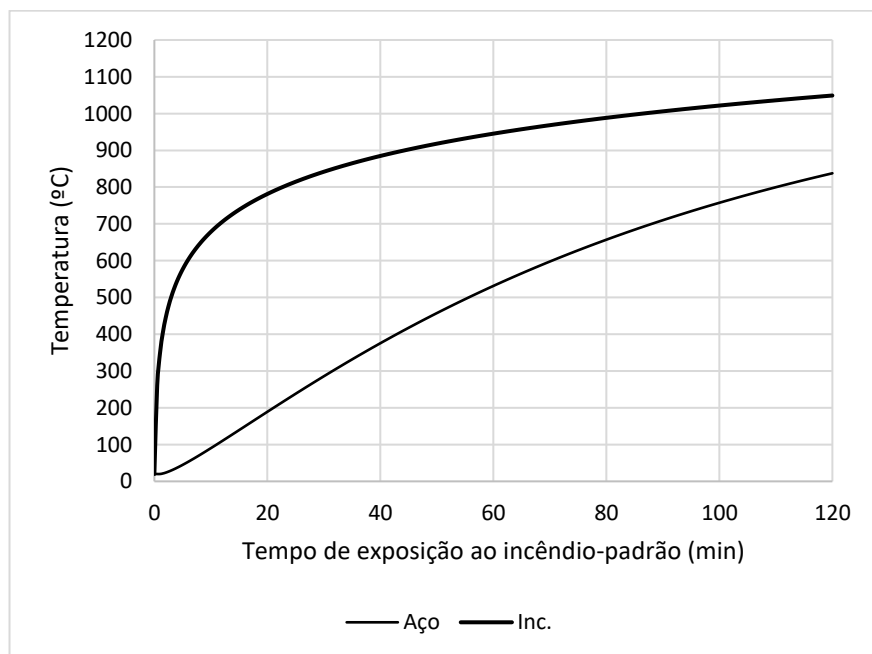


Figura 8

Curva de elevação de temperatura do perfil VS650x114 com proteção de 10mm e ataque de fogo por 3 lados

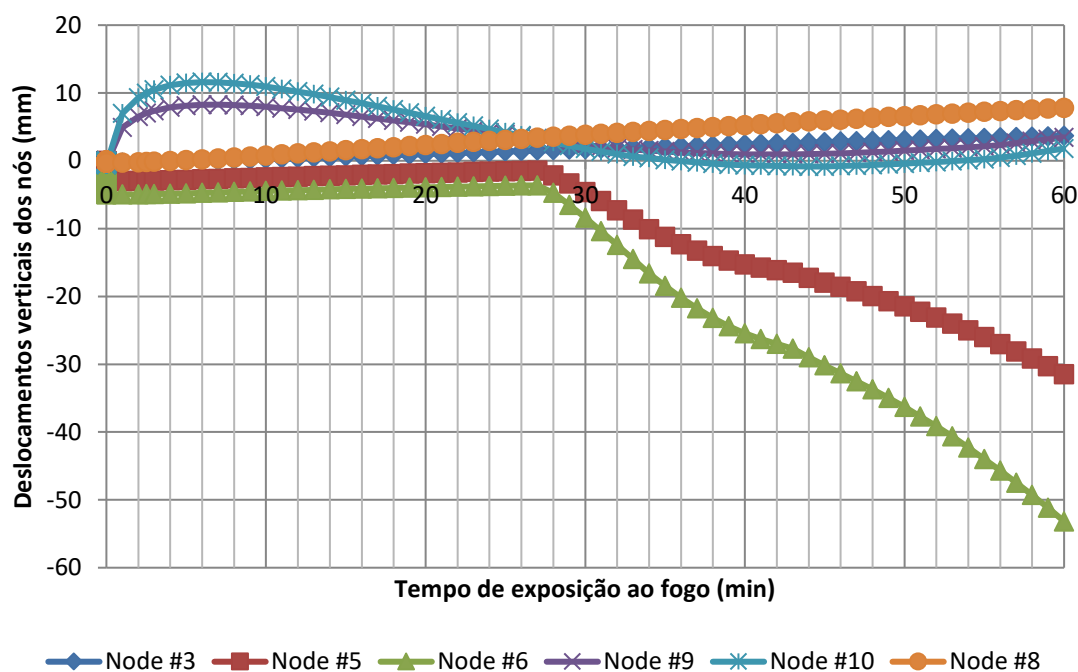


Os resultados obtidos após a análise via MEF indicam que, com a proteção de 10mm da argamassa projetada, cujas propriedades foram enunciadas, o pórtico resiste ao TRRF = 60 min e ainda conserva uma resistência ao fogo. Isso também se conclui do exame da Figura 10, porque

o deslocamento do nó 6, que poderia chegar a 600mm, mantendo a estabilidade global do pórtico em incêndio, é igual a 53mm. Havendo margem para se atingir a deformação limite, há naturalmente reserva de resistência ao fogo. Para verificar isso, a análise foi estendida a 120 min, concluindo-se que o pórtico ainda se mantém estável em incêndio (Figura 9), pois o deslocamento limite no nó que mais se deforma não atinge o valor $L/20 = 600\text{mm}$:

Figura 9

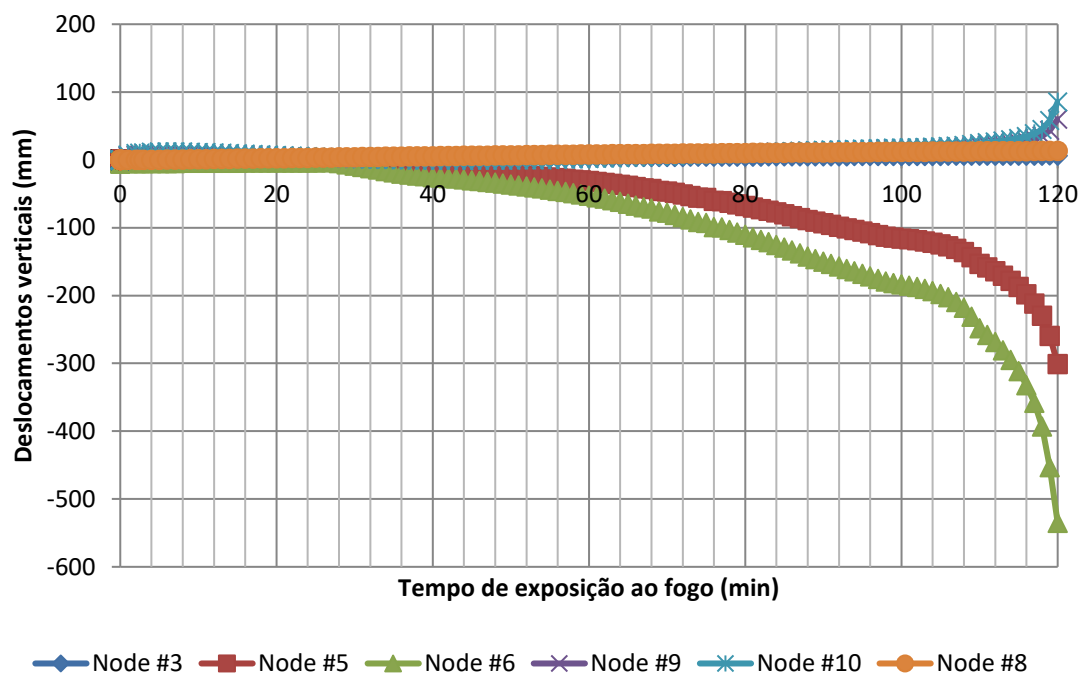
Deslocamentos nodais no Pórtico



Esse exemplo permite cotejar o processo de análise da estabilidade em incêndio pelo Método Simplificado, com base no conceito de temperatura crítica, e pelo MEF. A análise barra a barra preconizada pelo Método Simplificado, além de muito mais trabalhosa, despreza a hiperstaticidade da estrutura e leva a subestimar a sua resistência ao fogo. Nesse caso, a espessura de proteção de 10mm foi utilizada para atender a um TRRF de 30 minutos (MARTINS, 2000, p. 134), enquanto se demonstrou que a análise global feita pelo MEF dispensa a proteção para o TRRF = 30 min e, com a proteção de 10mm, permite chegar ao TRRF de 120 min (Figura 10).

Figura 10

Deslocamentos verticais do Pórtico em 120 min de exposição ao fogo



CONCLUSÕES

Como afirmado por Kirby e Preston “**grande ênfase está sendo colocada no desenvolvimento de modelos auxiliados por computador, capazes de prever os deslocamentos em uma estrutura à medida que a temperatura aumenta**”, de onde já passaram 40 anos e corroborado com os *softwares* atuais, a análise numérica pode fornecer resultados bastante confiáveis quando se trata de estruturas de prédio com vigas mistas em situação de incêndio. O Teste de Cardington foi validado pelo software Vulcan (VULCAN, 2022), ou vice-versa.

Reconhecendo que a modelagem da dinâmica de um incêndio é inerentemente menos determinística do que a resposta estrutural de um edifício ao incêndio, uma lição semelhante deve ser aprendida, pois os efeitos de possíveis erros de “modelagem” podem levar a consequências catastróficas.

A certeza da segurança nas respostas obtidas via computador reside no fato de que os programas foram ajustados com os resultados obtidos nos testes realizados, o que garante aos construtores e pesquisadores a segurança necessária na tomada de decisões quando da elaboração

de um projeto estrutural em aço sob alta temperatura.

Conclui-se que o método e observações propostas podem ser aplicados com segurança e confiabilidade no dimensionamento estrutural de prédios em aço sob altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

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.

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**. Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento**. Rio de Janeiro

European Committee for Standardization (Cen). **Eurocode 3 – “Design of steel structures Part 1–2: General rules – Structural fire design**. ENV 1993-1-2. Brussels, 1995

ISO 834-11:2014 - **Fire resistance tests — Elements of building construction**

Kirby, B. R.; Preston, R. R. **High Temperature Properties of Hot-rolled, Structural Steels for use in Fire Engineering Design Studies**. Fire Safety Journal, v.13, p. 27–37, 1988.

Martins, M. M. (2000). **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais

VULCAN SOLUTIONS. **Cardington Tests**. Disponível em: http://vulcan-solutions.com/www/?page_id=64. Acesso em: 15 Agosto de 2022.