

USO DE SOFTWARE CFD-FDS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS EM SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIO GARAGEM

JENNIFER WAVRIK¹, RUI MATOS², LUIS PUPIN³, TIAGO ANCELMO⁴, BERNARDO HOROWITZ⁵, CARLOS CALADO⁶

¹ MSc. em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Brasil, jennifer.wavrik@ufpe.br;

² ArcelorMittal Global R&D, Esch-Sur-Alzette, Luxemburgo, rui.matos@arcelormittal.com;

³ ArcelorMittal Global R&D, São Paulo, Brasil, luis.pupin@arcelormittal.com.br;

⁴ Dr. em Engenharia Civil, Prof. Adj. DECIV, UFPE, Recife, Brasil, tiago.poliveira@ufpe.br;

^{5,6} B&C Engenheiros Consultores LTDA, Recife, Brasil, bernardo.horowitz@ufpe.br, carlos.calado@upe.br.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
6 a 9 de outubro de 2025

RESUMO: Este estudo avaliou o desempenho térmico e mecânico de uma estrutura metálica do tipo edifício garagem, aberta lateralmente, submetida a um cenário de incêndio veicular a combustão, simulado no Fire Dynamics Simulator (FDS). O tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) para essa edificação é de 30 minutos, conforme a NBR 14432 (ABNT, 2021). Comparou-se o método simplificado da NBR 14323 (ABNT, 2013) com o uso de modelagem avançada, por meio do FDS. As temperaturas críticas obtidas permitiram identificar elementos cuja proteção passiva pode ser tecnicamente dispensada. A proteção integral representa 6,7% do custo total da obra, enquanto a proteção seletiva, com base nos resultados da simulação, corresponde a 3,2%. Os resultados reforçam a aplicabilidade do FDS como ferramenta de engenharia baseada em desempenho, possibilitando decisões tecnicamente fundamentadas e economicamente viáveis na segurança contra incêndio de estruturas metálicas.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação computacional, Estruturas metálicas, Segurança contra incêndio, Custo da proteção, Proteção passiva.

USE OF CFD SOFTWARE TO REDUCE FIRE SAFETY COSTS

ABSTRACT: This study evaluated the thermal and mechanical performance of a steel structure of a car park building, open on the sides, subjected to a vehicle fire scenario, simulated in Fire Dynamics Simulator (FDS). The fire resistance time (TRRF) required for this building is 30 minutes, according to NBR 14432 (ABNT, 2021). The simplified method of NBR 14323 (ABNT, 2013) was compared with the use of advanced modeling, using FDS. The critical temperatures obtained allowed the identification of elements whose passive protection can be technically dispensed with. Full protection accounts for 6.7% of the total cost of the work, while selective protection, based on the simulation results, accounts for 3.2%. The results reinforce the applicability of FDS as a performance-based engineering tool, enabling technically sound and economically viable decisions in fire safety for steel structures.

KEYWORDS: Computer simulation, Steel structures, Fire safety, Protection cost, Passive protection.

INTRODUÇÃO

A Segurança Contra Incêndio em Edificações (SCIE) é uma área fundamental da engenharia, voltada à preservação da vida, à proteção das estruturas e à redução de perdas materiais. A análise do comportamento de edificações em situação de incêndio é essencial para o desenvolvimento de projetos que atendam aos requisitos mínimos de segurança.

Tradicionalmente, essa análise é realizada por meio de métodos simplificados, baseados em curvas de incêndio padronizadas. Embora amplamente utilizadas por sua praticidade, essas curvas não representam as condições reais de um incêndio, principalmente em edifícios garagem abertos, pois desconsideram variáveis como ventilação, geometria da edificação e distribuição da carga térmica. Isso

pode levar à adoção de soluções excessivamente conservadoras, com implicações técnicas e econômicas para o projeto.

No caso específico de edifícios garagem, estudos têm destacado a necessidade de uma abordagem mais robusta para avaliar seu comportamento em situações de incêndio. Estudos experimentais conduzidos por Butcher (1968), Joyeux (2002) do CTICM, British BRE (2010) abordam o desempenho de edifícios garagem metálicos em situação de incêndio e concluem que a maioria dos incêndios em garagens não se propaga além do veículo de origem ou do pavimento inicial (Wavrik, 2025). No entanto, situações envolvendo múltiplos carros em chamas simultaneamente podem resultar em intensificação do fogo, devido à radiação de calor, com taxas de transferência térmica superiores a 8 MW para dois ou três veículos em combustão (BRE, 2010). Nesse tipo de estrutura, as curvas padrão podem superestimar a severidade térmica do incêndio por não considerarem a ventilação cruzada e a distribuição real das cargas combustíveis. A modelagem computacional, por sua vez, permite incorporar essas variáveis e adaptar a análise ao comportamento real do incêndio, resultando em decisões técnicas mais adequadas e potencialmente mais econômicas (Silva, 2023).

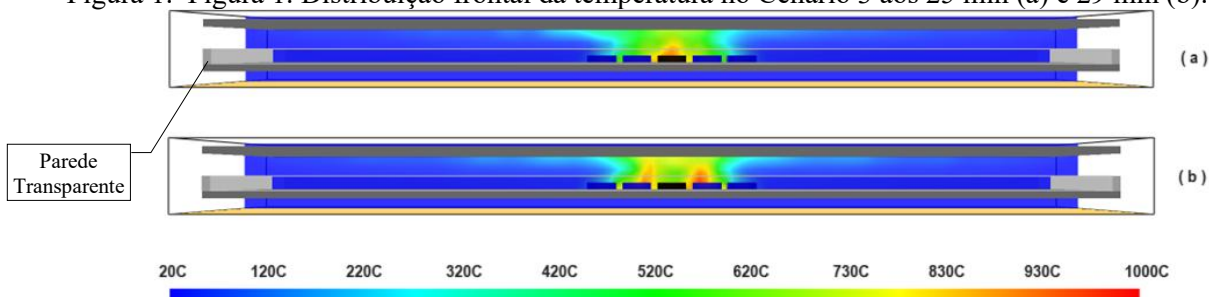
Considerando esse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a aplicação do Fire Dynamics Simulator (FDS) na simulação de cenários de incêndio em um edifício garagem metálico aberto lateralmente, localizado na cidade de São Paulo, analisando a influência nas temperaturas críticas dos elementos estruturais, na necessidade de proteção passiva e no potencial redução de custos.

MODELO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO NO FDS

A área de estudo compreende um edifício garagem com seis pavimentos, cuja estrutura é composta por pilares metálicos, vigas mistas de aço e concreto, com ligações rotuladas entre vigas e pilares. As lajes são do tipo mistas com fôrma incorporada (steel deck). O pavimento tipo possui dimensões de 57,6 metros de comprimento por 16,1 metros de largura, totalizando uma área construída de 5.564,16 m².

Foram simulados cinco cenários: ISO 834 (curva padrão), CEN01 (1 carro), CEN02 (2 carros com 12 min de intervalo), CEN03 (3 carros, sendo 2 e 3 aos 12 min), e CEN04 (5 carros, sendo 4 e 5 aos 24 min). Para obtenção de leituras das temperaturas desenvolvidas durante o incêndio, foram inseridos alguns 14 dispositivos de medição de temperatura dos gases ao redor do foco de incêndio, em distâncias de 1, 3, 5, 10 e 20 metros do veículo principal. A visualização dos gradientes térmicos e do pós-processamento, foram no *Smokeview*. Essa análise permitiu a identificação dos padrões de fluxo e dispersão dos produtos da combustão. Conforme a NBR 14432 (ABNT, 2001), edifícios garagem em análise são do tipo G2, classe P3, exigem TRRF de 30 min para elementos que garantem a estabilidade global, como pilares (Pires *et al.*, 2020). A simulação foi realizada até 30 min, e os resultados indicaram que, a partir de 10 m do foco, as temperaturas permaneceram próximas de 20 °C. A Figura 1 apresenta o gradiente de temperatura dos gases no cenário 3, com cinco veículos em combustão.

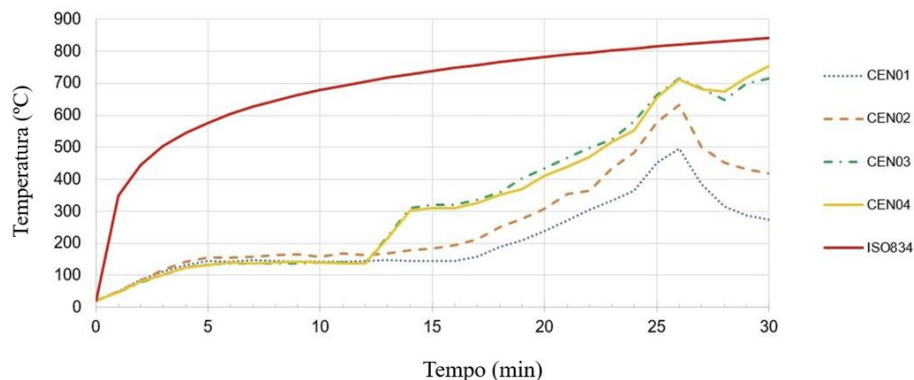
Figura 1. Figura 1. Distribuição frontal da temperatura no Cenário 3 aos 25 min (a) e 29 min (b).



A Figura 2 ilustra a variação da temperatura ao longo do tempo para cada um dos cenários analisados. Conforme previsto, os perfis térmicos gerados pelas simulações no FDS (CEN01 a CEN04) indicaram elevações de temperatura mais baixas em comparação com a curva padrão de incêndio, tanto

em sua taxa de crescimento quanto nos valores máximos registrados (Yan *et al.*, 2022). Os cenários CEN03 e CEN04 apresentaram comportamentos semelhantes, o que se justifica pelo fato de a análise ter sido limitada aos primeiros 30 minutos do incêndio, intervalo correspondente ao TRRF exigido para esse tipo de edificação.

Figura 2. Evolução térmica dos cenários simulados e comparação com ISO 834.



VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A resistência dos pilares metálicos em Situação de Incêndio (SI) foi avaliada por meio de métodos simplificados conforme orientações normativas NBR 14323 (ABNT, 2013). A determinação da temperatura máxima nas seções de aço considerou dois tipos de entrada térmica: a curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999) e as curvas realistas obtidas por simulação computacional no Fire Dynamics Simulator (FDS) para os cenários CEN01 a CEN04. Os resultados consolidados são apresentados em resumo nas Tabelas 1 e 2, sendo análise limitada aos pilares A1, B2 e B6 por questão de espaço. Os casos em que os pilares não atenderam aos requisitos mínimos de resistência (quando $S_{fi,d} > R_{fi,d}$) estão destacados em vermelho.

Tabela 1. Resistência dos pilares para TRRF de 30 min sob curva padrão.

Leg.	Dimensões					S/ revest.			C/ revest.	
	d mm	bf mm	tf mm	tw Mm	u/Ag m ⁻¹	S _{fi,d} kN	θ _{aço} °C	R _{fi,d} kN	θ _{aço} °C	R _{fi,d} kN
A1	250	250	12,5	6,3	193,7	1302	825	130	192	1712
B2	250	250	12,5	8,0	184,3	1736	823	215	185	2086
B6	300	300	16,0	8,0	151,9	2660	814	234	159	3165

Os resultados da Tabela 1 demonstram que, na ausência de revestimento de proteção passiva, os pilares não alcançaram o TRRF de 30 minutos, conforme exigido. No entanto, a aplicação de um revestimento com 10 mm de espessura de argamassa de proteção térmica comercialmente utilizada em São Paulo, foi suficiente para garantir o atendimento ao TRRF, resultando em uma significativa redução da temperatura nas seções metálicas.

Tabela 2. Resistência dos pilares para TRRF de 30 min sob curva FDS.

Leg.	Dimensões					CEN01		CEN02		CEN03 ou 04		
	d mm	bf mm	tf mm	tw Mm	u/Ag m ⁻¹	S _{fi,d} kN	θ _{aço} °C	R _{fi,d} kN	θ _{aço} °C	R _{fi,d} kN	θ _{aço} °C	R _{fi,d} kN
A1	250	250	12,5	6,3	193,7	1302	238	1641	349	1438	547	849
B2	250	250	12,5	8,0	184,3	1736	231	2086	340	2025	534	1209
B6	300	300	16,0	8,0	151,9	2660	207	2921	304	2503	480	1938

A Tabela 2 apresenta os resultados das simulações térmicas dos cenários CEN01 a CEN04 no FDS. No CEN01, os níveis de temperatura não comprometeram a estabilidade dos pilares, dispensando

a proteção passiva. Já nos cenários CEN03 e CEN04, observou-se perda de estabilidade, exigindo medidas de proteção adicionais. Esses dados reforçam o potencial da modelagem computacional para otimizar o dimensionamento térmico estrutural.

As vigas, com fator de massividade inferior a 350, atendem ao critério D.1 do Anexo D da NBR 14323 (ABNT, 2013), o que permite a dispensa da verificação específica em incêndio. No entanto, em cenários mais severos, a análise pontual pode indicar a necessidade de proteção.

Para as lajes mistas com steel deck (120 mm de altura total e 0,95 mm de espessura), a geometria atende aos critérios de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico para 30 minutos, conforme a NBR 14323, não sendo necessária a aplicação de argamassa contrafogo.

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA ESTRUTURA

Com base nos preços médios da construção civil em São Paulo (fevereiro de 2024), foram estimados os custos da estrutura metálica da edificação, considerando pilares, vigas e lajes mistas, com e sem aplicação de proteção passiva com argamassa contrafogo.

As simulações realizadas com o software CFD-FDS permitiram identificar de forma precisa as regiões que demandam proteção, evitando a aplicação generalizada do revestimento. A Tabela 3 apresenta os custos totais da estrutura para três estratégias distintas:

- Solução A: apenas pintura anticorrosiva, aplicada nos cenários CEN01 e CEN02, nos quais não se constatou necessidade de proteção passiva.
- Solução B: aplicação de argamassa em pilares e contraventamentos, indicada para os cenários CEN03, CEN04 e ISO 834.
- Solução C: proteção total, adotada em abordagens conservadoras sem análise térmica específica.

A Solução A apresentou a maior economia, com redução superior a R\$ 200 mil em relação à abordagem integral, evidenciando o impacto direto da modelagem térmica no custo final da estrutura. Mesmo quando a proteção passiva é necessária, seu custo tem se tornado mais competitivo com a ampliação do uso da tecnologia no mercado nacional.

Neste estudo, o investimento em proteção variou de 0% a 6,7% do custo total da estrutura, reforçando sua viabilidade técnica e financeira quando aplicada de forma seletiva. Esses resultados demonstram o potencial da modelagem CFD-FDS como ferramenta estratégica para a tomada de decisão em projetos de segurança contra incêndio, promovendo soluções mais compatíveis com o risco real e favorecendo a racionalização de recursos.

Tabela 3. Estimativa de custo da estrutura em função da estratégia de proteção contrafogo adotada

Serviço	Solução A (CEN01 e CEN 02)		Solução B (CEN03, CEN04 e ISO 834)		Solução C (Proteção de todos os pilares e vigas)	
	Valor (R\$)	%	Valor (R\$)	%	Valor (R\$)	%
Estrutura em aço das vigas e pilares: fabricação, detalhamento, transporte e montagem	3.108.881,26	53,4	3.108.881,26	52,6	3.108.881,26	51,4
Estruturas das lajes: steel deck, acessórios, armadura e concreto	2.530.314,84	43,4	2.530.314,84	42,8	2.530.314,84	41,9
Proteção ambiente das vigas e pilares de aço: jato de gralha e pinturas	187.624,24	3,2	115.486,37	2,0	0,00	0,0
Proteção passiva das vigas e pilares de aço: revest. com argamassa de proteção contrafogo, esp. 10mm, TRRF 30 min.	0,00	0,0	156.208,32	2,6	406.284,08	6,7
Total	5.826.820,34	100	5.910.890,79	100	6.045.480,18	100

CONCLUSÃO

A aplicação da curva-padrão ISO 834 e a modelagem baseada em cenários representam abordagens distintas para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, ambas capazes de garantir a segurança exigida. No entanto, a utilização de cenários representativos, condizentes com as

condições reais de uso e ventilação das edificações garagem abertas lateralmente, permite maior racionalidade no projeto.

Do ponto de vista econômico, a modelagem computacional permitiu otimizar o uso de proteção passiva, reduzindo significativamente os custos da estrutura. A depender do cenário considerado, as estruturas de aço de edifícios garagem abertos lateralmente a proteção pode ser totalmente dispensada. Em contrapartida, a adoção de critérios mais conservadores, ou exigências normativas específicas, pode requerer a aplicação da proteção passiva em sua totalidade, com custos superiores ao cenário de modelagem.

AGRADECIMENTOS

A ArcelorMittal Global R&D pelos dados disponibilizados e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Método de cálculo*. NBR 15220-2. Rio de Janeiro, 2022.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento*. NBR 14432. Rio de Janeiro, 2001.

British Research Establishment. *Fire spread in car parks*. BRE Technical Report. London, 2010.

International Organization for Standardization – ISO. *ISO 834: Fire-resistance tests: elements of building construction – Part 1.1: General requirements for fire resistance testing*. Geneva, 1999.

Joyeux, D.; Kruppa, J.; Cajot, L. G.; Schleich, J. B.; Van de Leur, P.; Twilt, L. *Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings*. CEC Agreement 7215 – PP/025. CTICM, France; Profil-Arbed Recherches, Luxembourg; TNO, Netherlands, 2002.

McGrattan, K. et al. *Fire dynamics simulator user's guide: sixth edition*. NIST Special Publication 1019. Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2024.

Pires, T. A. C.; Do Rêgo Silva, J. J.; Dos Santos, M. M. L.; Costa, L. M. Fire resistance of built-up cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 177, p. 106456, 2020.

Silva, Donatella; Thauvove, C.; Fraud, C.; Tramoni, J. B.; Suzanne, M. Effect of the fire modelling on the structural temperature evolution using advanced calculation models. *Fire*, v. 6, n. 91, 2023. DOI: 10.3390/fire6030091.

Yan, X.; Charlier, M.; Gernay, T. Thermal response of steel framing members in open car park fires. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 16, n. 9, p. 1071–1088, set. 2022.

WAVRIK, Jennifer Rosy Avelino. Avaliação de cenários de incêndio para um edifício garagem em estrutura de aço utilizando Fire Dynamics Simulator (FDS). 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.