

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS DO SERTÃO

DELMIRO GOUVEIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AGNALDO JÚNIOR LIMA DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO
TÉRMICA PARA ELEMENTOS ESTRUTURAIS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

Delmiro Gouveia/AL

2026

AGNALDO JÚNIOR LIMA DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO
TÉRMICA PARA ELEMENTOS ESTRUTURAIS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alverlando Silva Ricardo.

Delmiro Gouveia/AL

2026

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecário responsável: Luis Claudio Borges CRB-11/1138

S237d Santos, Agnaldo Júnior Lima dos.

Dimensionamento e otimização de sistemas de proteção térmica para elementos estruturais metálicos em situação de incêndio / Agnaldo Júnior Lima dos Santos. - 2026.

116 f. : il.

Orientação: Alverlando Silva Ricardo.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2026.

1. Segurança contra incêndio 2. Proteção passiva 3. Fator de massividade 4. Método do gradiente reduzido generalizado 5. Viabilidade econômica. I. Santos, Agnaldo Júnior Lima dos. II. Ricardo, Alverlando Silva. II. Título.

CDU: 624.014:614.84

Folha de Aprovação

AGNALDO JÚNIOR LIMA DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO TÉRMICA PARA ELEMENTOS ESTRUTURAIS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovado em 16 de junho de 2026.



Documento assinado digitalmente
ALVERLANDO SILVA RICARDO
Data: 01/07/2026 11:39:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Orientador – Prof. Dr., Alverlando Silva Ricardo, UFAL)

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
CAMILA DE SOUSA VIEIRA
Data: 02/07/2026 09:46:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinadora Interna – Profa. Dra., Camila de Sousa Vieira, UFAL)



Documento assinado digitalmente
VINICIUS COSTA CORREIA
Data: 01/07/2026 20:52:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinador Interno – Prof. Dr., Vinicius Costa Correia, UFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, criador de todas as coisas e autor dos meus dias, por ter me proporcionado saúde, sabedoria, discernimento e equilíbrio para vivenciar e superar cada desafio nas diferentes etapas da vida. Sou grato por cada experiência vivida e pelos ensinamentos extraídos, bem como por cada contribuição dada e recebida.

À toda a minha família, em especial à minha mãe, Gilvânia, minha maior incentivadora, apoiadora e fonte incondicional de amor; à minha tia Vilma, conselheira e encorajadora; e aos meus avós, Dona Lúcia e Seu Manoel, minhas inspirações de força e resiliência. A cada um de vocês devo minha eterna gratidão pelo fundamental suporte e incentivo, assim como por depositarem em mim tamanha confiança.

Agradeço aos meus amigos pessoais, Karolaine e Fábio, pela amizade e por participarem de momentos importantes na minha trajetória. Sou grato também pelas amizades construídas ao longo desses anos na universidade, especialmente com Jackson, Wesley, Arthur, Luiz Antônio, Vanderli, Ísis e tantos outros.

Ao professor e orientador deste trabalho, Alverlando Ricardo, por toda a dedicação, orientação e apoio prestados para que esta pesquisa fosse concluída. Além deste suporte, agradeço pelas oportunidades e pesquisas realizadas junto ao Grupo de Análise de Materiais e Estruturas (GAMEs).

Ao PET Engenharias e a todos os seus membros, meu muito obrigado pela oportunidade de tornar minha formação acadêmica, profissional e humana ainda mais completa. Foram cinco anos de dedicação e de grandes aprendizados que sempre levarei comigo. Agradeço, de modo especial, aos meus tutores Alverlando Ricardo e Jonhatan Magno, com quem muito aprendi.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil, manifesto o meu profundo respeito e agradecimento. Estendo este reconhecimento aos técnicos e demais colaboradores da universidade pelo suporte e serviços prestados, cuja atuação foi uma contribuição indispensável para a conclusão desta etapa.

Foram cinco anos intensos, marcados por diferentes momentos que se completam. Entre desafios, oportunidades e conquistas, chego a esta reta final com o sentimento de profunda gratidão e com a certeza de que essa construção continuará.

Muito obrigado, Universidade Federal de Alagoas!

"Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos." (Marie Curie)

RESUMO

As estruturas de aço apresentam redução significativa de resistência e rigidez quando submetidas a elevadas temperaturas, tornando necessária a adoção de sistemas de proteção térmica passiva em situação de incêndio. Embora diferentes materiais sejam empregados para essa finalidade, a escolha da solução mais adequada ainda depende da integração entre critérios normativos, desempenho térmico, consumo de material e custo de aplicação. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnico-econômica comparativa e propor a otimização de sistemas de proteção passiva contra incêndio aplicados a um modelo estrutural em aço de seis pavimentos. Para isso, foram determinados o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, os fatores de massividade dos elementos estruturais e as espessuras necessárias de proteção térmica, com base em cartas de cobertura e nos critérios da ABNT NBR 14323 (2013). Em seguida, foram estimados os quantitativos e custos de três sistemas de proteção (tintas intumescentes, argamassas projetadas e placas de gesso acartonado), considerando produtos disponíveis no mercado brasileiro. Por fim, aplicou-se o método do Gradiente Reduzido Generalizado para avaliar cenários de otimização das espessuras e seus impactos econômicos. Os resultados indicaram diferenças expressivas entre as soluções analisadas: as tintas intumescentes apresentaram os maiores custos estimados, as placas de gesso acartonado ocuparam uma faixa intermediária e as argamassas projetadas apresentaram os menores custos iniciais entre os sistemas avaliados. Além disso, o processo de otimização gerou espessuras significativamente diferentes daquelas indicadas pelas cartas de cobertura dos fabricantes, com valores superiores para os sistemas de tinta intumescente e placas de gesso acartonado e inferiores para a argamassa projetada. Para a argamassa Thermo-X, a otimização reduziu o quantitativo estimado de material de 68 para 29 sacos, diminuindo o custo de R\$ 4.625,01 para R\$ 1.962,33, o que corresponde a uma redução aproximada de 57,6%. Essas diferenças evidenciam que a formulação analítica adotada é sensível às propriedades térmicas consideradas e apresenta limitações para representar, de forma direta, sistemas cujo desempenho é fortemente associado a ensaios experimentais e às condições de aplicação. Conclui-se que o procedimento proposto contribui para a comparação técnico-econômica preliminar de sistemas de proteção térmica passiva, podendo auxiliar na tomada de decisão em projetos de estruturas metálicas em situação de incêndio, desde que seus resultados sejam interpretados em conjunto com recomendações normativas, catálogos técnicos e validações experimentais.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio; proteção passiva; fator de massividade; método do gradiente reduzido generalizado; viabilidade econômica.

ABSTRACT

Steel structures undergo a significant reduction in strength and stiffness when subjected to elevated temperatures, making the adoption of passive fire protection systems essential in fire scenarios. Although different materials are available for this purpose, selecting the most suitable solution still depends on balancing regulatory requirements, thermal performance, material consumption, and installation costs. In this context, this study aims to conduct a comparative techno-economic analysis and propose the optimization of passive fire protection systems applied to a six-storey steel building model. To achieve this objective, the Required Fire Resistance Rating (TRRF), the section factors of the structural members, and the required fire protection thicknesses were determined based on coverage charts and the criteria established by ABNT NBR 14323 (2013). Subsequently, the material quantities and costs of three protection systems (intumescent coatings, sprayed fire-resistant mortars, and gypsum plasterboard systems) were estimated using products available on the Brazilian market. Finally, the Generalized Reduced Gradient (GRG) method was applied to evaluate fire protection thickness optimization scenarios and their economic implications. The results revealed significant differences among the protection systems analysed. Intumescent coatings presented the highest estimated costs, gypsum plasterboard systems exhibited intermediate costs, and sprayed mortars showed the lowest initial costs among the alternatives evaluated. Furthermore, the optimization process produced protection thicknesses that differed considerably from those specified in the manufacturers' coverage charts, with higher values for intumescent coating and plasterboard systems and lower values for sprayed mortar systems. For the Thermo-X mortar, the optimization reduced the estimated material consumption from 68 to 29 bags, decreasing the cost from R\$ 4,625.01 to R\$ 1,962.33, corresponding to an approximate reduction of 57.6%. These differences indicate that the analytical formulation adopted is sensitive to the thermal properties considered and presents limitations in directly representing protection systems whose performance is strongly dependent on experimental testing and application conditions. It is concluded that the proposed procedure contributes to the preliminary techno-economic assessment of passive fire protection systems and may support decision-making in the design of steel structures subjected to fire conditions, provided that its results are interpreted in conjunction with regulatory provisions, technical catalogues, and experimental validations.

Keywords: Fire safety; passive protection; mass factor; generalized reduced gradient method; economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real	20
Figura 2.2 – Modelo de incêndio-padrão.....	21
Figura 2.3 – Curvas temperatura-tempo nominais para diferentes modelos de incêndio.....	24
Figura 2.4 – Temperatura do aço (incêndio-padrão)	25
Figura 2.5 – Método do tempo equivalente	28
Figura 2.6 – Alongamento do aço em função da temperatura	39
Figura 2.7 – Calor específico do aço em função da temperatura	40
Figura 2.8 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura	41
Figura 2.9 – Curvas de velocidade de aquecimento durante a realização do ensaio de incêndio-padrão	45
Figura 2.10 – Diminuição da resistência do aço estrutural em função da temperatura.....	46
Figura 2.11 – Aplicação do revestimento intumescente	51
Figura 2.12 – Revestimento intumescente mediante a ação do fogo.....	51
Figura 2.13 – Estruturas metálicas revestidas com argamassa projetada	54
Figura 2.14 – Revestimento em argamassa projetada em estrutura metálica	54
Figura 2.15 – Pilar metálico protegido com placas de gesso acartonado	56
Figura 2.16 – Estrutura metálica protegida com placas de gesso	56
Figura 2.17 – Fluxograma genérico do processo de otimização	60
Figura 3.1 – Pórtico tridimensional de aço com seis andares.....	66
Figura 3.2 – Localização da janela principal de trabalho	77
Figura 3.3 – Caixa de diálogo do menu principal de trabalho.....	78
Figura 3.4 – Curva padrão para um perfil em aço com massividade de 132 m^{-1}	80
Figura 4.1 - Representação de custos dos materiais de proteção passiva.....	90
Figura 4.2 - Comparação de custos da argamassa projetada	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores característicos das cargas de incêndio específicas	31
Tabela 2.2 - Fatores de ponderação das medidas de segurança contra incêndio	32
Tabela 2.3 - Valores de γ_{s2} em função do risco de ativação	33
Tabela 2.4 - Coeficiente M	34
Tabela 2.5 – Edificações isentas de verificação de acordo com ABNT NBR 14432 (2001) ...	35
Tabela 2.6 – Fatores de redução da resistência ao escoamento do aço	37
Tabela 2.7 – Fatores de redução do módulo de elasticidade do aço	38
Tabela 3.1 – Parâmetros da Equação do Tempo Equivalente t_{eq}	69
Tabela 3.2 - Determinação do Fator de Massividade (m^{-1})	70
Tabela 3.3 – Empresas fornecedoras das cartas de cobertura	71
Tabela 3.4 – Quantidade de perfis por pavimento e classificação quanto a posição	72
Tabela 3.5 – Empresas brasileiras fornecedoras dos materiais de proteção	75
Tabela 3.6 – Parâmetros de cálculo dos materiais de proteção para otimização	79
Tabela 4.1 - Espessura dos materiais de proteção passiva	84
Tabela 4.2 - Quantitativo dos materiais de proteção por perfil	86
Tabela 4.3 - Custo total estimado das soluções de proteção passiva	88
Tabela 4.4 - Espessura otimizadas dos materiais de proteção passiva	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Medidas de proteção passiva e etapas do incêndio.....	47
Quadro 2.2 – Resumo das principais características dos materiais de proteção térmica.....	49
Quadro 2.3 – Principais tintas intumescentes fornecidas no Brasil.....	52
Quadro 2.4 – Alguns materiais projetados empregados no Brasil.....	55
Quadro 2.5 – Principais materiais rígidos e semirrígidos utilizados no Brasil.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABPP – Associação Brasileira de Proteção Passiva

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)

CBMAL – Corpo de Bombeiros Militar de Alagoas

CTIF – *Comité International Technique de Prévention et d'Extinctions du Feu* (Comitê Internacional Técnico de Prevenção e Extinção do Fogo)

EUROCODE – Conjunto de Normas Europeias de projeto estrutural

GRG – Gradiente Reduzido Generalizado

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Padronização)

IT – Instrução Técnica

NBR – Norma Brasileira

OMS – Organização Mundial da Saúde

PPCF – Proteção Passiva Contra Fogo

RF – Resistência ao Fogo

TRRF – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_n	– Coeficiente de medidas de proteção ativa
γ_s	– Coeficiente de segurança para risco de incêndio
$\Delta_{la/la}$	– Alongamento térmico relativo do aço
Δt	– Intervalo de tempo adotado na análise
$\Delta\theta_{a,t}$	– Elevação da temperatura no elemento estrutural de aço
θ_a	– Temperatura na superfície do aço
θ_g	– Temperatura dos gases quentes no ambiente
θ_{lim}	– Temperatura crítica limite (adotada como 500 °C)
λ_a	– Condutividade térmica do aço
λ_m	– Condutividade térmica do material de revestimento contra fogo
ρ_a	– Massa específica do aço
ρ_m	– Massa específica do material de revestimento contra fogo
v	– Grau de ventilação ou fator de abertura do compartimento
c_a	– Calor específico do aço
c_m	– Calor específico do material de revestimento contra fogo
E	– Módulo de elasticidade do aço a 20 °C
f_y	– Resistência ao escoamento do aço a 20 °C
$f_{y,\theta}$	– Resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada
k_{sh}	– Fator de correção do efeito de sombreamento
$K_{E,\theta}$	– Fator de redução do módulo de elasticidade
$K_{y,\theta}$	– Fator de redução da resistência ao escoamento
$K_{\sigma,\theta}$	– Fator de redução da resistência ao escoamento dos aços sujeitos à flambagem local
t	– Tempo de exposição
t_m	– Espessura do material de revestimento contra fogo
u/A_g	– Fator de massividade para perfis sem proteção
u_m/A_g	– Fator de massividade para perfis com proteção
A_f	– Área compartimentada
A_t	– Área total (incluindo vedação e aberturas)
A_v	– Área total das aberturas
F_{CP}	– Fator de massividade para elementos estruturais com proteção térmica
H_p/A	– Fator de massividade ou velocidade de aquecimento do perfil
t_{eq}	– Tempo equivalente

$q_{fi,k}$ – Valor característico da carga de incêndio específica

K – Coeficiente que leva em conta as características térmicas dos elementos de vedação

W – Fator relacionado à ventilação do ambiente e à altura de compartimentação

M – Fator de correção que depende do material estrutural

V – Volume do material de proteção

A – Área de placas de gesso acartonado

L – Comprimento do elemento estrutural

b – largura da aba superior ou inferior do perfil

h – Altura interna da alma do perfil

t_f – Espessura da aba

t_w – Espessura da alma

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações iniciais	14
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivo específicos	15
1.3 Organização do trabalho	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Estruturas de aço em situação de incêndio	17
2.2 Curvas de incêndio	19
2.2.1 Conceito geral das curvas de incêndio	19
2.2.2 Incêndio-padrão	22
2.2.2.1 ISO 834 (1999)	22
2.2.2.2 NBR 14432 (2001)	23
2.3 Determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)	25
2.3.1 Resistência ao fogo de elementos estruturais	25
2.3.2 Método tabular.....	26
2.3.2.1 Determinação do grupo e da divisão da edificação	27
2.3.2.2 Determinação da altura da edificação e da profundidade do piso em subsolo	27
2.3.2.3 Determinação do TRRF	28
2.3.3 Método do tempo equivalente	28
2.3.3.1 Carga de incêndio específica	30
2.3.3.2 Coeficiente γ_n	31
2.3.3.3 Coeficiente γ_s	32
2.3.3.4 Coeficiente W	33
2.3.3.5 Coeficiente M	33
2.3.4 Estruturas isentas de verificação estrutural em situação de incêndio	34
2.4 Propriedades do aço em situação de incêndio.....	36
2.4.1 Propriedades mecânicas do aço	36
2.4.1.1 Resistência ao escoamento	36
2.4.1.2 Módulo de elasticidade.....	37
2.4.1.3 Massa específica	38
2.4.2 Propriedades térmicas do aço	39
2.4.2.1 Alongamento.....	39
2.4.2.2 Calor específico	40
2.4.2.3 Condutividade térmica.....	40
2.5 Método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço em incêndio ..	41
2.5.1 Método simplificado de cálculo para elementos com revestimento térmico.....	42
2.6 Fator de massividade e aquecimento do perfil (Hp/A).....	43
2.7 Materiais de proteção térmica	46
2.7.1 Tinta intumescente.....	50
2.7.2 Argamassa projetada.....	53
2.7.3 Placas de gesso acartonado.....	55
2.8 Dimensionamento das espessuras dos materiais de proteção passiva	57
2.9 Otimização de sistemas de proteção passiva contra incêndio.....	59
2.9.1 Otimização.....	59
2.9.1.1 Fundamentos da otimização	59

2.9.1.2 Métodos de otimização	61
2.9.1.3 Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)	63
2.9.1.4 Aplicações da ferramenta Solver	64
3. METODOLOGIA.....	65
3.1 Modelo estrutural	65
3.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)	67
3.2.1 Método tabular.....	67
3.2.2 Método do tempo equivalente	67
3.3 Fator de massividade.....	69
3.4 Levantamento de catálogos técnicos dos materiais	70
3.5 Dimensionamento da espessura e estimativa da quantidade dos materiais de proteção passiva.....	71
3.6 Estimativa de custos para as soluções.....	75
3.7 Otimização dos sistemas de proteção térmica.....	76
3.7.1 Implementação do problema de otimização não linear no Solver do <i>Excel</i>	76
3.7.2 Parâmetros de cálculo adotados na otimização do quantitativo de materiais.....	78
3.7.3 Formulação do problema de otimização.....	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1 Dimensionamento e análise técnico-econômica comparativa dos materiais	82
4.1.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).....	82
4.1.2 Dimensionamento da espessura dos materiais de proteção térmica.....	83
4.1.3 Estimativa da quantidade dos materiais de proteção passiva	85
4.1.4 Estimativa de custos por material de proteção	88
4.2 Otimização dos sistemas de proteção térmica.....	91
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	95
REFERÊNCIAS	96
ANEXOS	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A construção de edificações modernas tem se caracterizado pelo crescente emprego de estruturas metálicas devido à sua rapidez construtiva, leveza e flexibilidade arquitetônica. No entanto, o aço apresenta rápida redução de suas propriedades mecânicas quando exposto a elevadas temperaturas, tornando-se indispensável sua proteção em situação de incêndio (Costa, 2024).

Apesar dos avanços normativos e tecnológicos relacionados à segurança contra incêndio em estruturas metálicas, ainda existe uma lacuna em estudos que integrem o dimensionamento térmico das proteções passivas à análise técnico-econômica e à otimização voltada à redução de materiais e custos. Nesse sentido, torna-se necessário um estudo comparativo entre soluções de proteção passiva para compreender as diferenças técnicas e econômicas associadas a cada solução e avaliar cenários de otimização.

A segurança contra incêndio configura-se como um dos aspectos mais importantes na segurança das edificações e estruturas, visto que proporciona a proteção dos usuários, da edificação e do patrimônio em situação de incêndio (Gravit et al., 2023). Vargas e Silva (2005) complementam que, para garantir a segurança estrutural contra incêndio, é necessário evitar que a temperatura de colapso da estrutura, denominada temperatura crítica, seja atingida.

Mroz, Hager e Korniejenko (2016) comentam que, ao analisar a resistência ao fogo de estruturas metálicas, a existência de sistemas de proteção ativa e passiva contra incêndio não deve ser desconsiderada, pois esses sistemas contribuem para evitar que a temperatura crítica do aço seja atingida. Neste trabalho, serão analisados os sistemas de proteção passiva, por atuarem diretamente na redução da transferência de calor para os elementos estruturais.

Nesse sentido, de acordo com Gewain et al. (2006) e Goode (2004), os diferentes materiais de proteção passiva têm como principal função restringir a elevação da temperatura do aço e podem ser classificados como cimentícios, lã mineral, vermiculita, fibras cerâmicas, intumescentes, sublimáveis e ablativos, entre outros. Esses materiais podem ser aplicados na forma de placas, revestimentos, pulverização e enclausuramento, dependendo das características e condições de aplicação.

Os materiais de proteção passiva contra incêndio podem estar sujeitos a diferentes condições ao longo de sua vida útil, dependendo do ambiente de exposição e da forma de aplicação (Sakkas et al., 2015). Para que o desempenho desses materiais seja garantido durante

a ocorrência de um incêndio, é necessário que sua espessura seja adequadamente dimensionada, de modo a limitar a temperatura do aço abaixo do valor crítico (Sakkas et al., 2013). Essa espessura depende principalmente do tipo de incêndio, do tempo de exposição ao fogo, da relação entre o perímetro exposto e a área da seção transversal dos perfis, além da temperatura crítica adotada (Beyler et al., 2007).

Gravit et al. (2023) comentam que o uso da proteção térmica estrutural pode elevar os custos de projetos de grande porte. Assim, quando se busca alcançar elevados níveis de resistência ao fogo, diferentes sistemas de proteção contra incêndio podem ser empregados, tornando relevante a avaliação econômica das soluções disponíveis. Nesse contexto, Lucherini et al. (2024) aplicaram a análise de custo-benefício para avaliar medidas de segurança em engenharia estrutural de incêndios, evidenciando a importância de considerar os custos econômicos associados às proteções térmicas.

Além da análise econômica, métodos de otimização podem contribuir para a definição de soluções mais eficientes. Assim, Ulusoy (2023) expõe que, na engenharia civil, métodos de otimização capazes de determinar valores ótimos para as variáveis de projeto e para a função objetivo são utilizados para solucionar problemas complexos considerando critérios de segurança e economia.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnico-econômica comparativa de diferentes sistemas de proteção passiva, com base no dimensionamento da espessura dos materiais por métodos tabulares e na posterior aplicação do método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), visando avaliar os impactos econômicos associados aos sistemas de proteção analisados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo técnico-econômico comparativo por meio do dimensionamento e da otimização de diferentes sistemas de proteção passiva contra incêndio aplicados a um modelo estrutural em aço de seis pavimentos.

1.2.2 Objetivo específicos

- Dimensionar as espessuras necessárias dos materiais de proteção térmica com base no

fator de massividade dos perfis metálicos e no Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) adotado;

- Estimar o quantitativo de materiais necessários para a proteção térmica completa do modelo estrutural analisado, considerando diferentes tipologias de elementos estruturais, como vigas e pilares;
- Realizar uma análise técnico-econômica comparativa entre os sistemas de proteção passiva avaliados, visando identificar a solução com maior viabilidade;
- Propor alternativas de otimização para os materiais de proteção térmica, buscando a redução de custos e consumo de material sem comprometer os requisitos de segurança.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, de modo que o Capítulo 1 é destinado aos elementos introdutórios, iniciando com uma contextualização geral do tema, seguida da apresentação dos objetivos da pesquisa e da estrutura geral do estudo.

O Capítulo 2 é dedicado à fundamentação teórica sobre os diferentes sistemas de proteção térmica passiva aplicados a estruturas de aço em situação de incêndio, bem como à aplicação do método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para otimização. Esse capítulo está subdividido em nove subseções, que abordam temas relacionados às estruturas de aço em situação de incêndio, curvas de incêndio, determinação do TRRF, propriedades do aço em elevadas temperaturas, materiais de proteção térmica e otimização dos sistemas de proteção.

No Capítulo 3, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do estudo. O capítulo está dividido em sete subseções, nas quais são descritos os procedimentos utilizados para obtenção dos resultados da análise técnico-econômica comparativa e da posterior otimização dos sistemas de proteção térmica.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos na pesquisa, buscando analisar comparativamente os diferentes sistemas de proteção passiva selecionados e verificar as implicações da otimização nos custos de cada solução.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho, avaliando o atendimento aos objetivos propostos, as principais contribuições do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Ao final do trabalho, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas para o embasamento teórico e os anexos contendo informações complementares empregadas no desenvolvimento da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estruturas de aço em situação de incêndio

Ao longo da história, um número considerável de acidentes envolvendo incêndios têm ocorrido anualmente em diferentes regiões do mundo, ocasionando perdas de vidas humanas, elevados prejuízos econômicos e impactos ambientais adversos (Giriraj e Swaroop, 2022). Neves (1994, apud Bernardes, 2002) define incêndio como uma condição de fogo não controlado, na qual ocorre a combustão de determinado material. A combustão, por sua vez, pode ser entendida como a reação entre um material combustível e um gás comburente, desencadeada pela presença de uma fonte de calor capaz de elevar a temperatura do sistema combustível-comburente.

De acordo com a Associação Internacional de Serviços de Combate a Incêndios e Resgate (*International Association of Fire and Rescue Services – CTIF*), por meio do Centro Mundial de Estatísticas de Incêndios, no relatório nº 30 referente ao ano de 2025, o Brasil figura entre os países com mais de 200 mortes anuais relacionadas a fogo, calor e substâncias quentes. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde, citados pelo CTIF, o país ocupa a 20ª posição no cenário mundial nesse tipo de ocorrência (OMS, 2019, apud CTIF, 2025).

O relatório também apresenta incêndios históricos de grande proporção ocorridos no Brasil, especialmente na cidade de São Paulo. Entre os casos citados, destacam-se o incêndio no Edifício Andraus, em 1972, que resultou em 16 mortes; o incêndio no Edifício Joelma, em 1974, com 227 mortes e cerca de 450 feridos; e o colapso do Edifício Wilton Paes de Almeida, em 2018, que provocou o colapso completo da estrutura, sete mortes e danos a edificações vizinhas. Além desses episódios, destaca-se o incêndio no Edifício Botanik Torre Flora, ocorrido em 2024, na cidade de Recife, Pernambuco, sem registro de vítimas fatais.

Esses eventos evidenciam a importância do estudo do comportamento das estruturas em situação de incêndio, especialmente quanto à capacidade resistente dos elementos estruturais submetidos a elevadas temperaturas. Palhares et al. (2023) apontam que, quando os elementos estruturais de uma edificação são expostos a altas temperaturas, ocorrem alterações significativas em seu comportamento mecânico e estrutural. Entre essas alterações, destacam-se a redução da rigidez e da resistência, fatores que podem comprometer elementos isolados ou desencadear o colapso progressivo da estrutura. Buchanan e Abu (2017) também destacam a possibilidade de surgimento de esforços adicionais decorrentes de ações internas indiretas associadas aos efeitos térmicos.

No setor da construção civil, o aço apresenta diversas vantagens, como elevada resistência mecânica, rapidez de execução, possibilidade de industrialização e flexibilidade arquitetônica, o que favorece sua utilização como material estrutural. Em temperatura ambiente, o comportamento do aço e seus métodos de dimensionamento são amplamente estudados e consolidados em normas nacionais e internacionais, como a ABNT NBR 8800 (2024). Entretanto, os estudos relacionados ao dimensionamento de elementos de aço em situação de incêndio são mais recentes e vêm ganhando destaque em razão de sua relevância para a segurança das edificações (Marcelino; Azevedo; Calenzani, 2022).

Marcelino, Azevedo e Calenzani (2022) enfatizam que as consequências de um incêndio podem ser severas, uma vez que as altas temperaturas afetam diretamente as propriedades mecânicas do aço, reduzindo seu desempenho estrutural. No Brasil, com o objetivo de garantir a segurança da edificação e a preservação da vida humana, as estruturas de aço e mistas de aço e concreto devem ser projetadas em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 14323 (2013).

Gierczak et al. (2013) comentam que determinadas soluções técnicas podem apresentar bom desempenho em condições normais de utilização, mas se tornar desvantajosas durante um incêndio. Segundo os autores, estruturas de aço expostas ao fogo, em condições extremas, podem perder rapidamente sua capacidade resistente. Um exemplo citado ocorreu em Lubán, na Polônia, em junho de 2012, durante um incêndio em uma unidade de produção. A edificação, construída com elementos de aço de paredes finas, com espessura de 3 mm, entrou em colapso após aproximadamente 17 minutos de incêndio.

Diante desse contexto, Rodrigues e Oliveira (2021) sugerem que a segurança contra incêndio deve ser integrada ao projeto estrutural, de modo que os elementos mantenham estabilidade e capacidade resistente durante o período necessário para a evacuação dos usuários e para as ações de combate ao fogo. As medidas de segurança em situação de incêndio constituem, portanto, um aspecto fundamental da segurança geral de edificações e estruturas, contribuindo para a proteção das pessoas, do patrimônio e do meio ambiente diante de situações de emergência (Gravit et al., 2026).

Em condição de incêndio, a maior prioridade é a proteção da vida humana e na sequência a proteção da estrutura, objetivos que estão intimamente ligados. A inadequada proteção da edificação muitas vezes inviabiliza a evacuação eficiente das pessoas, podendo resultar em sérias consequências. Com isso, no projeto de uma estrutura, deve-se projetar com uma classe de resistência ao fogo adequada para permitir que os usuários esvaziem o espaço na

ocorrência de incêndio e reduzir o colapso estrutural (Biegus, 2013; Bilotta, Silva e Nigro, 2016, apud Kubicka, Pawlak e Randón, 2019).

De acordo com Giriraj e Swaroop (2022), a resistência ao fogo se mostra como um elemento essencial para garantir que qualquer estrutura se mantenha segura em situação de incêndio. Os autores consideram que com base em regulamentos europeus de segurança de componentes estruturais, três critérios básicos de desempenho precisam ser atendidos, sendo eles a resistência estrutural, estanqueidade e isolamento térmico.

Diante disso, Marcelino, Azevedo e Calenzani (2022) sugerem que algumas medidas podem ser adotadas para aumentar o tempo de resistência ao fogo da estrutura, como a utilização de materiais de proteção contra incêndio como argamassas, placas rígidas e tintas intumescentes. Mróz, Hager e Korniejenko (2016) acrescentam que esses materiais funcionam como uma proteção térmica que busca impedir que a temperatura do elemento estrutural aumente excessivamente e atinja sua temperatura crítica durante a ocorrência do incêndio.

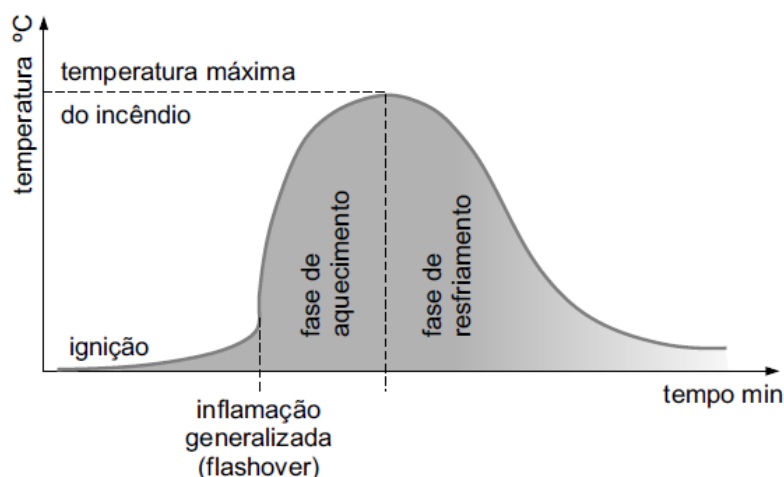
2.2 Curvas de incêndio

2.2.1 Conceito geral das curvas de incêndio

Silva (1997) comenta que a ação térmica sobre a estrutura está associada à transferência de calor, por radiação e/ou convecção, resultante da diferença de temperatura entre os gases quentes do ambiente em situação de incêndio e os elementos estruturais. Como consequência dessa exposição térmica, ocorre o aumento da temperatura nos elementos da estrutura, o que pode provocar a redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade do aço, além de gerar esforços solicitantes adicionais decorrentes dos efeitos térmicos.

A análise de estruturas em situação de incêndio pode envolver três etapas principais: modelagem do incêndio, análise térmica e análise estrutural. No escopo desta seção, voltada à modelagem do incêndio, Guimarães (2007) afirma que o incêndio pode ser representado por meio de uma curva temperatura-tempo, conforme apresentado na Figura 2.1. Essa curva descreve a evolução da temperatura dos gases quentes no ambiente ao longo do tempo, constituindo um dado de entrada para a análise térmica. Dessa forma, ela não determina diretamente a temperatura dos elementos estruturais nem sua capacidade resistente, mas fornece a condição térmica necessária para que, posteriormente, seja avaliada a elevação de temperatura nos elementos e verificada sua resistência em situação de incêndio.

Figura 2.1 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real



Fonte: Vargas e Silva (2005).

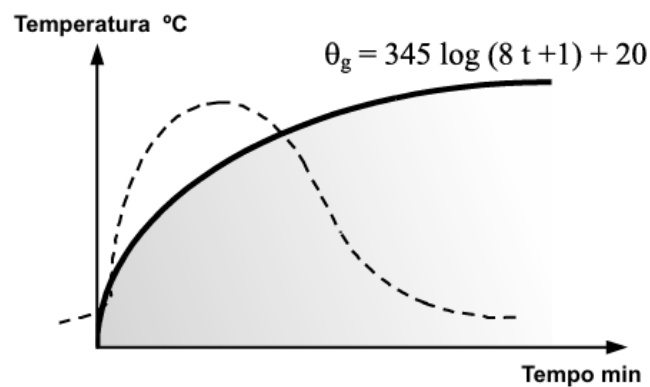
A região inicial da curva, denominada ignição, apresenta temperaturas relativamente baixas, sendo o incêndio considerado de pequena proporção. Nessa fase, em geral, o fogo ainda não oferece riscos significativos à vida humana ou à estrutura. Durante esse período, medidas de proteção à vida, como chuveiros automáticos, detectores de fumaça, brigada de incêndio, entre outras, tendem a ser suficientes para a extinção do fogo, não sendo necessárias verificações adicionais da estrutura em situação de incêndio caso o sinistro seja controlado nessa etapa (Silva, 1997).

O instante em que ocorre um aumento repentino na taxa de elevação da curva temperatura-tempo é denominado *flashover*, ou inflamação generalizada. Esse fenômeno ocorre quando as superfícies dos materiais combustíveis presentes no ambiente entram em ignição de forma generalizada. A partir dessa fase, o incêndio passa a atingir grande magnitude, envolvendo todo o compartimento, e a temperatura dos gases aumenta rapidamente até que grande parte do material combustível seja consumida. Após a inflamação generalizada, ocorre uma redução gradual da temperatura dos gases no ambiente incendiado, caracterizando a fase de resfriamento (Silva, 2005).

Silva (2005) ainda comenta que, se as medidas de proteção não forem suficientes para extinguir as chamas na fase anterior à inflamação generalizada, torna-se necessária a verificação da estrutura em situação de incêndio, considerando a ação térmica sobre os elementos estruturais. Para isso, pode-se utilizar um modelo de incêndio baseado em curvas temperatura-tempo, obtidas a partir de ensaios experimentais e modelos matemáticos representativos de incêndios reais. Nessa modelagem, podem ser considerados parâmetros como a quantidade de material combustível, representada pela carga de incêndio, o fator de abertura do compartimento, entre outros. Esse modelo é conhecido como Modelo de Incêndio Natural.

Como a curva temperatura-tempo de um incêndio real depende de diversos parâmetros e varia conforme as características de cada situação, sua determinação pode ser complexa. Por esse motivo, convencionou-se o uso de curvas padronizadas como referência para análises experimentais de estruturas e materiais de proteção térmica em situação de incêndio. Esse modelo é denominado Modelo de Incêndio-Padrão, conforme apresentado na Figura 2.2. Ressalta-se, entretanto, que essa curva não representa necessariamente o comportamento de um incêndio real. Assim, as conclusões obtidas com base nesse modelo devem ser analisadas com cautela, uma vez que a curva padronizada não reproduz integralmente o desenvolvimento térmico de um incêndio real nem, por si só, o comportamento dos elementos estruturais expostos ao fogo (Vargas e Silva, 2005).

Figura 2.2 – Modelo de incêndio-padrão



Fonte: Vargas e Silva (2005).

Vargas e Silva (2005) comentam que, em razão da dificuldade de determinar a curva temperatura-tempo de um incêndio real, as normas brasileiras adotam uma curva padronizada como modelo de análise. É o caso da ABNT NBR 14432 (2001), que define a curva de incêndio-padrão como a “elevação padronizada da temperatura em função do tempo”. Nesse sentido, Costa (2024) acrescenta que, na Figura 2.2, a linha tracejada representa uma situação de incêndio real, enquanto a linha contínua corresponde à evolução da temperatura dos gases com base na equação normativa.

No Brasil, o estudo do comportamento de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio é tratado pela ABNT NBR 14323 (2013). Essa norma estabelece os princípios gerais para o projeto de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio, considerando os estados limites aplicáveis aos elementos dimensionados com base na ABNT NBR 8800 (2024) e na ABNT NBR 14762 (2024).

A ABNT NBR 14323 (2013) estabelece que os elementos estruturais de aço e mistos devem ser dimensionados à temperatura ambiente conforme as normas aplicáveis a perfis laminados, soldados e formados a frio. Além da verificação da estrutura para os estados limites últimos à temperatura ambiente, deve ser realizada também a verificação em situação de incêndio. Essa verificação tem como finalidade principal evitar o colapso estrutural durante o tempo necessário à evacuação segura dos usuários da edificação em chamas.

Neste trabalho será dada uma ênfase ao modelo do incêndio-padrão, que é o modelo de incêndio adotado pelas normas brasileiras.

2.2.2 Incêndio-padrão

Segundo Rodrigues e Oliveira (2021), a determinação da evolução da temperatura dos gases quentes ao longo do tempo é um processo complexo, pois depende de diversas variáveis associadas às características do ambiente, da carga de incêndio, da ventilação e dos materiais presentes no compartimento. Diante dessa complexidade, convencionou-se o uso de curvas padronizadas para a análise de estruturas e elementos construtivos em situação de incêndio, denominadas curvas de incêndio-padrão.

As curvas de incêndio-padrão representam a elevação padronizada da temperatura dos gases quentes em função do tempo, geralmente expresso em minutos. É importante destacar que essas curvas descrevem a evolução da temperatura dos gases no ambiente incendiado, não correspondendo diretamente à temperatura dos elementos estruturais. A temperatura atingida por esses elementos depende da análise térmica, das propriedades do material, da geometria da seção, do fator de massividade e da existência ou não de proteção térmica.

As principais curvas padronizadas são citadas em diferentes normas como o EUROCODE 1 (1995), ASTM E119 (1988), ISO 834 (1999) e NBR 14432 (2001). As duas últimas normas contam com breve descrição na sequência, por embasarem este trabalho.

2.2.2.1 ISO 834 (1999)

A *International Organization for Standardization*, por meio da ISO 834 (1999), apresenta a curva temperatura-tempo padronizada frequentemente utilizada para representar incêndios com predominância de materiais celulósicos. Essa curva é expressa pela Equação 2.1 e também é adotada em outras referências normativas, como o EUROCODE 1 (1995), para fins de ensaio e verificação da resistência ao fogo.

$$\theta_g = 20 + 345 \log (8t + 1) \quad (2.1)$$

Em que:

θ_g : temperatura dos gases (°C);

t : tempo de exposição ao incêndio (minutos).

Além da curva-padrão, a literatura técnica e o EUROCODE 1 apresentam outras curvas nominais de incêndio, como a curva de hidrocarbonetos e a curva de incêndio externo. A curva de hidrocarbonetos é aplicada a situações em que há predominância de combustíveis com elevada taxa de liberação de calor, enquanto a curva de incêndio externo representa uma condição de exposição térmica externa aos elementos construtivos.

A curva de incêndio externo pode ser expressa pela Equação 2.2:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2.2)$$

Onde:

θ_g : temperatura dos gases (°C);

t : tempo de exposição ao incêndio (minutos).

Considera-se, geralmente, a temperatura inicial do ambiente igual a 20 °C.

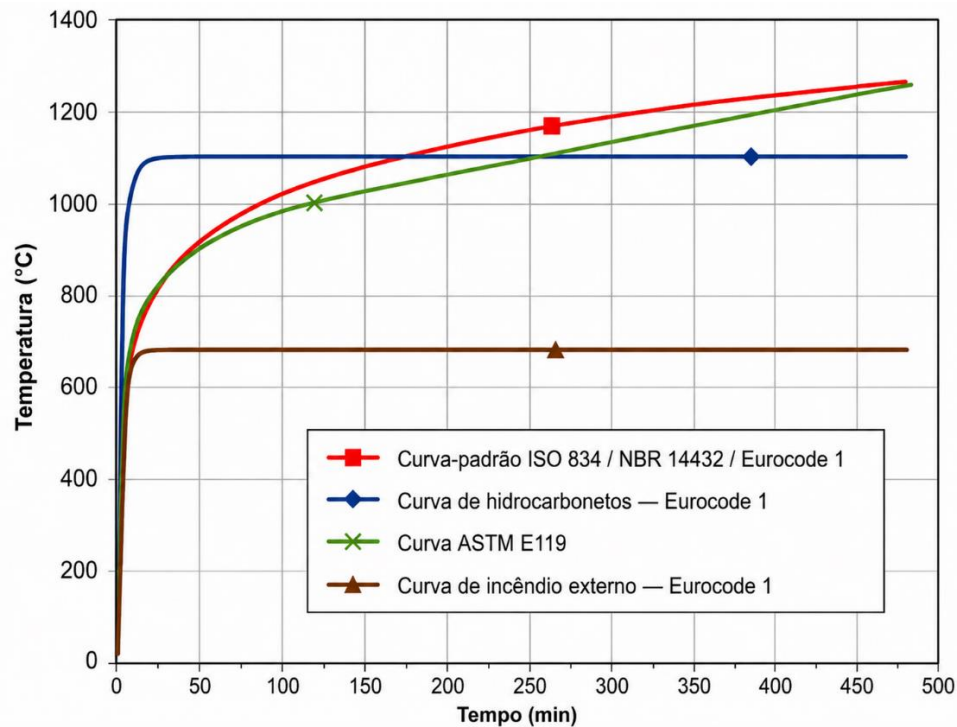
2.2.2.2 NBR 14432 (2001)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 14432 (2001), estabelece exigências de resistência ao fogo para elementos construtivos de edificações. No contexto da verificação em situação de incêndio, a norma adota a curva temperatura-tempo padronizada, correspondente à curva-padrão utilizada também pela ISO 834, para representar a elevação da temperatura dos gases quentes em função do tempo.

Essa curva não representa, necessariamente, o comportamento de um incêndio real, mas constitui uma referência convencional para ensaios, verificações normativas e procedimentos simplificados de dimensionamento em situação de incêndio.

A Figura 2.3 apresenta uma comparação entre as curvas temperatura-tempo adotadas pelas normas mencionadas na subseção 2.2.2.

Figura 2.3 – Curvas temperatura-tempo nominais para diferentes modelos de incêndio



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2013).

Na subseção seguinte, apresenta-se a aplicação da curva de incêndio-padrão no cálculo simplificado utilizado para subsidiar a análise térmica e o dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio.

2.2.3 Aplicação da curva de incêndio-padrão no cálculo simplificado para dimensionamento

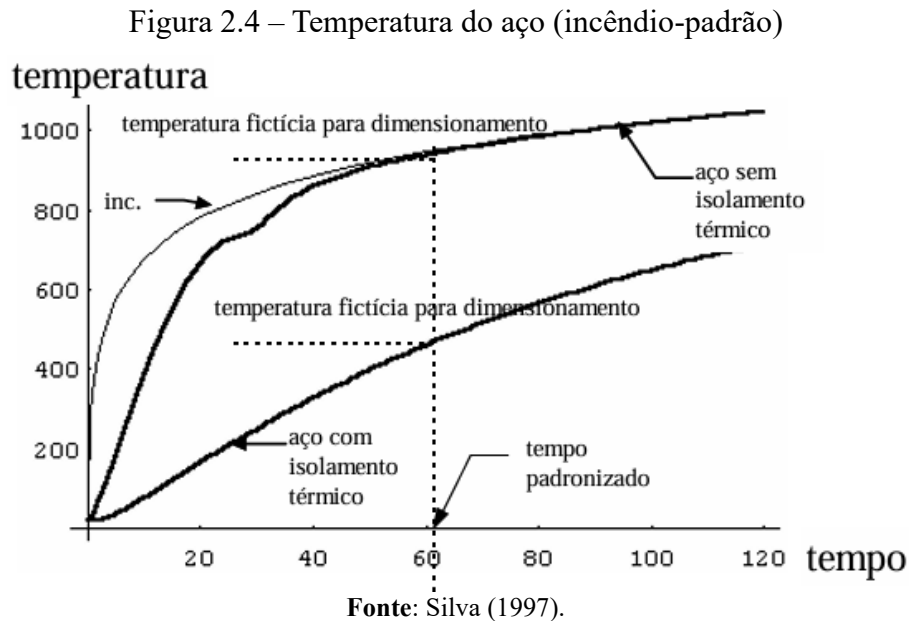
Silva (1997) aponta que, após a definição da curva temperatura-tempo, é possível realizar a análise térmica do elemento estrutural. Essa análise permite determinar a evolução da temperatura no aço ao longo do tempo, considerando os mecanismos de transferência de calor e as propriedades térmicas do material.

No caso do incêndio-padrão, a curva temperatura-tempo fornece a temperatura dos gases quentes no ambiente em função do tempo de exposição ao fogo. A partir dessa informação, calcula-se a elevação da temperatura no elemento estrutural, que depende de variáveis como o fator de massividade, as propriedades térmicas do aço e a presença ou ausência de material de proteção térmica.

Assim, a curva de incêndio-padrão não determina diretamente a temperatura máxima do aço nem sua capacidade resistente. Ela atua como dado de entrada para a análise térmica, a partir da qual se obtém a temperatura do elemento estrutural. Posteriormente, essa temperatura

é utilizada na verificação da capacidade resistente da estrutura em situação de incêndio, conforme os procedimentos normativos aplicáveis, como os apresentados na ABNT NBR 14323 (2013) e no EUROCODE 3 (1995).

A Figura 2.4 exemplifica a evolução da temperatura dos gases quentes do ambiente e do elemento de aço, com e sem isolamento térmico, quando submetido ao incêndio-padrão.



De modo geral, o tempo de exposição ao incêndio-padrão é definido a partir das exigências de resistência ao fogo aplicáveis à edificação, considerando aspectos como uso, ocupação, altura e características construtivas. Esse tempo é utilizado na análise térmica para determinar a temperatura atingida pelo elemento estrutural e, em seguida, subsidiar sua verificação em situação de incêndio.

Dessa forma, torna-se necessário compreender como esse tempo mínimo de resistência ao fogo é estabelecido pelas normas e regulamentos aplicáveis. Nesse contexto, destaca-se o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), parâmetro utilizado para definir o período durante o qual os elementos construtivos devem manter desempenho adequado quando submetidos ao incêndio-padrão.

2.3 Determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

2.3.1 Resistência ao fogo de elementos estruturais

De acordo com Vargas e Silva (2005), a verificação da segurança estrutural de elementos de aço em situação de incêndio requer o conhecimento das exigências de resistência ao fogo aplicáveis aos componentes da edificação. No estado de Alagoas, essa análise deve considerar a Instrução Técnica nº 08 do Corpo de Bombeiros Militar de Alagoas (CBMAL, 2021), bem como as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 14432 (2001), norma técnica brasileira que trata das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações.

Os autores destacam que, em normas, códigos e regulamentos nacionais e internacionais, a segurança contra incêndio é frequentemente estabelecida com base em um período mínimo de resistência ao fogo, associado à exposição ao incêndio-padrão, e não diretamente a uma temperatura limite. Na ABNT NBR 14432 (2001), esse período é denominado Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), correspondente ao tempo mínimo durante o qual um elemento construtivo deve manter desempenho adequado quando submetido ao incêndio-padrão.

A exigência de resistência ao fogo é usualmente expressa em termos de tempo, por meio do TRRF ou do tempo equivalente, sendo definida em função de parâmetros como altura da edificação, uso e ocupação, área do pavimento e medidas de proteção contra incêndio disponíveis. Quanto maior o risco à vida humana e à segurança da edificação, mais rigorosa tende a ser essa exigência, resultando em maiores valores de TRRF (Vargas e Silva, 2005).

A partir dessa definição, torna-se necessário estabelecer o procedimento utilizado para determinar o TRRF da edificação analisada. De modo geral, essa determinação pode ser realizada por métodos prescritivos, como o método tabular, ou por procedimentos alternativos, como o método do tempo equivalente. Neste trabalho, apresentam-se inicialmente os critérios associados ao método tabular, por ser uma abordagem direta e amplamente utilizada em verificações normativas e, na sequência, o método do tempo equivalente.

2.3.2 Método tabular

Embora o conceito de TRRF seja adotado em diversos países, os valores de referência podem variar conforme as normas e regulamentações nacionais. Vargas e Silva (2005) apresentam exemplos comparativos, indicando que, à época, na Nova Zelândia, o TRRF máximo era de 60 minutos; nos Estados Unidos, podia atingir 180 minutos para pilares de edifícios altos; no Reino Unido, o valor máximo era de 120 minutos; e, no Japão, em edifícios altos, os pavimentos inferiores apresentavam maiores exigências de resistência ao fogo do que os pavimentos superiores.

Os autores também destacam que, no método tabular, o TRRF resulta de critérios normativos e de consenso técnico adotados em cada país. Dessa forma, esse tempo não representa, necessariamente, a duração real do incêndio, o tempo de evacuação dos ocupantes ou o tempo de chegada do corpo de bombeiros ao local.

Para a aplicação do método tabular, devem ser identificadas as características da edificação que influenciam a definição do TRRF, tais como grupo de ocupação, divisão da edificação, altura e eventual profundidade de subsolo. Esses parâmetros são utilizados para consulta às tabelas normativas correspondentes.

2.3.2.1 Determinação do grupo e da divisão da edificação

A ABNT NBR 14432 (2001) classifica as edificações quanto à ocupação em dez grupos distintos, identificados de A a J. Esses grupos são subdivididos de acordo com as características de uso da edificação, conforme apresentado no Anexo A deste trabalho. Assim, cabe ao responsável técnico identificar o grupo, a ocupação e a divisão nos quais a edificação analisada se enquadra.

Além da classificação apresentada pela ABNT NBR 14432 (2001), algumas regulamentações estaduais podem incluir categorias adicionais. No caso da IT 08 do CBMAL (2021), são acrescentados os grupos L e M, referentes, respectivamente, às edificações destinadas ao armazenamento ou à produção de materiais explosivos e às edificações especiais.

2.3.2.2 Determinação da altura da edificação e da profundidade do piso em subsolo

Rodrigues e Oliveira (2021) comentam que o projetista deve identificar a altura da edificação e, quando houver, a profundidade do piso em subsolo. A altura da edificação é definida como a distância vertical entre o nível de descarga, correspondente ao ponto de saída da edificação, e o piso do penúltimo pavimento, desconsiderando-se pavimentos técnicos, barriletes, casas de máquinas e demais áreas sem permanência humana.

A profundidade do subsolo, por sua vez, corresponde à distância vertical entre o nível de descarga e o piso do subsolo considerado. Esses parâmetros são relevantes porque influenciam diretamente as exigências de resistência ao fogo estabelecidas nas tabelas normativas.

2.3.2.3 Determinação do TRRF

Após a identificação do grupo de ocupação, da divisão, da altura da edificação e da eventual profundidade de subsolo, o TRRF pode ser determinado por meio das tabelas da ABNT NBR 14432 (2001), apresentadas no Anexo B deste trabalho.

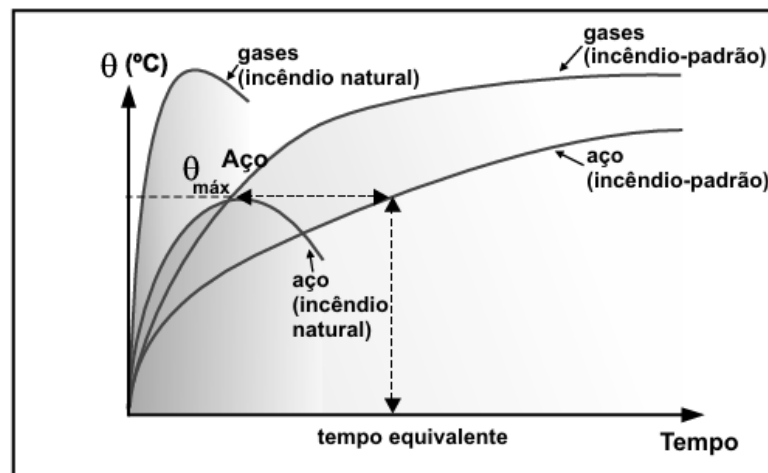
Nessas tabelas, os valores indicados entre parênteses correspondem às situações específicas em que podem ser adotados para subsolos com área bruta de cada pavimento menor ou igual a 500 m² e para edificações nas quais os pavimentos localizados acima do subsolo possuam área menor ou igual a 750 m².

2.3.3 Método do tempo equivalente

Vargas e Silva (2005) comentam que, como os ensaios de resistência ao fogo de estruturas, materiais de proteção térmica, portas corta-fogo e outros elementos construtivos são realizados com base em curvas padronizadas de aquecimento, diversos autores propuseram métodos para correlacionar o desempenho obtido nesses ensaios com condições mais próximas de um incêndio real. Entre esses procedimentos, destaca-se o método do tempo equivalente.

O método do tempo equivalente busca estabelecer uma correspondência entre os efeitos térmicos produzidos por um incêndio natural e aqueles produzidos pela exposição ao incêndio-padrão. Enquanto a curva temperatura-tempo do incêndio-padrão apresenta crescimento contínuo da temperatura dos gases, o incêndio natural apresenta uma fase de aquecimento, seguida por uma fase de resfriamento, após atingir sua temperatura máxima, conforme ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Método do tempo equivalente



Fonte: Vargas e Silva (2005).

Nesse contexto, o tempo equivalente pode ser entendido como o tempo de exposição ao incêndio-padrão necessário para produzir, no elemento estrutural, efeito térmico equivalente ao observado no incêndio natural. Assim, o método não representa diretamente a duração real do incêndio, mas uma forma simplificada de associar o incêndio natural à curva-padrão utilizada em ensaios e verificações normativas.

Costa e Silva (2005) acrescentam que o método do tempo equivalente permite determinar, na curva de incêndio-padrão, um tempo fictício associado à temperatura máxima atingida pelo elemento estrutural quando exposto a um incêndio natural. Com base na curva natural, essa temperatura corresponde à máxima temperatura do elemento (Silva, 2004).

As normas ABNT NBR 15200 (2024), voltada ao projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, e ABNT NBR 14323 (2013), voltada ao projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio, bem como a IT 08 do CBMAL (2021), apresentam procedimentos associados ao método do tempo equivalente. No contexto dessas normas, esse método é utilizado para verificar a possibilidade de redução do TRRF obtido pelo método tabular, limitada a, no máximo, 30 minutos, desde que sejam atendidas as condições normativas aplicáveis.

Dessa forma, o método do tempo equivalente não deve ser interpretado como uma redução automática do TRRF. A redução somente pode ser considerada quando o tempo equivalente (t_e) calculado indicar condições favoráveis de segurança contra incêndio, levando em conta parâmetros relacionados ao desenvolvimento do incêndio e às características da edificação.

De acordo com Silva (2016), a adoção do tempo equivalente em substituição ao TRRF tabular deve obedecer aos seguintes critérios: se $\text{TRRF} - 30 \text{ min} < t_e < \text{TRRF}$, então o TRRF poderá ser substituído pelo valor de t_e ; por sua vez, se $t_e < \text{TRRF} - 30 \text{ min}$, o valor do TRRF poderá ser substituído por $\text{TRRF} - 30 \text{ min}$, por fim, se $t_e > \text{TRRF}$, adota-se o TRRF.

Segundo a ABNT NBR 14432 (2001), o método do tempo equivalente considera parâmetros relacionados ao desenvolvimento do incêndio e às características da edificação, como carga de incêndio específica, propriedades térmicas dos elementos de vedação, sistemas de proteção ativa, grau de ventilação dos compartimentos, altura de compartimentação e tecnologia construtiva empregada.

O tempo equivalente pode ser calculado por meio da Equação 2.3, conforme apresentado por Costa e Silva (2005), pela ABNT NBR 15200 (2024), pela ABNT NBR 14323 (2013) e pela IT 08 do CBMAL (2021).

$$t_{eq} = q_{fi,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot K \cdot W \cdot M \quad (2.3)$$

Em que:

t_{eq} : tempo equivalente (min);

$q_{fi,k}$: valor característico da carga de incêndio específica (MJ/m²);

γ_n : coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa da edificação (Equação 2.4);

γ_s : coeficiente adimensional de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação (Equação 2.5);

K : coeficiente que leva em conta as características térmicas dos elementos de vedação (usualmente, K é tomado como 0,07 min.m²/MJ);

W : fator relacionado à ventilação do ambiente e à altura de compartimentação (Equação 2.7);

M : fator de correção que depende do material estrutural (Tabela 2.4).

2.3.3.1 Carga de incêndio específica

De acordo com a ABNT NBR 14432 (2001), a carga de incêndio pode ser definida como a soma das energias que poderiam ser liberadas pela completa combustão dos materiais presentes no espaço, incluindo os revestimentos das paredes, tetos e pisos. Enquanto por sua vez a carga de incêndio específica de um compartimento é determinada pela relação entre a carga de incêndio e a área de piso considerada do compartimento.

A carga de incêndio específica pode ser calculada por meio dos procedimentos indicados por Silva (1997) e pela ABNT NBR 14432 (2001). Considerando a dificuldade de encontrar o valor característico de alguns parâmetros, comumente se utilizam de tabelas normativas padronizadas para cada tipo de ocupação. A Tabela 2.1 apresenta os valores de carga de incêndio para diferentes tipos de ocupação conforme a ABNT NBR 14432 (2001).

Tabela 2.1 - Valores característicos das cargas de incêndio específicas

Descrição	Carga específica de incêndio (q_{fi}) MJ/m²
Residências	300
Hotéis	500
Comércio de automóveis	200
Livrarias	1000
Comércio de móveis	300
Comércio de produtos têxteis	400
Supermercados	300
Agências bancárias	300
Escritórios	700
Escolas	300
Bibliotecas	2000
Cinemas ou teatros	600
Igrejas	200
Hospitais	300
Indústria de materiais sintéticos ou plásticos	2000
Laboratórios químicos	600
Indústrias têxteis em geral	700
Indústrias metalúrgicas	200
Indústria de tinta e solventes	4000

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 14432 (2001).

2.3.3.2 Coeficiente γ_n

O coeficiente γ_n , que leva em consideração a presença dos sistemas de proteção ativa, é determinado a partir da Equação 2.4 proposta por Costa e Silva (2005):

$$\gamma_n = \gamma_{n1} \cdot \gamma_{n2} \cdot \gamma_{n3} \quad (2.4)$$

Onde:

$\gamma_{n1} \cdot \gamma_{n2} \cdot \gamma_{n3}$: coeficientes relacionados às medidas de segurança contra incêndio, conforme a Tabela 2.2. Na não existência de algum sistema de proteção, deve-se adotar $\gamma_{ni} = 1$ para o respectivo sistema.

Tabela 2.2 - Fatores de ponderação das medidas de segurança contra incêndio

Valores de γ_{n1} , γ_{n2} e γ_{n3}			
Existência de chuveiros automáticos γ_{n1}	Brigada contra incêndio γ_{n2}		Existência de detecção automática γ_{n3}
	Não profissional	Profissional	
0,60	0,90	0,60	0,90

Fonte: Adaptado de Costa e Silva (2005).

2.3.3.3 Coeficiente γ_s

O coeficiente γ_s depende do risco de ignição e propagação do incêndio, assim como das consequências do colapso estrutural (admissional). Costa e Silva (2005) indicam que esse coeficiente pode ser obtido a partir da Equação 2.5:

$$\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2} \quad (2.5)$$

Em que:

γ_{s1} : coeficiente relativo à área de piso compartimentada e à altura da edificação;

γ_{s2} : coeficiente relativo ao risco de ativação do incêndio.

O coeficiente γ_{s1} pode ser determinado por meio da Equação 2.6:

$$\gamma_{s1} = 1 + \frac{A_f \cdot (h + 3)}{100.000} \quad (2.6)$$

Sendo que:

A_f : área compartimentada (m²);

h : altura da edificação (m).

Por sua vez o coeficiente γ_{s2} pode ser encontrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de γ_{s2} em função do risco de ativação

γ_{n2}	Risco de ativação do incêndio	Exemplos de ocupação
0,85	Pequena	Escola, galeria de arte, parque aquático, igreja, museu.
1,0	Normal	Biblioteca, cinema, correio, consultório médico, escritório, farmácia, frigorífico, hotel, livraria, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, teatro, depósitos (produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas, venda de acessórios de automóveis) e depósitos em geral.
1,2	Média	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica.
1,5	Alta	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis.

Fonte: Adaptado de Costa e Silva (2005).

2.3.3.4 Coeficiente W

Ainda de acordo com Costa e Silva (2005), o coeficiente W leva em consideração a ventilação do ambiente e a altura do compartimento, e pode ser determinado pela Equação 2.7.

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3} \cdot \left[0,62 + 90 \cdot \left(0,4 - \left(\frac{A_v}{A_f}\right)\right)^4\right] \geq 0,50 \quad (2.7)$$

Onde:

H : altura do compartimento (m);

A_v : área de ventilação vertical, incluindo portas, janelas e aberturas (m²);

A_f : área compartimentada (m²).

2.3.3.5 Coeficiente M

Os autores acrescentam que o coeficiente M considera o material escolhido para a estrutura da edificação e pode ser determinado por meio da Tabela 2.4 e da Equação 2.9. Sendo v o grau de ventilação do compartimento, compreendido entre o intervalo $0,02 \text{ m}^{1/2} \leq v \leq 0,2 \text{ m}^{1/2}$.

Tabela 2.4 - Coeficiente M

Material estrutural	M
Concreto armado	1,0
Aço com revestimento contra fogo	1,0
Aço sem revestimento contra fogo	$13,7 \cdot v$
Estruturas mistas de aço e concreto	*

*Adotar o valor mais desfavorável de M.

Fonte: Rodrigues e Oliveira (2021).

Sendo o valor de v dado pela Equação 2.8:

$$v = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (2.8)$$

Em que:

A_v : área de ventilação vertical, incluindo portas, janelas e aberturas (m^2);

A_t : área total do compartimento, que inclui paredes, piso, teto e aberturas (m^2);

h_{eq} : altura média das aberturas, calculada por meio da Equação 2.9.

$$h_{eq} = \frac{\sum(h_i \cdot A_{vi})}{\sum A_v} \quad (2.9)$$

Sendo:

h_i : altura da abertura i (m);

A_{vi} : área de abertura i (m^2).

2.3.4 Estruturas isentas de verificação estrutural em situação de incêndio

Vargas e Silva (2005) destacam que o comportamento de uma estrutura em situação de incêndio e sua resistência ao fogo dependem de diversos fatores, tais como as condições de exposição ao fogo, o sistema estrutural adotado, o cenário de incêndio, as condições de propagação das chamas, as medidas de segurança contra incêndio disponíveis e os recursos relacionados ao combate ao incêndio. Dessa forma, cada edificação pode apresentar uma resposta específica quando submetida à ação térmica decorrente do incêndio.

Em razão dessa variabilidade e considerando situações em que o risco à vida humana é reduzido, determinadas edificações podem ser dispensadas da verificação de resistência ao

fogo. Essas situações são tratadas pela ABNT NBR 14432 (2001), que apresenta critérios de isenção aplicáveis a casos específicos.

Pannoni (2007) acrescenta que os critérios de isenção estão associados, principalmente, à baixa probabilidade de ocorrência de acidentes graves em edificações de pequeno porte, nas quais a evacuação dos ocupantes tende a ser mais simples, como estruturas térreas ou edificações com pequena área construída. A Tabela 2.5 apresenta, de forma resumida, as situações de isenção previstas pela ABNT NBR 14432 (2001).

Tabela 2.5 – Edificações isentas de verificação de acordo com ABNT NBR 14432 (2001)

ISENÇÕES SEGUNDO A NBR				
Ocupação	Área, m ²	Densidade de Carga de Incêndio (MJ/m ²)	Altura	Equipamentos de Proteção de Incêndio ^a
Qualquer	< 750	Qualquer	Qualquer	Mínimo
Qualquer	≤ 1500	≤ 1000	≤ 2 pavimentos	Mínimo
Estádios, aeroportos, estações ferroviárias	Qualquer	Qualquer	< 23 m	Mínimo
Estacionamento aberto ^b	Qualquer	Qualquer	≤ 30 m	Mínimo
Lojas ^c	Qualquer	Incombustível	< 30 m	Mínimo
Qualquer	Qualquer	≤ 500	Térrea	Mínimo
Industrial ^c	Qualquer	< 1200	Térrea	Mínimo
Lojas ^c	Qualquer	≤ 2000	Térrea	Mínimo
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Térrea	Chuveiros ^d
Qualquer	≤ 5000	Qualquer	Térrea	Duas fachadas para acesso dos bombeiros ^e

^a Mínimo por lei

^b Estruturas de concreto ou aço, mas com vigas compostas e fatores de forma mínimos de 250 m⁻¹ para colunas e 350 m⁻¹ para vigas

^c Compartimentação em conformidade com outras Normas Brasileiras

^d Em conformidade com outras Normas Brasileiras

^e Perímetro das fachadas³ 50% do perímetro da edificação

Fonte: Adaptado Pannoni (2007).

Rodrigues e Oliveira (2021) complementam que essas isenções não se aplicam a edificações cujos ocupantes apresentem mobilidade reduzida ou restrita, como hospitais, penitenciárias, asilos e edificações de natureza semelhante. Também não se aplicam a edificações térreas cuja cobertura exerça função de piso, ainda que essa utilização ocorra apenas para fins de saída de emergência. Os autores acrescentam que todas as edificações devem possuir saídas de emergência em conformidade com a ABNT NBR 9077 (2025).

A ABNT NBR 14432 (2001) define edificação térrea como aquela constituída por apenas um pavimento, admitindo-se a existência de um piso elevado, desde que sua área seja igual ou inferior a um terço da área do piso localizado no nível de descarga.

2.4 Propriedades do aço em situação de incêndio

De acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), quando submetido a temperaturas elevadas, o aço apresenta alterações em suas propriedades mecânicas, físicas e térmicas, as quais devem ser consideradas na análise de estruturas em situação de incêndio. Essas alterações influenciam diretamente a resposta térmica e a capacidade resistente dos elementos estruturais, sendo fundamentais para a verificação da segurança da estrutura.

Entre as propriedades mecânicas mais relevantes destacam-se a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade, que sofrem redução com o aumento da temperatura. Além disso, devem ser consideradas propriedades térmicas, como o calor específico e a condutividade térmica, bem como propriedades físicas e deformacionais, como a massa específica e o alongamento térmico.

2.4.1 Propriedades mecânicas do aço

2.4.1.1 Resistência ao escoamento

A ABNT NBR 14323 (2013) estabelece que, em temperaturas elevadas, ocorre redução da resistência ao escoamento do aço. Essa redução deve ser considerada por meio de fatores de redução aplicados aos valores de referência determinados à temperatura ambiente, usualmente adotada como 20 °C.

A norma apresenta fatores de redução da resistência ao escoamento em função da temperatura do aço, considerando uma taxa de aquecimento entre 2 °C/min e 50 °C/min. Esses fatores permitem determinar a resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada a partir da resistência correspondente à temperatura ambiente.

As Equações 2.10 e 2.11 representam os fatores de redução associados à resistência do aço em temperaturas elevadas.

$$K_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (2.10)$$

$$K_{\sigma,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (2.11)$$

Em que:

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento dos aços laminados quentes;

$f_{y,\theta}$: resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a ;

f_y : resistência ao escoamento do aço a 20 °C;

$K_{\sigma,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento dos aços sujeitos à flambagem local.

A Tabela 2.6 apresenta alguns fatores de redução da resistência do aço ao escoamento.

Tabela 2.6 – Fatores de redução da resistência ao escoamento do aço

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento	Fator de redução da resistência ao escoamento
	$K_{y,\theta}$	$K_{\sigma,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,890
300	1,000	0,780
400	1,000	0,650
500	0,780	0,530
600	0,470	0,300
700	0,230	0,130
800	0,110	0,070
900	0,060	0,050
1000	0,040	0,030
1100	0,020	0,020
1200	0,000	0,000

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323 (2013).

2.4.1.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do aço também sofre redução com o aumento da temperatura. Segundo a ABNT NBR 14323 (2013), essa redução deve ser considerada por meio de fatores aplicados ao valor do módulo de elasticidade à temperatura ambiente.

O fator de redução do módulo de elasticidade pode ser determinado pela Equação 2.12.

$$K_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (2.12)$$

De modo que:

$K_{E,\theta}$: fator de redução para o módulo de elasticidade para todos os tipos de aço;

E_θ : módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

E : módulo de elasticidade do aço a 20 °C.

A Tabela 2.7 apresenta alguns fatores de redução do módulo de elasticidade do aço.

Tabela 2.7 – Fatores de redução do módulo de elasticidade do aço

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução do módulo de elasticidade $K_{E,\theta}$
20	1,000
100	1,000
200	0,900
300	0,800
400	0,700
500	0,600
600	0,310
700	0,130
800	0,090
900	0,068
1000	0,045
1100	0,023
1200	0,000

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323 (2013).

2.4.1.3 Massa específica

Segundo a ABNT NBR 14323 (2013), a massa específica do aço pode ser considerada independente da temperatura nos procedimentos usuais de cálculo e pode ser considerada a partir da Equação 2.13.

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad (2.13)$$

2.4.2 Propriedades térmicas do aço

2.4.2.1 Alongamento

Quando submetido à ação térmica, o aço apresenta deformação decorrente da dilatação térmica. O alongamento térmico relativo ($\Delta l_a/l_a$) pode ser determinado conforme as expressões indicadas no Anexo D da ABNT NBR 14323 (2013), em função da temperatura do aço, conforme equações específicas para diferentes intervalos de temperatura entre 20 °C a 1200 °C.

Se o método simplificado for utilizado para fins de cálculo, pode-se considerar a relação entre alongamento do aço e temperatura constante. O valor do alongamento do aço deve ser determinado pela Equação 2.14.

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (2.14)$$

Sendo:

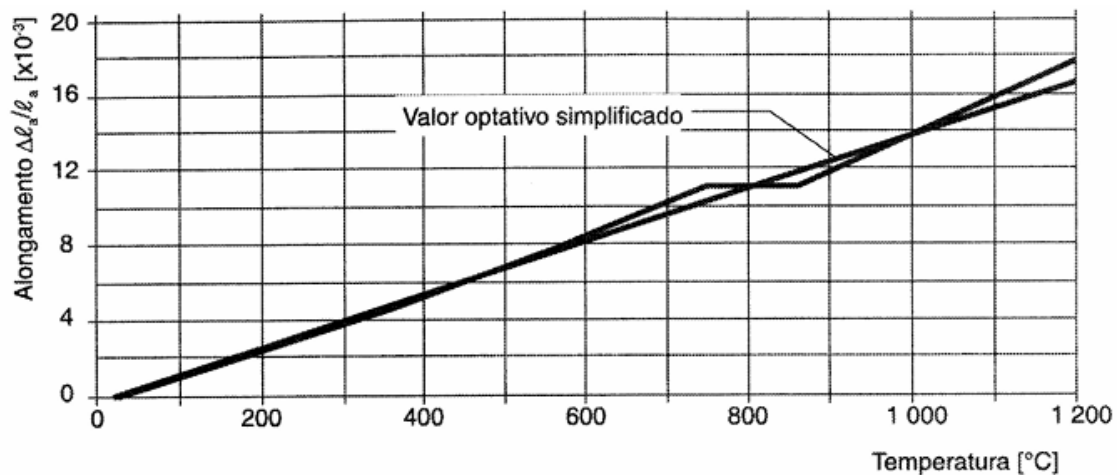
l_a : comprimento do perfil metálico a 20°C;

Δl : expansão térmica provocada pela temperatura;

θ_a : temperatura do aço, em grau Celsius.

A Figura 2.6 representa o alongamento do aço em função da temperatura.

Figura 2.6 – Alongamento do aço em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 14323 (2013).

2.4.2.2 Calor específico

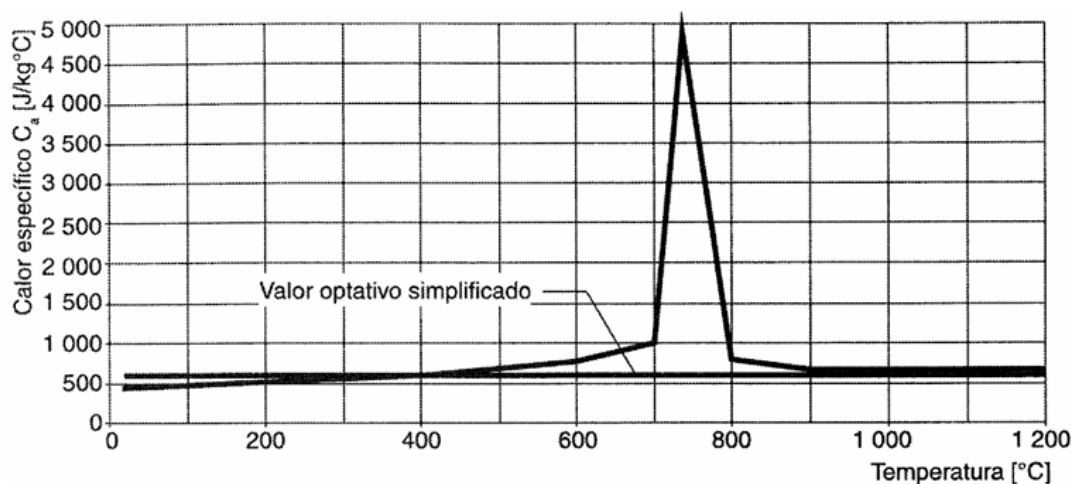
De acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), em seu Anexo D, o calor específico do aço (c_a), dado em joule por quilograma e por grau Celsius ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), pode ser determinado com base nas equações específicas para diferentes intervalos de temperatura entre 20°C a 1200°C .

Se o método simplificado de cálculo for empregado, o valor do calor específico do aço pode ser considerado independente da temperatura, podendo-se adotar o valor dado na Equação 2.15.

$$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

A Figura 2.7 indica a variação do valor específico do aço em função da temperatura.

Figura 2.7 – Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 14323 (2013).

2.4.2.3 Condutividade térmica

Um dos meios de transferência de calor é a condução térmica que normalmente ocorre em materiais sólidos, onde a condução de calor ocorre por meio do contato entre moléculas que apresentam temperaturas diferentes (Rodrigues, 2013).

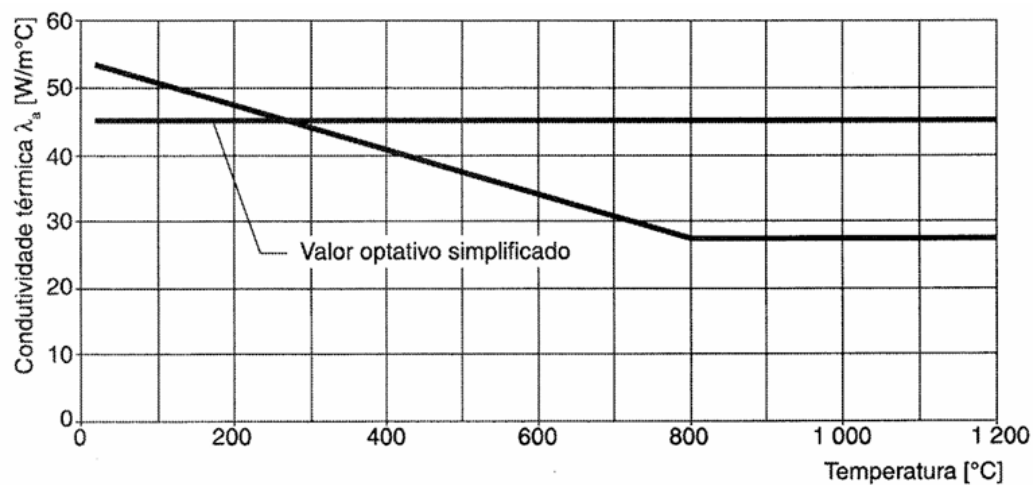
A condutividade térmica (λ_a), de acordo com ABNT NBR 14323 (2013), em seu Anexo D, pode ser expressa em watts por metro e por grau Celsius ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), podendo ser determinada considerando equações específicas para diferentes intervalos de temperatura entre 20°C a 1200°C .

Se for empregado o método simplificado de cálculo, o valor da condutividade térmica do aço pode ser considerado como independente da temperatura, podendo-se adotar o valor dado na Equação 2.16.

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (2.16)$$

A Figura 2.8 indica a condutividade térmica do aço em função da temperatura.

Figura 2.8 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 14323 (2013).

2.5 Método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço em incêndio

Caso a edificação não se enquadre nas condições de isenção previstas em norma, deve-se realizar a verificação dos elementos estruturais em situação de incêndio, considerando a possibilidade de utilização ou não de proteção térmica. Essa verificação é realizada para um tempo de exposição ao fogo previamente definido, geralmente obtido pelo método tabular ou, quando aplicável, pelo método do tempo equivalente, conforme apresentado nas seções 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente (Vargas e Silva, 2005).

Segundo Vargas e Silva (2005), em situação de incêndio, a diferença de temperatura entre os gases quentes e os elementos estruturais gera um fluxo de calor em direção à estrutura. Esse fluxo ocorre por meio dos mecanismos de convecção e radiação, resultando na elevação da temperatura do aço ao longo do tempo.

A verificação da resistência ao fogo dos elementos estruturais pode ser realizada por meio de métodos experimentais, métodos simplificados de cálculo ou métodos avançados de

análise. A ABNT NBR 14323 (2013) apresenta procedimentos simplificados para a verificação de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio com e sem proteção térmica, além de recomendações para a aplicação de métodos avançados.

Os métodos experimentais são baseados em ensaios de resistência ao fogo, realizados em elementos estruturais ou sistemas construtivos, sob condições controladas de exposição térmica. Já os métodos simplificados de cálculo utilizam expressões analíticas e hipóteses simplificadoras para estimar a elevação de temperatura nos elementos estruturais e verificar sua capacidade resistente em situação de incêndio. Assim, no contexto deste trabalho, a análise será conduzida com base no método simplificado de cálculo, conforme os procedimentos normativos aplicáveis.

Rodrigues (2013) apresenta a caracterização de dois modelos utilizados na análise da evolução da temperatura em perfis de aço:

- Modelo simplificado de cálculo: consiste em uma abordagem baseada em equações analíticas, na qual se admite, em geral, distribuição uniforme de temperatura na seção transversal do elemento estrutural. Essa hipótese simplifica a análise térmica e permite estimar a evolução da temperatura do aço ao longo do tempo.
- Modelo avançado de cálculo: consiste em uma abordagem baseada em métodos numéricos, como elementos finitos, elementos de contorno e diferenças finitas. Esses modelos permitem representar de forma mais detalhada a transferência de calor e a distribuição de temperatura no elemento estrutural, embora exijam maior complexidade de modelagem e processamento computacional.

Nesta seção, apresenta-se o método simplificado de cálculo aplicado à análise térmica de elementos de aço com revestimento contra fogo, de acordo com a ABNT NBR 14323 (2013).

2.5.1 Método simplificado de cálculo para elementos com revestimento térmico

De acordo com Rodrigues (2013), em estruturas de aço protegidas por revestimento contra fogo, a transferência de calor para o elemento estrutural ocorre predominantemente por condução através do material de proteção. Dessa forma, propriedades como condutividade térmica, massa específica e calor específico do revestimento, além de sua espessura, exercem influência direta na elevação da temperatura do aço.

A ABNT NBR 14323 (2013) estabelece que, admitindo-se distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação da temperatura ($\Delta\theta_{a,t}$) em graus Celsius, de um elemento estrutural de aço localizado no interior de uma edificação e protegido por material de

revestimento contra fogo, pode ser determinada pelas Equações 2.17 e 2.18, ou por meio de ensaios.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(u_m/A_g)}{t_m \rho_a c_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})\Delta t}{1 + (\xi/4)} - \frac{\Delta\theta_{a,t}}{(4/\xi) + 1} \quad (2.17)$$

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m (U_m/A_g) \quad (2.18)$$

De modo que $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ se $\Delta\theta_{g,t} \geq 0$.

Sendo:

$\Delta\theta_{a,t}$: elevação da temperatura para um elemento estrutural de aço com revestimento térmico (°C);

u_m/A_g : fator de massividade para os elementos estruturais de aço com proteção contra fogo, que será explicado na seção 2.6 (m⁻¹);

u_m : perímetro efetivo do material de proteção contra fogo, tomado como igual ao perímetro da face interna do material de revestimento e limitado às dimensões do elemento estrutural de aço (m);

c_m : calor específico do material de revestimento contra fogo (J/kg/°C);

t_m : espessura do material de revestimento contra fogo (m);

$\theta_{a,t}$: temperatura do aço no tempo t (°C);

$\theta_{g,t}$: temperatura dos gases no tempo t (°C);

λ_m : condutividade térmica do material de revestimento contra fogo (Wm/°C);

ρ_m : massa específica do material de revestimento contra fogo (kg/m³);

Δt : intervalo de tempo (s).

A ABNT NBR 14323 (1999) sugere que o valor de Δt não seja superior a 30 segundos.

2.6 Fator de massividade e aquecimento do perfil (Hp/A)

Em situação de incêndio, o fator de massividade, também denominado fator de forma, é um parâmetro fundamental para a análise térmica de elementos estruturais de aço. Esse fator influencia diretamente a velocidade de aquecimento do perfil, uma vez que relaciona a área exposta ao fogo com a quantidade de material disponível para absorver calor. Assim, elementos com maior fator de massividade tendem a aquecer mais rapidamente do que elementos com

menor fator de massividade, conforme indicado na Equação 2.17, utilizada no método simplificado de cálculo apresentado pela ABNT NBR 14323 (2013).

O fator de massividade de um elemento estrutural pode ser definido como a relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal do perfil, considerando a condição com ou sem proteção térmica, conforme aplicável (ABNT NBR 14432, 2001). Para elementos com proteção contra fogo, o fator de massividade pode ser determinado por meio da Equação 2.19.

$$F_{CP} = \frac{u_m}{A_g} \quad (2.19)$$

De modo que:

F_{CP} : fator de massividade para elementos estruturais com proteção térmica (m^{-1});

u_m : perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio (m);

A_g : área da seção transversal do elemento estrutural de aço (m^2).

De acordo com a ABNT NBR 14432 (2001), deve-se utilizar a área bruta da seção transversal na determinação do fator de massividade, desconsiderando-se o efeito de pequenos furos. O Anexo C deste trabalho apresenta alguns perfis estruturais em aço usualmente empregados, bem como as respectivas expressões para o cálculo do fator de massividade em elementos com proteção térmica, conforme indicado pela ABNT NBR 14323 (2013).

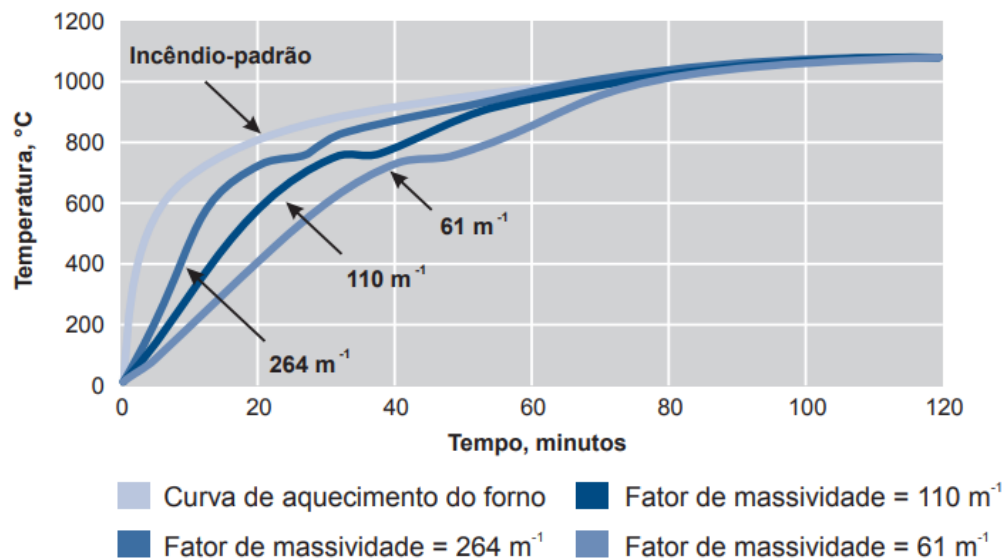
Pannoni (2015) destaca que a resistência ao fogo de um componente estrutural é expressa em unidades de tempo e está diretamente associada à velocidade de aquecimento do perfil, representada pelo fator H_p/A . Essa velocidade de aquecimento influencia o tempo necessário para que o aço atinja uma temperatura crítica, isto é, uma temperatura na qual a capacidade resistente do elemento pode se tornar insuficiente diante das solicitações atuantes.

Segundo o autor, seções mais esbeltas aquecem mais rapidamente do que seções mais robustas, devido à menor inércia térmica. Em outras palavras, elementos com menor massa em relação à área exposta ao fogo absorvem calor com maior rapidez, enquanto perfis mais robustos tendem a apresentar aquecimento mais lento. Esse comportamento está diretamente relacionado ao efeito do fator de massividade.

A Figura 2.9 ilustra a evolução da temperatura de três perfis de aço sem proteção térmica submetidos ao incêndio-padrão. Observa-se que perfis com menor fator de massividade, geralmente associados a seções mais robustas, apresentam aquecimento mais lento. Por outro lado, perfis com maior fator de massividade, usualmente associados a seções mais esbeltas,

atingem temperaturas elevadas em menor tempo. Consequentemente, para uma mesma exigência de resistência ao fogo, seções mais esbeltas tendem a demandar maior espessura ou maior quantidade de material de proteção térmica do que seções mais robustas.

Figura 2.9 – Curvas de velocidade de aquecimento durante a realização do ensaio de incêndio-padrão



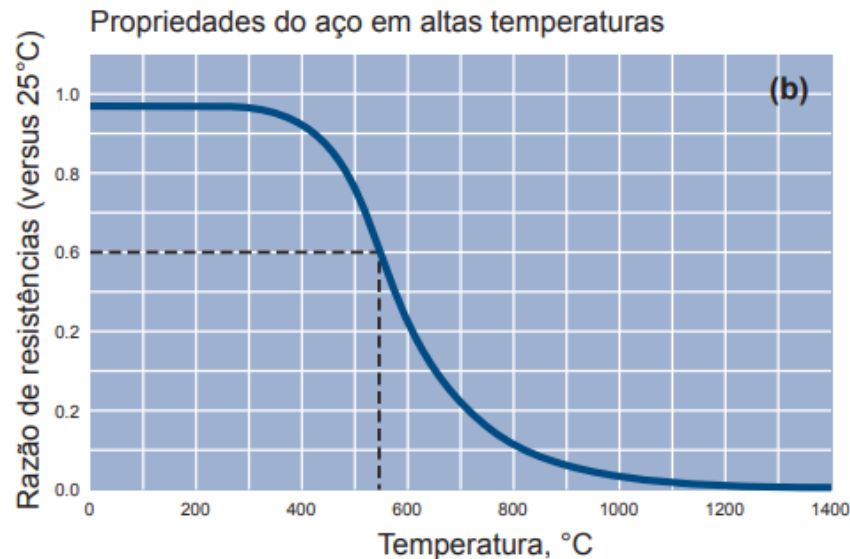
A elevação da temperatura em elementos estruturais de aço é influenciada por diversos parâmetros, como a temperatura dos gases, as propriedades térmicas do aço, o fator de massividade e, quando houver proteção térmica, as propriedades e a espessura do material de revestimento. Esses parâmetros estão presentes nas formulações indicadas pela ABNT NBR 14323 (2013), especialmente nas expressões utilizadas para elementos sem e com proteção contra fogo.

Pannoni (2015) comenta que, à medida que os materiais são aquecidos, ocorre redução de resistência e rigidez. No caso dos aços estruturais, observa-se uma redução progressiva da resistência mecânica com o aumento da temperatura, conforme ilustrado na Figura 2.10. Historicamente, a temperatura de 550 °C foi utilizada como referência em alguns procedimentos simplificados, pois, nessa condição, o aço estrutural mantém aproximadamente 60% de sua resistência à temperatura ambiente.

Entretanto, essa temperatura não deve ser interpretada como uma temperatura crítica universal para todos os elementos de aço. A temperatura crítica depende de fatores como nível de carregamento, tipo de solicitação, condições de vínculo, geometria do perfil, instabilidades locais ou globais e critérios normativos de verificação. Assim, o valor de 550 °C pode ser

utilizado como referência simplificada, mas não substitui a verificação específica da capacidade resistente do elemento em situação de incêndio.

Figura 2.10 – Diminuição da resistência do aço estrutural em função da temperatura.



Fonte: Pannoni (2015).

De acordo com a ABNT NBR 14432 (2001), as medidas de proteção contra incêndio podem ser classificadas, de modo geral, em proteção ativa e proteção passiva. Neste trabalho, o foco recai sobre as medidas de proteção passiva aplicadas a elementos estruturais de aço. A seção 2.7 apresenta, de forma mais detalhada, os principais sistemas de proteção passiva utilizados em estruturas metálicas em situação de incêndio.

2.7 Materiais de proteção térmica

Segundo Barrozo, Ferreira e Lima (2020), a segurança contra incêndio em edificações tem como objetivos estratégicos a proteção da vida, a preservação do patrimônio histórico e cultural, a proteção de equipamentos e recursos sociais, bem como a conservação dos bens materiais. Do ponto de vista tático, busca-se, sobretudo, reduzir os riscos de ocorrência e propagação do incêndio, controlar seus efeitos e permitir a evacuação segura dos ocupantes, além de garantir condições adequadas para a atuação das equipes do Corpo de Bombeiros.

A proteção contra incêndio pode ser organizada em dois sistemas principais: proteção ativa e proteção passiva, conforme mencionado na seção anterior. A proteção ativa corresponde aos sistemas que dependem de acionamento manual ou automático, como alarmes, detectores, chuveiros automáticos e equipamentos de combate. A proteção passiva, por sua vez, está

relacionada às medidas incorporadas à própria edificação, com o objetivo de limitar a propagação do fogo, preservar a estabilidade estrutural e garantir o desempenho dos elementos construtivos durante o tempo requerido de resistência ao fogo.

Lin (2018) comenta sobre a fundação da Associação Brasileira de Proteção Passiva (ABPP), em setembro de 2017, destacando como uma de suas diretrizes o incentivo ao uso efetivo e economicamente viável dos sistemas de proteção passiva contra incêndio em projetos de segurança estrutural. O autor também destaca a importância do desenvolvimento de ações integradas com instituições e órgãos governamentais, bem como da implementação contínua de sistemas de proteção passiva voltados à segurança das edificações, da sociedade e das equipes de combate ao incêndio.

O Quadro 2.1 relaciona as medidas de proteção passiva às diferentes etapas de desenvolvimento de um incêndio.

Quadro 2.1 – Medidas de proteção passiva e etapas do incêndio

Elementos	Medidas de proteção passiva
Limitação do crescimento do incêndio	Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos; Controle das características de reação ao fogo dos materiais e produtos incorporados aos elementos construtivos.
Limitação da propagação do incêndio	Compartimentação vertical; Compartimentação horizontal.
Evacuação segura do edifício	Provisão de rotas de fuga seguras e sinalização adequada.
Precaução contra a propagação do incêndio entre edifícios	Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais; Distanciamento seguro entre edifícios.
Precaução contra o colapso estrutural	Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais
Rapidez, eficiência e segurança das operações de combate e resgate	Provisão de meios de acesso dos equipamentos de combate a incêndio e sinalização adequada.

Fonte: Adaptado de Ono (2007, apud Barroso, Ferreira e Lima, 2020).

Vargas e Silva (2005) destacam que, para evitar a elevação excessiva da temperatura em estruturas de aço submetidas ao incêndio, uma solução frequentemente empregada é a utilização de materiais de proteção térmica, classificados como medidas de proteção passiva. Esses materiais têm como finalidade reduzir a taxa de aquecimento do aço, retardando a perda de

resistência e rigidez durante a exposição ao fogo. De modo geral, os materiais de proteção térmica devem apresentar baixa condutividade térmica, baixa massa específica aparente, elevado calor específico, estabilidade durante a evolução do incêndio e custo compatível com a solução adotada.

Bernardes (2002) afirma que os materiais de revestimento contra fogo têm a função de retardar o aumento da temperatura do elemento estrutural, de modo a preservar sua capacidade resistente durante o tempo requerido de exposição ao incêndio. A aplicação desses materiais pode ocorrer por jateamento, por meio de mantas ou pela fixação de placas ao perfil estrutural. Quanto à forma de aplicação, esses revestimentos podem ser classificados em revestimentos do tipo contorno e do tipo caixa.

Entre os materiais de proteção passiva mais utilizados em estruturas metálicas, destacam-se as tintas intumescentes, argamassas projetadas, painéis de materiais fibrosos, mantas, placas de gesso acartonado e argamassas à base de vermiculita.

Pannoni (2015) apresenta, no Quadro 2.2, as principais características dos produtos empregados no mercado para proteção passiva de estruturas metálicas em situação de incêndio. Esses produtos são classificados em materiais projetados, materiais rígidos ou semirrígidos e materiais intumescentes.

No contexto normativo brasileiro, a ABNT NBR 14323 (2013) estabelece os procedimentos para o projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio. A norma apresenta critérios para a análise térmica e estrutural dos elementos, incluindo a consideração das propriedades do aço em temperaturas elevadas, o uso de materiais de proteção térmica e as combinações de ações necessárias à verificação da segurança estrutural sob exposição ao fogo.

Quadro 2.2 – Resumo das principais características dos materiais de proteção térmica

Características	Materiais projetados	Materiais rígidos ou semirrígidos	Materiais intumescentes
Custo relativo	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio a alto
Aplicação (úmida ou seca)	Úmida	Em geral, seca	Úmida
Limpeza durante aplicação	Suja – A proteção de superfícies adjacentes é necessária	Relativamente limpa	A Proteção é necessária às superfícies adjacentes
Equipamentos necessários	Equipamentos especiais são necessários	Ferramental simples	Equipamentos utilizados normalmente em pintura
Uso interno/externo	Interno e externo	Interno; para uso externo, existe a necessidade de proteção adicional	Interno, com alguns sistemas externos
Preparação	Nenhum tipo de primer é requerido para uso interno, mas as superfícies devem estar limpas e serem compatíveis	Não há necessidade de preparo prévio	Uma tinta de fundo compatível é necessária, aplicada sobre superfícies de aço previamente limpas
Robustez	Relativamente frágil; pode ser vulnerável a danos mecânicos. Alguns revestimentos são inadequados às áreas abertas	Algumas placas rígidas são relativamente frágeis e podem ser vulneráveis ao dano mecânico; materiais semirrígidos podem requerer cobertura adicional	Semelhante aos sistemas de pintura tradicionais
Acabamento	Acabamento texturizado	Variável: materiais rígidos são normalmente lisos, com juntas visíveis, a menos que um acabamento seja aplicado; materiais semirrígidos são texturizados, com a fixação visível.	Liso ou levemente texturizado; um acabamento decorativo colorido pode ser aplicado
Retenção mecânica	Necessária quando a espessura é elevada e em algumas geometrias específicas	Requer, normalmente, algum tipo de retenção	Normalmente não necessita
Faixa de espessuras	10 a 75 mm	Camadas múltiplas podem ser necessárias; Placas de 6 a 100 mm e mantas de 12 a 76 mm	Camadas de 0,3 a 6,5 mm
Resistência máxima ao fogo	240 minutos	240 minutos	120 minutos

Fonte: Adaptado de Pannoni (2015).

Os materiais de proteção térmica considerados neste trabalho são: tinta intumescente, argamassa projetada e placas de gesso acartonado. A escolha destes materiais se deu para contemplar tanto o formato de proteção do tipo contorno, quanto o formato do tipo caixa. O detalhamento de cada uma dessas soluções será apresentado nas subseções seguintes.

2.7.1 Tinta intumescente

Oliveira, Moreno Júnior e Vieira Júnior (2017) definem a tinta intumescente como um material de proteção passiva composto por substâncias químicas que, quando submetidas a temperaturas elevadas, sofrem reações físico-químicas capazes de formar uma camada carbonizada expansiva. Essa camada atua como barreira isolante, reduzindo a transferência de calor para o elemento estrutural protegido. Embora tradicionalmente empregadas na proteção de estruturas metálicas em situação de incêndio, as tintas intumescentes também podem ser utilizadas na proteção passiva de materiais inflamáveis e produtos plásticos.

Segundo Vargas e Silva (2005), as tintas intumescentes são constituídas por polímeros que reagem na presença de fogo, expandindo-se a partir de temperaturas próximas a 200 °C. Durante esse processo, os poros formados pela expansão volumétrica são preenchidos por gases atóxicos que, em conjunto com as resinas presentes na composição da tinta, originam uma espuma rígida sobre a superfície do perfil metálico. Essa camada expandida contribui para reduzir os efeitos da ação térmica sobre a estrutura.

Pinto (2008) descreve que o processo de intumescência ocorre em etapas. Inicialmente, em temperatura média próxima a 150 °C, ocorre a decomposição do catalisador. Em seguida, em temperaturas mais elevadas, o agente carbonífero reage, favorecendo a formação de uma estrutura carbonizada. Por fim, entre aproximadamente 200 °C e 300 °C, ocorre a decomposição do agente expensor, com liberação de gases responsáveis pela expansão da camada carbonizada e formação de uma espuma escura de caráter isolante.

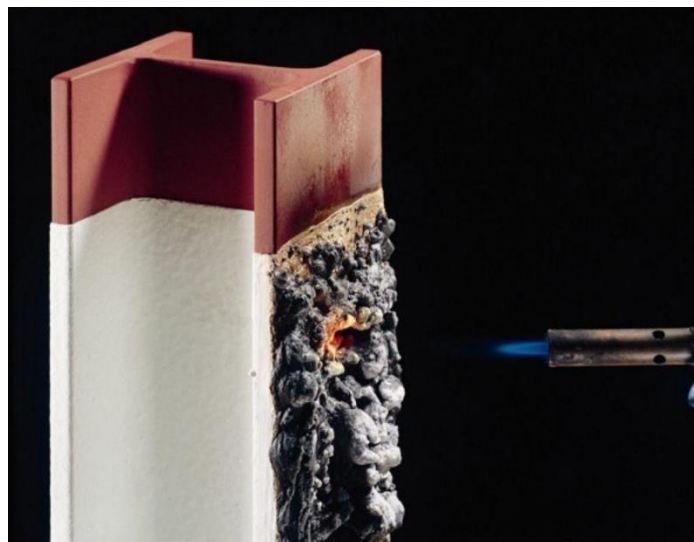
As Figuras 2.11 e 2.12 apresentam, respectivamente, a aplicação de revestimento intumescente em uma edificação e um perfil metálico revestido submetido à ação do fogo.

Figura 2.11 – Aplicação do revestimento intumescente



Fonte: Portal Incêndio (2026).

Figura 2.12 – Revestimento intumescente mediante a ação do fogo



Fonte: Incêndio AVCD (2026).

Entre as principais vantagens das tintas intumescentes, destacam-se o acabamento estético semelhante ao de tintas decorativas convencionais, a possibilidade de aplicação em diferentes cores, o bom acabamento superficial e a durabilidade satisfatória. Além disso, sua aplicação não exige fixação mecânica por pinos, sendo considerada uma solução de baixa interferência sobre o elemento estrutural. Contudo, sua execução requer mão de obra qualificada e controle rigoroso de qualidade, uma vez que o desempenho do sistema depende da correta preparação da superfície, da espessura aplicada e das condições de aplicação (Oliveira, Moreno Júnior e Vieira Júnior, 2017).

Pannoni (2007) aponta que as principais desvantagens das tintas intumescentes estão associadas ao custo mais elevado em comparação a outros sistemas de proteção passiva.

Embora sua aplicação em obra possa ser relativamente simples, ela depende de condições atmosféricas adequadas e pode exigir várias demãos para atingir a espessura prevista no dimensionamento, o que pode aumentar o tempo de execução. O autor também observa que muitas tintas intumescentes são usualmente empregadas para tempos de proteção de até 60 minutos, enquanto soluções para tempos superiores tendem a apresentar custo mais elevado.

O Quadro 2.3 apresenta algumas opções de tintas intumescentes comercializadas no Brasil, conforme o Guia da Construção em Aço divulgado pelo CBCA e Seito et al. (2008, apud Costa, 2024), indicando produto, fabricante e representantes no país.

Quadro 2.3 – Principais tintas intumescentes fornecidas no Brasil

Produto	Fabricante	Representante no Brasil
PMA 1200HD	AUDAX-Keck GmbH	CKC do Brasil
PMA 600HD	AUDAX-Keck GmbH	CKC do Brasil
Firesteel 47-A	Firetherm	CKC do Brasil
Chartek 1709	International Protective Coatings	Inter Coatings
Chartek 7	International Protective Coatings	Inter Coatings
Interchar 212	International Protective Coatings	Inter Coatings
Firetex	Leigh's Paints	Morganite do Brasil
Interchar 963	Tintas International	Morganite do Brasil
Sprayfilm	Isolatek International	PCF Soluções
Unitherm	Sika	PCF Soluções
Calatherm 600	Tintas Calamar	Produzido no Brasil
Nullifire S605 e S707	Carboline	Unifrax Brasil

Fonte: Adaptado de Seito et al. (2008, apud Costa, 2024).

Bertelli (2016) destaca que, de modo geral, tintas intumescentes à base de resina acrílica são frequentemente indicadas para edificações como residências, escritórios e ambientes comerciais, enquanto sistemas à base epoxídica são mais recomendados para situações com maior severidade térmica, como incêndios envolvendo hidrocarbonetos. O autor também ressalta que a aplicação deve ser realizada por profissional capacitado e, preferencialmente, certificado pelo fornecedor do sistema de Proteção Passiva Contra Fogo (PPCF), pois o desempenho do revestimento depende diretamente da qualidade da execução.

Quanto à validade e durabilidade, Bertelli (2016) comenta que a maioria das tintas intumescentes pode ser armazenada por períodos que variam, em geral, de 6 a 24 meses antes da aplicação, conforme as recomendações do fabricante. Após aplicada, a durabilidade do revestimento depende principalmente do tratamento da superfície, das condições de exposição,

da qualidade do acabamento e da manutenção preventiva. Em ambientes protegidos da ação direta de agentes agressivos e intempéries, esses revestimentos tendem a apresentar maior vida útil.

2.7.2 Argamassa projetada

Os materiais projetados apresentam desempenho satisfatório quando expostos a elevadas temperaturas e podem ser produzidos com base cimentícia ou à base de gesso. Em sua composição, geralmente são incorporados materiais isolantes, como vermiculita expandida e fibras minerais, com o objetivo de reduzir a transferência de calor para o elemento estrutural. Esse tipo de proteção térmica já foi empregado em grandes empreendimentos, como as Torres Petronas, o World Trade Center e a Sears Tower, entre outros (Mendes et al., 2006 apud Moreira, 2019).

Pannoni (2007) acrescenta que, nos materiais projetados à base de gesso, quando a temperatura do ambiente atinge valores entre aproximadamente 90 °C e 150 °C, ocorre a ruptura das ligações químicas do gesso hidratado, liberando água de hidratação. Durante esse processo, parte da energia térmica proveniente do incêndio é absorvida, retardando a transferência de calor para o aço e contribuindo para que o elemento estrutural mantenha temperaturas mais baixas durante os estágios iniciais do incêndio.

Vargas e Silva (2005) explicam que a argamassa projetada consiste em uma massa fluida composta por agregados, aglomerantes e água. Após preparada, essa mistura é transportada por mangueiras e aplicada diretamente sobre os perfis de aço por meio de jateamento com ar comprimido. Em geral, esse tipo de revestimento apresenta acabamento superficial mais rugoso, sendo frequentemente utilizado em ambientes nos quais a exigência estética não é predominante.

As Figuras 2.13 e 2.14 apresentam, respectivamente, uma edificação com estruturas metálicas revestidas por argamassa projetada e perfis estruturais protegidos por esse tipo de revestimento.

Figura 2.13 – Estruturas metálicas revestidas com argamassa projetada



Fonte: Chromatech Engenharia (2026).

Figura 2.14 – Revestimento em argamassa projetada em estrutura metálica



Fonte: Fire Lock (2026).

A argamassa projetada apresenta, em geral, custo inferior ao da pintura intumescente. Além disso, pode ser aplicada diretamente sobre a estrutura de aço, sem necessidade de primer em determinadas situações, apresenta baixa exigência de manutenção e possibilita elevada produtividade devido à aplicação por jateamento. Também pode apresentar formulações com

aditivos fungicidas e bactericidas, reduzindo a possibilidade de proliferação de fungos e bactérias (Pannoni, 2017).

Dias (2015) aponta, contudo, algumas limitações associadas ao uso da argamassa projetada, como o aspecto visual mais rústico em comparação a outras soluções de proteção passiva, a menor resistência a impactos mecânicos e o tempo de secagem mais prolongado.

O Quadro 2.4 apresenta alguns materiais projetados empregados no mercado nacional, indicando o produto, o fabricante e o respectivo representante no Brasil.

Quadro 2.4 – Alguns materiais projetados empregados no Brasil

Produto	Fabricante	Representante no Brasil
Blaze Shield II	Isolatek International	Morganite do Brasil
Cafco 300	Isolatek International	Morganite do Brasil
Fendolite	Isolatek International	Morganite do Brasil
Pyrolite 15 HY	Carboline	Unifrax Brasil
Pyrolite 22	Carboline	Unifrax Brasil
Pyrocrete 40	Carboline	Unifrax Brasil
Pyrocrete 40	Carboline	Unifrax Brasil
Termosist	Grupo Sistema	Produzido no Brasil
Isobrax	Magnesita	Produzido no Brasil
Isopiro	Eucatex	Produzido no Brasil
Isopiro LV	Eucatex	Produzido no Brasil
Monokote MK6	Grace	Grace do Brasil

Fonte: Adaptado de Seito et al. (2008).

2.7.3 Placas de gesso acartonado

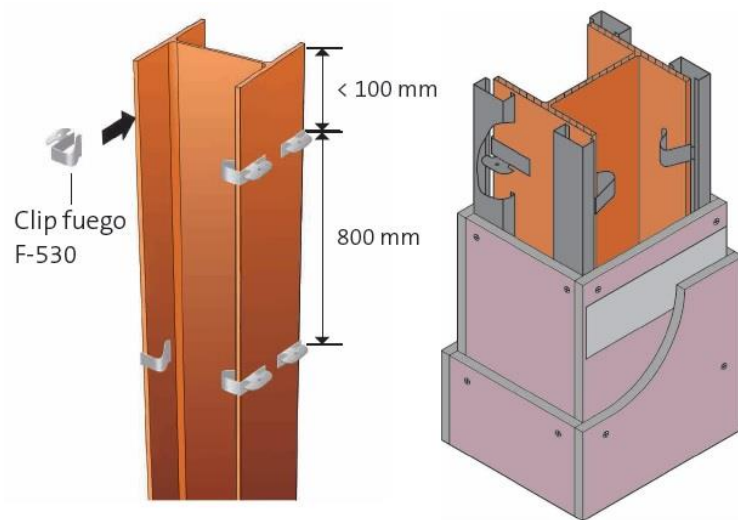
De acordo com Melo (2022), a engenharia tem incorporado, de forma crescente, tecnologias construtivas que buscam substituir ou aprimorar métodos tradicionais de construção. No contexto da proteção passiva contra incêndio, o uso de painéis rígidos ou semirrígidos pode ser incorporado aos projetos com o objetivo de proteger os elementos construtivos e estruturais contra a ação térmica do fogo.

Seito et al. (2008) comentam que os materiais rígidos e semirrígidos são aplicados a seco, geralmente no formato de revestimentos tipo caixa ou envoltentes. Esses materiais incluem lâ de rocha basáltica, fibras cerâmicas, silicato de cálcio, vermiculita e gesso, como as placas de gesso acartonado. Segundo os autores, esses sistemas podem atingir tempos de resistência ao fogo de até 240 minutos, sendo constituídos por materiais incombustíveis.

As placas de gesso acartonado, também conhecidas como drywall, são compostas por um núcleo de gesso revestido por papel-cartão em ambas as faces, sendo fixadas a estruturas auxiliares, geralmente metálicas. Esse sistema apresenta elevada versatilidade e pode ser utilizado em paredes, tetos e revestimentos internos. Além de contribuir para a resistência ao fogo, pode proporcionar isolamento acústico e atender a requisitos funcionais e estéticos do projeto (Santos e Souza, 2014).

As Figuras 2.15 e 2.16 apresentam estruturas metálicas protegidas por placas de gesso acartonado.

Figura 2.15 – Pilar metálico protegido com placas de gesso acartonado



Fonte: Isover (2026).

Figura 2.16 – Estrutura metálica protegida com placas de gesso



Fonte: RST Brandschutztechnik (2026).

A fabricação das chapas de gesso acartonado é regulamentada pela ABNT NBR 14715 (2021). Esses elementos são constituídos por um núcleo de gesso revestido por cartão duplex em ambas as faces. Em situação de incêndio, a água quimicamente combinada presente no gesso é liberada na forma de vapor, processo que absorve parte da energia térmica e contribui para retardar a elevação da temperatura no elemento protegido.

O Quadro 2.5 apresenta alguns dos principais materiais rígidos e semirrígidos utilizados no Brasil, indicando o produto, o fabricante, o representante no país e o tipo de material.

Quadro 2.5 – Principais materiais rígidos e semirrígidos utilizados no Brasil

Produto	Fabricante	Representante no Brasil	Material
PEM Thermax	Rockfibras	Produzido no Brasil	Lã de rocha basáltica
Firemaster	Morganite do Brasil	Produzido no Brasil	Fibra cerâmica
Firewrap B6	Morganite do Brasil	Produzido no Brasil	Fibra cerâmica
Placo	Placo do Brasil	Produzido no Brasil	Gesso acartonado
Knauf	Knauf do Brasil	Produzido no Brasil	Gesso acartonado
Gypsum	Lafarge	Produzido no Brasil	Gesso acartonado

Fonte: Adaptado de Seito et al. (2008).

A Associação Brasileira de Drywall (2018) destaca que as placas de gesso acartonado são amplamente utilizadas devido à facilidade de instalação, flexibilidade, leveza, economia e rapidez na execução de ambientes internos. Além disso, quando especificadas adequadamente, podem contribuir para a proteção contra incêndio, favorecendo a segurança da edificação, dos ocupantes e do patrimônio.

Embora apresentem vantagens executivas, os sistemas de proteção com placas de gesso exigem cuidados quanto à estanqueidade, à correta fixação e à resistência a impactos mecânicos. Danos ao revestimento, aberturas indevidas ou falhas de execução podem comprometer o desempenho térmico do sistema e reduzir sua eficiência na proteção da estrutura metálica em situação de incêndio (Vargas e Silva, 2005).

2.8 Dimensionamento das espessuras dos materiais de proteção passiva

De acordo com a ABNT NBR 14432 (2001), o atendimento ao TRRF pode ser verificado por meio de procedimentos que garantam o desempenho dos elementos construtivos em situação de incêndio. No caso das estruturas de aço, essa verificação pode envolver a

aplicação de materiais de proteção térmica aos elementos estruturais e a avaliação da segurança estrutural conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14323 (2013).

Bellei, Pinho e Pinho (2008) comentam que os materiais de proteção térmica são, em geral, submetidos a ensaios laboratoriais antes de sua aplicação em projeto. A partir desses ensaios, são elaboradas tabelas denominadas cartas de cobertura, que indicam a espessura mínima do material de proteção passiva a ser aplicada em função do TRRF requerido e do fator de massividade do perfil estrutural.

No Brasil, os ensaios destinados à avaliação da resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais são realizados com base na ABNT NBR 5628 (2022). Segundo Vargas e Silva (2005), os fornos utilizados nesses ensaios possuem sistemas de aquecimento compostos por queimadores de baixa pressão e sistemas de exaustão por dutos. A medição das temperaturas do forno e dos elementos de aço é realizada por meio de termopares, usualmente do tipo cromel-alumel.

Além do uso das cartas de cobertura, a ABNT NBR 14323 (2013) apresenta formulações normativas para a análise térmica de elementos de aço com proteção contra fogo. Essas formulações consideram parâmetros como o fator de massividade do perfil, as propriedades térmicas do material de proteção, sua espessura, a temperatura dos gases, a temperatura do elemento estrutural e o intervalo de tempo adotado na análise.

Pannoni (2007) comenta que, quando a proteção passiva é necessária, sua espessura pode ser definida a partir das cartas de cobertura fornecidas pelos fabricantes dos materiais de proteção térmica. Essas cartas relacionam a espessura requerida ao fator de massividade do elemento estrutural e ao TRRF especificado para a edificação.

A finalidade principal dessas proteções é retardar a elevação da temperatura do aço durante o incêndio, de modo que o elemento estrutural mantenha capacidade resistente suficiente durante o tempo requerido. Embora Pannoni (2015) mencione a temperatura de 550 °C como uma referência usual para o aço estrutural, esse valor não deve ser tratado como temperatura crítica universal, pois a temperatura crítica depende das condições de carregamento, geometria, vínculos, instabilidades e critérios de verificação adotados.

Neste trabalho, o dimensionamento dos sistemas de proteção térmica será realizado com base nas cartas de cobertura fornecidas por diferentes fabricantes, conforme apresentado na seção de Metodologia.

2.9 Otimização de sistemas de proteção passiva contra incêndio

De acordo com Van Coile et al. (2018), os efeitos de um incêndio podem causar danos significativos à vida humana, ao patrimônio e ao ambiente construído. Com o objetivo de reduzir esses danos e aumentar o nível de segurança das edificações, podem ser adotadas medidas de segurança contra incêndio, buscando-se manter o risco residual em níveis aceitáveis. Embora todo projeto apresente algum grau de incerteza e risco residual, esse risco deve ser reduzido a um patamar considerado aceitável pelos responsáveis pela tomada de decisão.

A utilização de sistemas de proteção passiva contra incêndio pode ser necessária quando a verificação estrutural indicar que os elementos da edificação não apresentam resistência suficiente para atender ao tempo requerido de resistência ao fogo. Nesses casos, materiais como tintas intumescentes, argamassas projetadas, placas, mantas e portas corta-fogo podem ser empregados para aumentar o desempenho da edificação em situação de incêndio (Santa Helena, 2020). Dependendo da solução adotada, o custo relativo pode variar de baixo a médio, como ocorre com alguns materiais projetados, rígidos e semirrígidos, ou de médio a alto, como no caso dos materiais intumescentes, conforme indicado por Pannoni (2015) e apresentado anteriormente no Quadro 2.2.

Gravit et al. (2026) destacam que a utilização de métodos matemáticos, como técnicas de otimização, pode contribuir para a redução dos custos associados aos sistemas de proteção contra incêndio. Esses métodos permitem considerar, de forma integrada, o comportamento térmico do aço em situação de incêndio, as propriedades dos materiais de proteção e as variáveis econômicas envolvidas. Assim, a otimização possibilita buscar espessuras de proteção que atendam aos critérios de segurança estabelecidos, minimizando o custo total do sistema adotado.

2.9.1 Otimização

2.9.1.1 Fundamentos da otimização

Vasconcelos (2014) define otimização como o campo da ciência que busca, de forma sistemática, a melhor solução para determinado problema, considerando restrições que delimitam o conjunto de soluções viáveis e um critério de avaliação da qualidade dessas soluções, denominado função objetivo. Dessa forma, as técnicas de otimização permitem

identificar, de maneira automatizada e estruturada, a solução mais adequada entre diferentes alternativas possíveis.

Maia (2009) e Vanderplaats (2006) comentam que o uso de terminologias associadas à otimização estrutural ganhou destaque a partir da década de 1960, influenciado pelos estudos de Schmidt, que contribuíram para o desenvolvimento e aprimoramento de novos produtos e soluções de engenharia. Klein (2008) ressalta que desempenho e economia são aspectos fundamentais na prática da engenharia, o que reforça a importância da incorporação de processos de otimização em projetos técnicos.

Conforme Brasil e Silva (2019), o processo de otimização pode ser representado, de maneira geral, pelo fluxograma apresentado na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Fluxograma genérico do processo de otimização



Fonte: Adaptado de Brasil e Silva (2019).

Segundo os autores, um problema de otimização parte de uma formulação inicial, composta por variáveis de projeto, função objetivo e restrições. A partir dessa formulação, aplica-se um método de otimização com o objetivo de encontrar a solução que melhor atende ao critério estabelecido.

Vanderplaats (1999) e Leite e Pereira Junior (2019) comentam que um problema geral de otimização pode ser descrito por uma função objetivo, variáveis de projeto, restrições e limites laterais que definem o espaço viável de soluções. De modo geral, esse problema pode ser formulado conforme as Equações 2.20 a 2.24.

Minimizar:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.20)$$

Restrições de desigualdade:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (2.21)$$

Restrições de igualdade:

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.22)$$

Restrições laterais:

$$X_i \leq X \leq X_j \quad (2.23)$$

Variáveis de projeto:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

O processo de otimização tem como objetivo determinar os valores das componentes do vetor de variáveis de projeto X que minimizam a função objetivo, respeitando as restrições impostas ao problema. Em muitos métodos de otimização, essa busca é realizada por meio de um processo iterativo, no qual uma nova solução é obtida a partir da solução anterior, conforme indicado pela Equação 2.25.

$$X^{k+1} = X^k + \alpha \cdot S(X^k) \quad (2.25)$$

De modo que X^{k+1} representa a variável de projeto atual para cada passo $k + 1$, α indica o passo de cada iteração e $S(X^k)$ está relacionado à direção de busca no ponto X^k . Brasil e Silva (2019) acrescentam que se o objetivo for encontrar o máximo da função $f(x)$, é necessário somente determinar o mínimo dessa função e inverter o sinal, de modo que $F(x) = -f(x)$.

2.9.1.2 Métodos de otimização

De acordo com Silva (2016, apud Correia, 2016), a escolha do método de otimização

depende da natureza do problema analisado, das características da função objetivo, das restrições envolvidas e do tipo de variável de projeto considerada. Ao longo do tempo, diferentes métodos foram desenvolvidos para a resolução de problemas de otimização, podendo ser classificados, de modo geral, em métodos gráficos, analíticos e numéricos.

Os métodos gráficos buscam a solução ótima por meio da representação da função objetivo e das restrições em um espaço de soluções viáveis. Sua aplicação é limitada a problemas com, no máximo, duas variáveis de projeto, mas apresenta como vantagem a visualização clara da região viável e do comportamento da função objetivo.

Os métodos analíticos, por sua vez, são aplicáveis a problemas mais simples e permitem compreender conceitos fundamentais da otimização. Além disso, podem ser utilizados como referência para verificar a consistência de métodos numéricos empregados em problemas mais gerais.

Os métodos numéricos são amplamente utilizados em problemas de engenharia, especialmente quando há maior número de variáveis, restrições e não linearidades. Esses métodos podem ser classificados em genéricos e específicos. Os métodos genéricos são aplicáveis a diferentes tipos de problema e, por isso, são frequentemente incorporados a softwares de otimização. Já os métodos específicos são desenvolvidos para resolver uma formulação particular, considerando as características próprias do problema estudado.

Outra forma de classificação dos métodos numéricos distingue os métodos determinísticos dos métodos probabilísticos. Bastos (2004) comenta que os métodos determinísticos produzem uma sequência definida de soluções, frequentemente fazendo uso de informações derivadas da função objetivo e/ou das restrições. Os métodos probabilísticos, por outro lado, utilizam estratégias baseadas em parâmetros aleatórios ou estocásticos, avaliando a função objetivo para explorar o espaço de soluções sob uma perspectiva probabilística.

O autor acrescenta que, de acordo com as características da função objetivo e das restrições, os problemas de otimização também podem ser classificados em problemas de programação linear e programação não linear. Na programação linear, a função objetivo e as restrições são funções lineares em relação às variáveis de projeto. Já na programação não linear, a função objetivo ou pelo menos uma das restrições apresenta comportamento não linear.

Há diversos métodos de otimização aplicáveis a problemas de diferentes naturezas. No contexto da ferramenta *Solver*, destacam-se os métodos Simplex, Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e Algoritmos Genéticos. Neste trabalho, será adotado o método do Gradiente Reduzido Generalizado, por ser adequado à resolução de problemas de otimização não linear e por estar disponível na ferramenta utilizada nas análises.

2.9.1.3 Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)

Gomes et al. (2018) comentam que o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) foi inicialmente apresentado por Abadie e Carpentier (1966 apud Gomes et al., 2018) como uma técnica para solucionar problemas de programação matemática com função objetivo não linear e restrições lineares. O método proposto por Abadie e Carpentier foi fundamentado no método do Gradiente, apresentado por Rosen (1960 apud Gomes et al., 2018), e no método do Gradiente Reduzido, desenvolvido por Wolfe (1963 apud Gomes et al., 2018).

De acordo com Köksoy e Yalcinoz (2006 apud Gomes et al., 2018), o GRG é um dos métodos frequentemente empregados na resolução de problemas de otimização não linear, em razão de sua facilidade de implementação e de sua disponibilidade no Solver do *Microsoft Excel*. Chapra e Canale (2011) acrescentam que o GRG é um método determinístico de otimização voltado a problemas não lineares com restrições.

O método GRG possui fundamentação matemática avançada, razão pela qual não será apresentada uma formulação detalhada neste trabalho. Neste tópico, será abordada apenas sua ideia geral. Uma descrição mais aprofundada do método pode ser consultada em trabalhos de referência, como Wolfe (1963), Abadie e Carpentier (1966), Lasdon et al. (1978) e Mouatasim, Ellaia e De Cursi (2014).

Ragsdale (2014) explica que, de modo semelhante a outros métodos de otimização não linear, o GRG inicia o processo a partir de uma solução inicial, denominada ponto de partida. A partir desse ponto, o algoritmo busca se deslocar dentro da região viável em uma direção que produza melhoria no valor da função objetivo. Em cada iteração, são avaliadas novas direções e tamanhos de passo, de modo a obter soluções sucessivamente melhores, até que não seja identificada uma direção viável capaz de melhorar o resultado.

Segundo Chapra e Canale (2011), o método GRG transforma o problema restrito em um problema reduzido, no qual parte das variáveis é expressa em função das demais. Com isso, o problema passa a ser tratado de forma semelhante a um problema sem restrições, permitindo a aplicação de estratégias baseadas em gradiente, para buscar a melhoria da função objetivo.

Lasdon et al. (1980) e Ragsdale (2014) destacam que, assim como ocorre em outros métodos de otimização não linear, o GRG pode convergir para uma solução ótima local, que não necessariamente corresponde ao ótimo global do problema. Essa característica está associada à dependência do ponto inicial adotado. Portanto, a escolha adequada da solução inicial e a realização de testes com diferentes pontos de partida podem contribuir para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. Neste trabalho, a solução encontrada pelo método será

considerada convergente dentro dos critérios adotados na análise.

2.9.1.4 Aplicações da ferramenta Solver

Gomes Júnior e Souza (2004) comentam que o Solver integra o conjunto de ferramentas de análise hipotética utilizadas em planilhas eletrônicas. Esse recurso permite determinar um valor ótimo para uma fórmula definida em uma célula específica, denominada célula objetivo, a partir do ajuste de um conjunto de células relacionadas ao modelo.

O Solver modifica os valores das células ajustáveis, definidas como variáveis de decisão, com o objetivo de otimizar o resultado da célula objetivo. Além disso, permite a inclusão de restrições que limitam os valores assumidos pelas variáveis, representando condições impostas ao problema de otimização.

Correia (2016) destaca que *softwares* como o *Microsoft Excel* utilizam a ferramenta Solver para a realização de cálculos de otimização em planilhas. Essa ferramenta foi desenvolvida pela *Frontline Systems*, empresa que também comercializa versões mais avançadas, como o *Analytic Solver Platform*, que possui recursos adicionais em relação ao Solver padrão do *Excel*.

Costa e Melo (2016) acrescentam que o Solver permite resolver problemas lineares por meio do método *Simplex* e problemas não lineares por meio do método do Gradiente Reduzido Generalizado. Sacoman (2012) aponta o GRG como um método adequado para a análise de problemas de otimização não linear.

Neste trabalho, será utilizado o *Analytic Solver Platform for Education*, versão 2023, correspondente à versão educacional do *Analytic Solver Platform*. O método de otimização empregado será o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). As etapas de implementação do problema de otimização no Solver serão descritas na seção de Metodologia, conforme os procedimentos sugeridos por Ragsdale (2014).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, de abordagem quantitativa, desenvolvida a partir da análise de um modelo estrutural de aço com seis pavimentos. A metodologia envolve a definição do modelo estrutural de referência, a seleção dos sistemas de proteção passiva contra incêndio, o levantamento dos parâmetros técnicos e econômicos associados a cada solução, a verificação das espessuras necessárias de proteção térmica e a aplicação do método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para otimização dos custos.

Nesta seção, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados no estudo, incluindo a caracterização do modelo estrutural, os critérios de análise em situação de incêndio, os sistemas de proteção passiva considerados, os dados de custo utilizados e a formulação do problema de otimização.

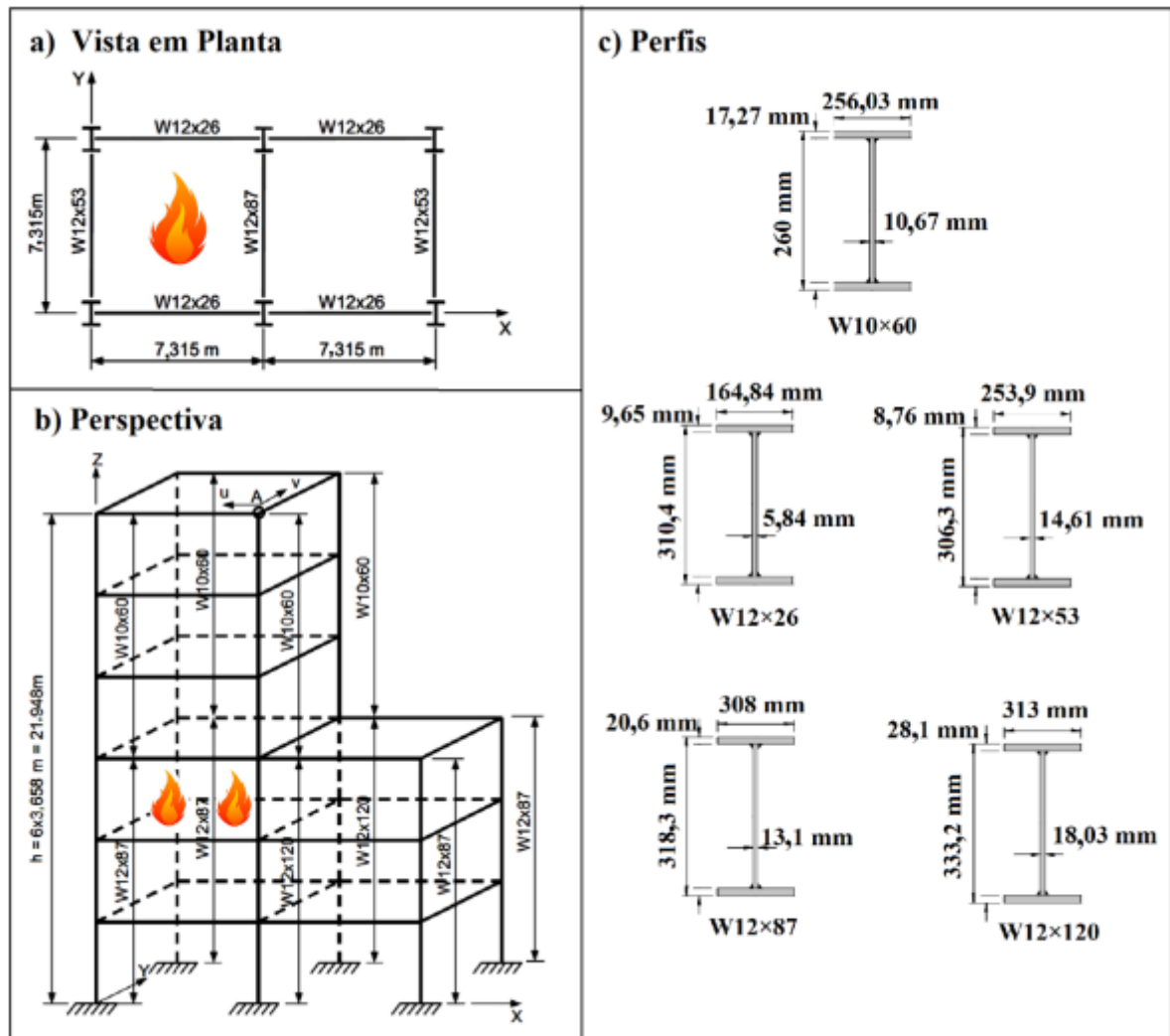
3.1 Modelo estrutural

O objeto de estudo deste trabalho é um modelo estrutural de edifício de escritórios com seis pavimentos, constituído por elementos metálicos. A análise proposta não tem como objetivo realizar o dimensionamento estrutural da edificação em temperatura ambiente, mas sim avaliar e comparar soluções de proteção passiva contra incêndio aplicadas aos elementos estruturais. Para isso, adotou-se um modelo previamente dimensionado por Ngo-Huu et al. (2007, apud Ricardo, 2022).

De acordo com Ricardo (2022), o edifício possui planta com dimensões de 7,315 m × 14,630 m e altura total de 21,95 m. Os compartimentos apresentam dimensões de 7,315 m × 7,315 m × 3,658 m. No modelo estrutural, os pilares são considerados contínuos ao longo da altura da edificação, enquanto as vigas são adotadas como simplesmente apoiadas.

A Figura 3.1 apresenta o pórtico tridimensional de aço, incluindo a vista em planta, a perspectiva do modelo e as especificações dos perfis estruturais adotados.

Figura 3.1 – Pórtico tridimensional de aço com seis andares



Fonte: Ngo-Huu et al. (2007, apud Ricardo, 2022).

Para a análise do modelo em situação de incêndio, foram estabelecidas as condições de contorno e os parâmetros necessários aos cálculos térmicos e à definição dos sistemas de proteção passiva. Considerando a ocupação da edificação como escritório, adotou-se carga de incêndio específica de 700 MJ/m^2 , conforme indicado pela ABNT NBR 14432 (2001). A edificação apresenta altura total de 21,95 m, altura de pavimento igual a aproximadamente 3,66 m e compartimentos com área definida a partir das dimensões geométricas apresentadas anteriormente.

Além disso, conforme adotado por Ricardo (2022), considerou-se fator de abertura igual a 0,04 e o coeficiente K associado às características térmicas dos elementos de vedação, igual a $0,07 \text{ min.m}^2/\text{MJ}$. As demais informações geométricas e as especificações dos perfis metálicos utilizados no modelo são apresentadas na Figura 3.1.

3.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) foi determinado inicialmente pelo método tabular. Em seguida, verificou-se a possibilidade de redução desse valor em até 30 minutos por meio do método do tempo equivalente, conforme apresentado nas subseções 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente. A seguir, são descritas as considerações adotadas para a aplicação de cada procedimento.

3.2.1 Método tabular

Seguindo as recomendações da ABNT NBR 14432 (2001) e os critérios apresentados na subseção 2.3.2, a edificação foi classificada quanto ao uso, à ocupação, à divisão e à altura. Nos termos da normativa, a edificação analisada foi enquadrada conforme os critérios apresentados no Anexo A deste trabalho, da seguinte forma:

- Ocupação/uso: serviços profissionais, pessoais e técnicos;
- Grupo: D;
- Divisão: D-1;
- Descrição: locais destinados à prestação de serviços profissionais ou à condução de negócios;
- Tipo de edificação: escritórios administrativos.

A determinação do TRRF pelo método tabular foi realizada com base no Anexo B deste trabalho. Para isso, considerou-se que a edificação pertence ao Grupo D, divisão D-1, não possui subsolo e apresenta altura total de 21,95 m, enquadrando-se na Classe P2, correspondente ao intervalo $12\text{ m} < h < 23\text{ m}$.

3.2.2 Método do tempo equivalente

A determinação do TRRF pelo método do tempo equivalente foi realizada com base nos procedimentos de cálculo apresentados pela IT 08 do CBMAL (2021).

O tempo equivalente foi calculado por meio da Equação 2.3, apresentada na seção 2.3.3. Essa equação considera parâmetros como a carga de incêndio específica, a presença de medidas de proteção ativa, o risco de incêndio, as consequências associadas ao colapso estrutural, as

características térmicas dos elementos de vedação, as condições de ventilação e a altura do compartimento.

O valor característico da carga específica de incêndio $q_{fi,k}$ foi determinado com base na Tabela 2.1, considerando-se a ocupação para serviços profissionais, pessoais e técnicos do tipo escritórios - D1, de modo que valor da carga de incêndio é igual a 700 MJ/m².

O coeficiente γ_n , está relacionado à presença de medidas de proteção ativa, sendo calculado a partir da Equação 2.4. Entretanto, o modelo estrutural adotado, proposto por Ngo-Huu et al. (2007, apud Ricardo 2022), não indica a existência de sistemas de proteção ativa, portanto, o valor de γ_n será adotado igual a 1.

O coeficiente γ_s , que depende do risco de incêndio e das consequências de colapso estrutural, teve seu valor determinado a partir da Equação 2.5. A princípio, efetuou-se o cálculo do coeficiente γ_{s1} , dado pela Equação 2.6, que relaciona a área compartimentada e a altura da edificação. A área compartimentada A_f é encontrada a partir da Figura 3.1, percebendo-se que a área do compartimento de incêndio, no terceiro pavimento, é equivalente a 107,16 m². Enquanto a altura da edificação, também mostrada na Figura 3.1, é de 21,95 metros. Substituindo estes valores na Equação 2.6, encontra-se γ_{s1} igual a 1,03.

Ao mesmo tempo que o coeficiente γ_{s2} , relacionado ao risco de ativação do incêndio, foi determinado pela Tabela 2.3. Quanto à ocupação, a edificação classifica-se como de risco “Normal”, tendo o valor deste coeficiente igual a 1,0. Deste modo, a partir da determinação de γ_{s1} e γ_{s2} , tem-se, por meio da Equação 2.5, que o valor de γ_s é 1,03.

Por sua vez, o coeficiente W, que relaciona a ventilação do ambiente e a altura do compartimento, foi encontrado por meio da Equação 2.7. Os itens citados podem ser visualizados na Figura 3.1. Sendo a altura do compartimento H igual a 3,658 m e fator de abertura dado por Ricardo (2022) equivalente a 0,04 m^{1/2}, considerando as dimensões reais com área de piso (A_f) de 53,51 m² e área de abertura (A_v) igual a 4,48 m², tem-se uma taxa de ventilação A_v/A_f igual a 0,083, em conformidade com o limite normativo da IT 08 do CBMAL (2021) de $0,025 \leq A_v/A_f \leq 0,3$. Dessa forma, substituindo estes valores na Equação 2.7, encontra-se o fator W igual a 1,77 (adimensional).

O coeficiente M, relacionado ao material escolhido para a estrutura da edificação, foi determinado diretamente por meio da Tabela 2.4, podendo-se fazer o uso das Equações 2.8 e 2.9, se necessário. Considerando o aço com seções simétricas, carregamento uniformemente distribuído e com revestimento contra fogo, determina-se o coeficiente M igual a 1,0 (adimensional).

Em síntese, os valores dos parâmetros determinados ao longo desta subseção foram organizados e sintetizados na Tabela 3.1, a fim de facilitar a visualização e a conferência dos dados adotados.

Tabela 3.1 – Parâmetros da Equação do Tempo Equivalente t_{eq}

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado	Unidade	Referência
Carga de incêndio específica	$q_{fi,k}$	700	MJ/m ²	Tabela 2.1
Coeficiente de proteção ativa	γ_n	1,00	Adimensional	Equação 2.4
Coeficiente de segurança	γ_s	1,03	Adimensional	Equação 2.5
Coeficiente térmico	K	0,07	min·m ² /MJ	Rodrigues e Oliveira (2021)
Fator de ventilação	W	1,77	Adimensional	Equação 2.7
Fator do material estrutural	M	1,00	Adimensional	Tabela 2.4

Fonte: Autor, 2026.

A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 3.1, previamente determinados conforme as normas técnicas e referências adotadas, procedeu-se ao cálculo do tempo equivalente t_{eq} por meio da aplicação da Equação 2.3. O valor encontrado é obtido da consideração conjunta da carga de incêndio específica, ausência de medidas de proteção ativa, risco de incêndio e das consequências associadas ao colapso estrutural, assim como das condições de ventilação do compartimento e das características do material estrutural. O resultado do TRRF adotado pela análise conjunta dos métodos é apresentado e discutido na seção 4.

3.3 Fator de massividade

A determinação do fator de massividade (ou fator de forma) dos perfis foi realizada após a caracterização geométrica dos elementos estruturais, a partir dos procedimentos indicados na seção 2.6, sendo calculado pela Equação 2.19 (para estrutura revestida) com auxílio do Anexo C deste trabalho. Este fator é uma relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal bruta indicando a taxa de aquecimento do perfil, ou seja, a rapidez com que o elemento aquece.

Inicialmente, classificaram-se os elementos estruturais (vigas e pilares), individualmente, quanto à posição de exposição ao fogo, contendo o número de faces expostas

ao incêndio e a localização de canto, central, etc. Após a classificação, determinada pela posição do elemento no modelo estrutural, foram encontrados os perímetros de exposição ao fogo e determinada a área da seção transversal de cada perfil.

Os cálculos foram sistematizados em planilha eletrônica, relacionando o perímetro exposto ao incêndio pela área da seção dos perfis em aço, a partir da qual foram extraídos os resultados apresentados na Tabela 3.2. A tabela relaciona o tipo de elemento estrutural, pavimento relativo, tipo de perfil, o perímetro exposto (m), a área da seção transversal (m²) e o fator de massividade (m⁻¹).

Tabela 3.2 - Determinação do Fator de Massividade (m⁻¹)

Elemento	Pavimento	Perfil	Perímetro exposto (m)	Área (m ²)	Massividade (m ⁻¹)
Vigas	1 - 3	W12x26	0,65938	0,00499	132
		W12x53	0,83162	0,00892	93
		W12x87	1,61680	0,01686	96
	4 - 6	W12x26	0,65938	0,00499	132
		W12x53	0,83162	0,00892	93
		W12x87	0,97550	0,01686	58
Pilares	1 - 3	W12x87	0,97550	0,01686	58
		W12x120	1,99474	0,02360	85
		W12x87	0,97550	0,01686	58
	4 - 6	W10x60	0,80660	0,01162	69
		W10x60	0,80660	0,01162	69
		W10x60	0,80660	0,01162	69

Fonte: Autor, 2026.

3.4 Levantamento de catálogos técnicos dos materiais

Após a determinação do TRRF e do fator de massividade dos perfis metálicos, realizou-se uma busca por catálogos técnicos contendo cartas de cobertura que relacionassem esses parâmetros ao dimensionamento da espessura dos materiais de proteção térmica. Para essa etapa, foram utilizadas cartas de cobertura internacionais previamente verificadas, uma vez que não foram identificados, nos sítios eletrônicos de fornecedores nacionais de proteção passiva contra incêndio, documentos equivalentes disponíveis para consulta.

Para cada sistema de proteção passiva analisado neste estudo — tinta intumescente, argamassa projetada e placas de gesso acartonado — foram selecionadas duas cartas de

cobertura fornecidas por fabricantes distintos. Essa estratégia permitiu avaliar a influência das diferentes cartas de cobertura no dimensionamento das espessuras de um mesmo material de proteção, bem como comparar os resultados obtidos entre os diferentes sistemas de proteção passiva estudados.

A Tabela 3.3 apresenta os materiais de proteção térmica considerados e as respectivas empresas fornecedoras das cartas de cobertura utilizadas. As cartas empregadas no dimensionamento das espessuras encontram-se apresentadas nos Anexos D a I deste trabalho.

Tabela 3.3 – Empresas fornecedoras das cartas de cobertura

Sistema de proteção	Material de proteção	Empresa
Tinta intumescente	Pintura Ignífuga Teclack-W	Mercor Tecresa
	Titantech A80 y A85	Titantech - La Solución Industrial
Argamassa projetada	Argamassa Tecwool F	Mercor Tecresa
	Tria Promaspray F250	Tria
Placas de gesso acartonado	Painéis Tecbor	Mercor Tecresa
	Painéis Antifúrmicos Tecbor	Mercor Tecresa

Fonte: Autor, 2026.

Após determinar as espessuras de proteção e quantificar os materiais na Seção 3.5, procedeu-se à estimativa de custos. Para tanto, foram consultadas empresas brasileiras fornecedoras de produtos para as seis alternativas de materiais consideradas.

Os resultados do dimensionamento da espessura dos materiais de proteção passiva e a análise técnico-econômica serão apresentados e discutidos na seção 4.

3.5 Dimensionamento da espessura e estimativa da quantidade dos materiais de proteção passiva

As espessuras dos materiais de proteção térmica foram determinadas para cada perfil estrutural, considerando o TRRF adotado e o respectivo fator de massividade. Para isso, foram utilizadas as cartas de cobertura dos fabricantes, as quais relacionam a espessura mínima do material de proteção.

Para cada produto selecionado nos sistemas de proteção analisados, conforme apresentado na Tabela 3.3, foram definidas as espessuras necessárias para limitar a elevação da

temperatura do aço e garantir o desempenho estrutural durante o tempo de exposição correspondente ao TRRF.

Após a definição das espessuras, foi realizada a estimativa do quantitativo dos materiais de proteção térmica. Para isso, desenvolveu-se um procedimento de cálculo baseado na área superficial exposta dos perfis ao incêndio, considerando as características geométricas dos elementos estruturais e a posição ocupada por cada um deles no modelo analisado.

A classificação dos elementos quanto à posição na estrutura, bem como o número de perfis considerados em cada pavimento, é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Quantidade de perfis por pavimento e classificação quanto a posição

Elemento	Pavimento	Perfil	Quantidade efetiva de perfis nos 3 pavimentos	Classificação quanto a posição
Vigas	1 - 3	W12x26	12	Viga de canto
		W12x53	6	Viga de canto
		W12x87	3	Viga de centro
	4 - 6	W12x26	6	Viga de canto
		W12x53	3	Viga de canto
		W12x87	3	Viga de canto
Pilares	1 - 3	W12x87	6	Pilar de canto
		W12x120	6	Pilar de centro
		W12x87	6	Pilar de canto
	4 - 6	W10x60	4	Pilar de canto
		W10x60	4	Pilar de canto
		W10x60	4	Pilar de canto

Fonte: Autor, 2026.

As formulações utilizadas foram desenvolvidas com base na geometria dos perfis metálicos e na configuração geral do modelo estrutural apresentado na Figura 3.1. Para fins de cálculo, os elementos foram classificados em vigas de canto, vigas de centro, pilares de canto e pilares de centro, conforme indicado na Tabela 3.4.

Para a determinação dos quantitativos, os sistemas de proteção foram diferenciados conforme o método de aplicação adotado. A tinta intumescente e a argamassa projetada foram consideradas como sistemas de proteção do tipo contorno, com aplicação direta sobre as faces dos perfis metálicos expostas à ação do incêndio. Nesses casos, o volume teórico de material foi obtido pelo produto entre a área superficial protegida e a espessura de revestimento determinada pelas respectivas cartas de cobertura.

As placas de gesso acartonado foram consideradas como sistema de proteção do tipo enclausuramento, por meio da construção de uma caixa envolvendo o elemento estrutural. Para esse sistema, o quantitativo foi determinado em função da área de placas necessária para compor o enclausuramento do perfil.

As equações utilizadas para o cálculo dos quantitativos foram definidas com base nas dimensões geométricas dos perfis e nas faces expostas ao incêndio. Os elementos estruturais foram classificados como vigas de centro, vigas de canto, pilares de centro e pilares de canto, conforme sua posição no modelo estrutural, de modo a representar diferentes condições de exposição ao fogo e, conseqüentemente, diferentes áreas de proteção.

Para os sistemas de proteção por contorno (tinta intumescente e argamassa projetada), foram consideradas as seguintes faces expostas:

- Vigas de centro: face inferior e duas faces laterais;
- Vigas de canto: face inferior e uma face lateral;
- Pilares de centro: todas as faces expostas ao fogo;
- Pilares de canto: duas faces expostas ao fogo, sendo uma paralela à dimensão B e outra paralela à dimensão h .

Para o sistema de proteção por enclausuramento (placas de gesso acartonado), adotaram-se as seguintes configurações:

- Vigas: enclausuramento das três faces expostas ao fogo, correspondentes à face inferior paralela à dimensão B e às duas faces laterais paralelas à dimensão h ;
- Pilares: enclausuramento de todas as faces expostas ao fogo, correspondentes a duas faces paralelas à dimensão B e duas faces paralelas à dimensão h .

Assim, por meio dessas configurações, as Equações 3.1 a 3.6 foram utilizadas na determinação dos quantitativos necessários para cada elemento estrutural analisado.

- Viga de centro – Tinta intumescente e argamassa projetada:

$$V = tL[b + 2h + 2(b - t_w) + 4t_f] \quad (3.1)$$

- Vigas de canto – Tinta intumescente e argamassa projetada:

$$V = tL[b + h + (b - t_w) + 2t_f] \quad (3.2)$$

- Pilar de centro – Tinta intumescente e argamassa projetada:

$$V = tL[2h + 2b + 4t_f] \quad (3.3)$$

- Pilar de canto – Tinta intumescente e argamassa projetada:

$$V = tL[b + h + 2t_f] \quad (3.4)$$

- Viga – Gesso acartonado:

$$A = L[(b + 2t) + 2(h + 2t_f + 2t)] \quad (3.5)$$

- Pilar – Gesso acartonado:

$$A = L[2(b + 2t) + 2(h + 2t_f + 2t)] \quad (3.6)$$

Em que:

V : volume (litros ou quilogramas);

A : área (m²);

L : comprimento do elemento estrutural (cm);

t : espessura do material de proteção (cm)

b : largura da aba superior ou inferior do perfil (cm);

h : altura interna da alma do perfil (cm);

t_f : espessura da aba (cm);

t_w : espessura da alma (cm).

As espessuras dos materiais de proteção térmica foram obtidas por meio das cartas de cobertura e expressas em milímetros. Dessa forma, os cálculos dos quantitativos foram realizados utilizando as dimensões geométricas dos perfis e as espessuras de proteção nessa unidade, sendo incorporadas as conversões necessárias para a obtenção dos quantitativos nas unidades de comercialização de cada material.

Para a tinta intumescente, o quantitativo foi expresso em litros (L). O volume de material foi determinado a partir do produto entre a área protegida e a espessura de revestimento, resultando inicialmente em mm³. Em seguida, aplicaram-se as conversões de unidade para obtenção do volume em litros.

Para a argamassa projetada, o quantitativo foi expresso em massa (kg). Inicialmente, determinou-se o volume teórico de material e, após sua conversão para m^3 , a massa necessária foi calculada a partir da massa específica do produto. Para as duas argamassas analisadas, adotou-se massa específica igual a $250 \text{ kg}/m^3$, conforme especificações dos fabricantes.

Para as placas de gesso acartonado, o quantitativo foi expresso em área (m^2). As formulações empregadas forneceram inicialmente resultados em mm^2 , sendo aplicada a conversão para m^2 , unidade adotada para quantificação desse sistema de proteção.

3.6 Estimativa de custos para as soluções

A estimativa de custos de cada sistema de proteção passiva foi realizada a partir da relação entre os quantitativos obtidos pelas Equações 3.1 a 3.6 e o número de elementos mostrados na Tabela 3.4, assim como a partir da cotação de dois produtos comerciais brasileiros para cada solução analisada, conforme apresentado na Tabela 3.5. Com base nisso, foi estabelecida a relação entre o consumo estimado e o preço unitário de cada alternativa.

A Tabela 3.5 relaciona o tipo de produto, empresa fornecedora, quantidade do produto e valor unitário, de modo que essas informações serão utilizadas na estimativa final de custos para comparação entre soluções.

Tabela 3.5 – Empresas brasileiras fornecedoras dos materiais de proteção

Descrição do Produto	Empresa	Quantidade do produto	Valor do produto (R\$)
Tinta Anti Chamas Base Água 3,6 l Brasifire Com Laudo - Cores	Brasilux	3,60 litros	349,90
Renner Stofire Tinta Intumescente Branco - Classificação A - 30 a 90 Minutos - 18 Litros - Para Estrutura Metálica	Nippon tintas	18 litros	2630,00
THERMO-X – Argamassa Térmica, Acústica e Antichama (12 kg)	Grupo GRX São Paulo	12 quilogramas	68,50
Argamassa Projetada Firestop (22 kg)	Pilar Fire Protection	22 quilogramas	17,00
Placa de gesso acartonado RF 1200x1800x12,5mm Drywall (Rosa) Knauf	Metal Perfil	1 unidade	58,90
Placa Gypsum Fortissima RF 1,20x 1,80 (15 mm)	All Drywall	1 unidade	72,05

Fonte: Autor, 2026.

A análise econômica considerou o custo estimado dos materiais necessários para a proteção dos elementos estruturais do edifício, permitindo a comparação entre os diferentes sistemas avaliados. Dessa forma, buscou-se identificar a solução com menor custo entre as alternativas estudadas, considerando o TRRF adotado, o fator de massividade dos perfis e as espessuras de proteção definidas pelas cartas de cobertura.

Ressalta-se que este estudo se restringiu à estimativa de consumo e custo dos materiais de proteção térmica. Portanto, não foram considerados custos adicionais relacionados a frete, logística, perdas de material, equipamentos, aplicação, instalação, mão de obra, preparação da superfície ou manutenção.

3.7 Otimização dos sistemas de proteção térmica

A análise de otimização dos sistemas de proteção térmica passiva foi realizada com base na seleção dos materiais que apresentaram os maiores custos estimados em cada categoria avaliada. Dessa forma, foi escolhido um material representativo para cada sistema de proteção, permitindo a comparação dos efeitos da otimização sobre o quantitativo de material e o custo final das soluções analisadas.

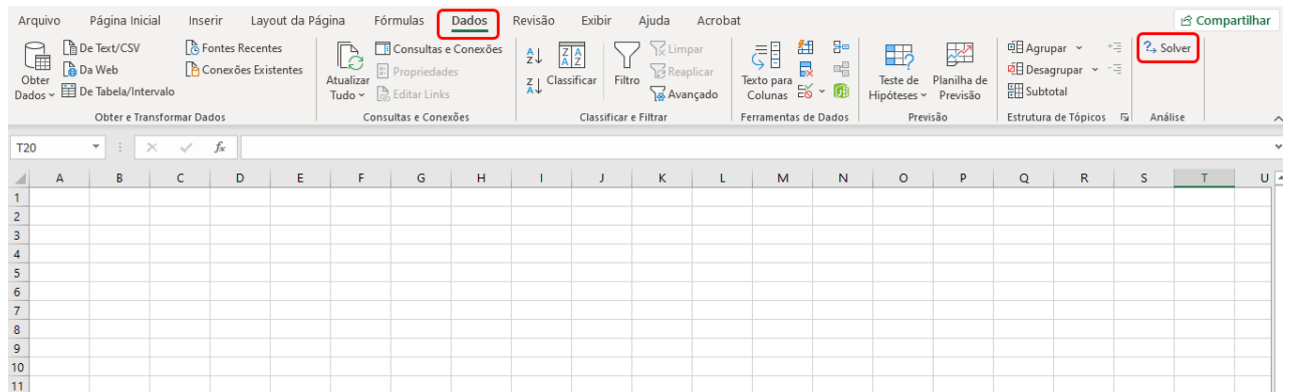
3.7.1 Implementação do problema de otimização não linear no Solver do *Excel*

Para a formulação de um problema de otimização não linear no *Excel* utilizando o Solver, foram adotados os procedimentos sugeridos por Ragsdale (2014), apresentados na sequência:

- a) Organização dos dados na planilha;
- b) Separar células na planilha para representar as variáveis de projeto;
- c) Adicionar em uma célula da planilha a fórmula da função objetivo adotada;
- d) Descrever as restrições que serão adotadas.

Com isso, acessou-se a barra superior de ferramentas na opção “Dados”, selecionando-se, posteriormente, a ferramenta “Solver”, localizada na parte superior esquerda da interface, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Localização da janela principal de trabalho



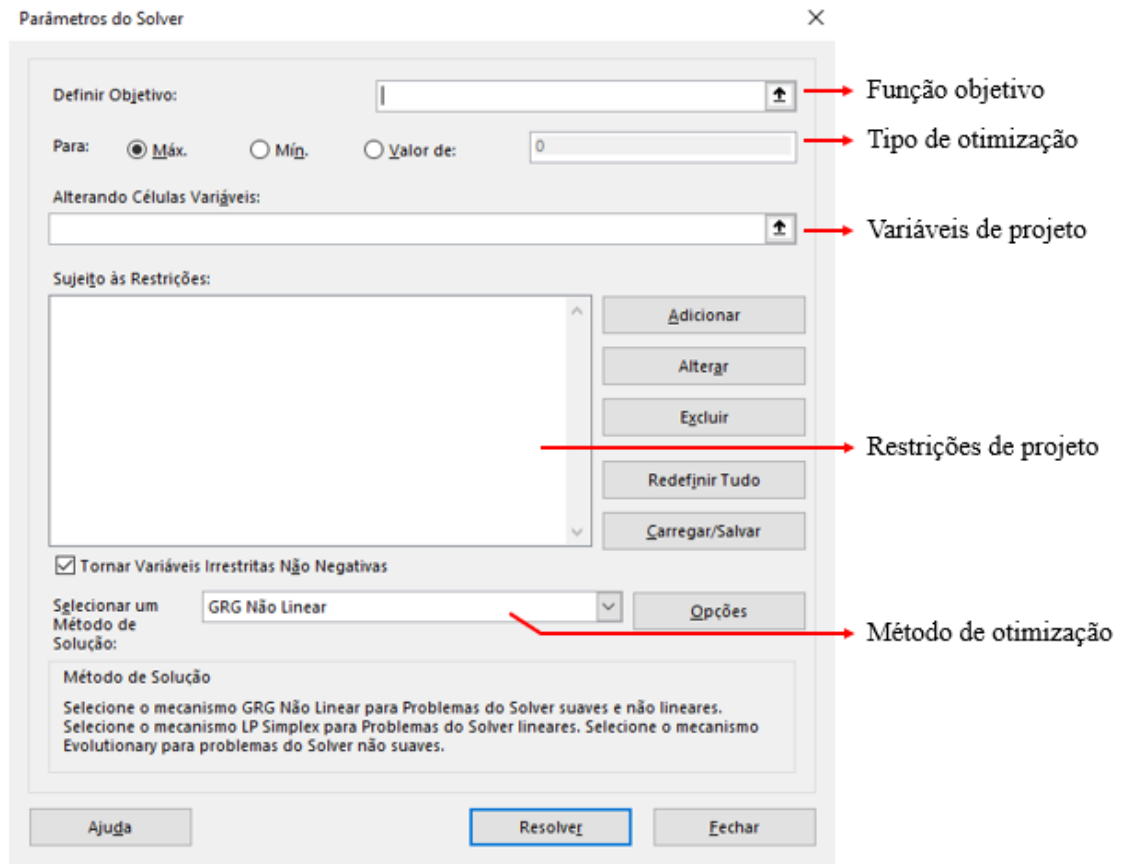
Fonte: Autor (2026).

Após selecionar a opção “Solver” na barra de ferramentas superior, foi aberta uma caixa de diálogo em que os parâmetros de otimização foram inseridos seguindo as etapas apresentadas a seguir:

- Função Objetivo: para esse item foi selecionada a célula referente a fórmula da função objetivo estabelecida inicialmente, que está relacionada às variáveis de projeto.
- No item abaixo, seleciona-se o objetivo da otimização, podendo ser “maximizar”, “minimizar” ou “valor pré-estabelecido”.
- Variáveis de projeto: nesse item, foi selecionada célula contendo o parâmetro que variaria para que a função objetivo atingisse seu “ponto ótimo”, considerando as restrições impostas.
- Restrições de projeto: nesse campo são adicionadas, alteradas ou excluídas as restrições que devem ser atendidas.
- Método de otimização: nesse espaço, deve ser selecionado o método de otimização empregado no problema, podendo ser o GRG não linear, Simplex ou Evolutionary.
- Resolver: ao selecionar a opção resolver, o Solver Excel buscará uma solução ótima, variando determinados parâmetros e atendendo às restrições impostas e emitirá o resultado.

A Figura 3.3 apresenta a caixa de diálogo utilizada para inserção dos parâmetros de cálculo.

Figura 3.3 – Caixa de diálogo do menu principal de trabalho



Fonte: Autor (2026).

A formulação do problema de otimização foi realizada por meio do método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), considerando como função objetivo as Equações 3.1 a 3.6, de acordo com a configuração de cada perfil estrutural do modelo. Para isso, adotou-se o parâmetro espessura (t) como variável de projeto, com o objetivo de minimizar sua dimensão, de modo a satisfazer a Equação 2.17, tendo como principal restrição o atendimento à temperatura crítica do aço de 500 °C, prevista nas cartas de cobertura. Vale ressaltar que o valor de 500 °C adotado como a temperatura crítica do aço para verificação, está de acordo com literaturas vigentes que estimam que seja entre 500 a 700 °C, embora muitos estudos adotem como 550 °C.

3.7.2 Parâmetros de cálculo adotados na otimização do quantitativo de materiais

Foram considerados como materiais representativos aqueles que apresentaram os maiores custos em cada categoria analisada: Tinta Intumescente Branco – Renner Stofire, Argamassa Térmica, Acústica e Antichama – Thermo X e Placa Gypsum Fortíssima RF. Para cada material, a otimização foi realizada com base nas propriedades térmicas disponíveis em catálogos técnicos e na literatura especializada.

A formulação do problema de otimização foi conduzida a partir de uma idealização geral aplicada à análise individual de cada perfil metálico, considerando sua geometria, condição de exposição ao incêndio e as características do revestimento térmico.

A formulação consistiu em adotar funções capazes de representar o quantitativo necessário de cada sistema de proteção passiva para atender ao TRRF calculado e aos limites admissíveis de temperatura do aço. Observando o equacionamento apresentado anteriormente, nota-se que as expressões diretamente relacionadas ao cálculo da quantidade de material de proteção são dadas pelas Equações 3.1 a 3.6, capazes de fornecer a quantidade de tinta intumescente (L), argamassa projetada (kg) e placas de gesso acartonado (m²).

As equações apresentadas, além de relacionarem os parâmetros geométricos de cada perfil observados na Figura 3.1, apresentam como principal variável a espessura do material de proteção térmica t , parâmetro adotado como variável de projeto para a formulação do problema de otimização. A variável t foi inicialmente determinada por meio das cartas de cobertura e, nesta etapa, será determinada a partir da aplicação do método de otimização não linear do GRG.

A otimização da espessura do material de proteção passiva será realizada por meio da combinação das equações responsáveis pelo cálculo do quantitativo de material com a Equação 2.17, que fornece a base normativa para verificação dos critérios analisados e dos limites de segurança estabelecidos.

A Equação 2.17 foi adotada como requisito normativo para validar se a espessura mínima do revestimento atende aos limites de projeto, considerando a geometria do perfil, a condição de temperatura do aço e dos gases, bem como as características térmicas do material de proteção. A Tabela 3.6 apresenta os valores dos parâmetros de cálculo utilizados para cada material de proteção.

Tabela 3.6 – Parâmetros de cálculo dos materiais de proteção para otimização			
Parâmetro de cálculo	Tinta intumescente	Argamassa projetada	Placas de gesso acartonado
Calor específico c_m (J/(kg °C))	900	1050	1700
Condutividade térmica λ_m (W/m °C)	0,20	0,061	0,31
Massa específica ρ_m (kg/m ³)	1310	250	925

Fonte: Autor, 2026.

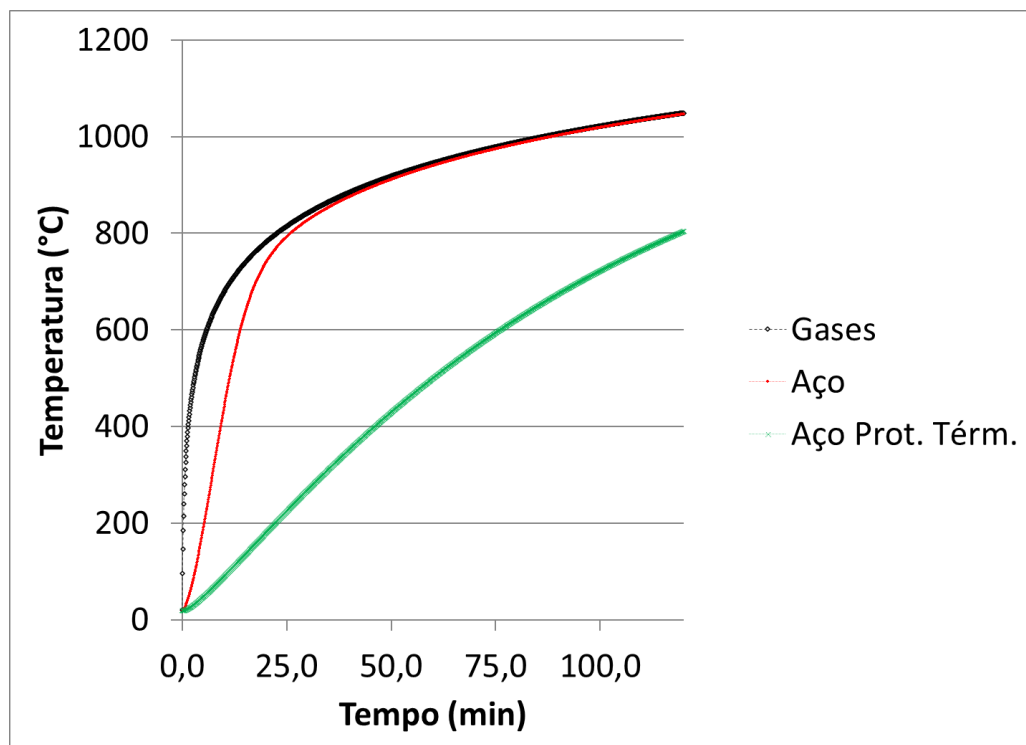
Para a tinta intumescente, os valores do calor específico e da condutividade térmica foram adotados de acordo com a literatura complementar de Li, Han e Wang (2017), enquanto

o valor da massa específica foi obtido a partir do catálogo técnico do material. No caso da argamassa projetada e das placas de gesso acartonado, a condutividade térmica e a massa específica tiveram seus valores obtidos nos respectivos catálogos técnicos, enquanto o calor específico foi adotado com base em Bernardes (2002).

Outros parâmetros da Equação 2.17 com valores constantes, como a massa específica e o calor específico do aço, foram adotados, respectivamente, como sendo $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ e $c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, de acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), conforme apresentado anteriormente na subseção 2.4. O fator de massividade (u_m/A_g) dos perfis foi considerado individualmente na aplicação da referida equação, conforme mostrado na Seção 3.3.

Por fim, os parâmetros $\Delta\theta_{a,t}$, $\theta_{a,t}$ e $\theta_{g,t}$, presentes na Equação 2.17 e relacionados à elevação da temperatura do aço e à temperatura dos gases, foram obtidos considerando a variação temporal do incêndio, representando a evolução padronizada da temperatura ao longo do tempo. Dessa forma, foi gerada uma curva padrão de temperatura para cada perfil metálico analisado. A Figura 3.4 apresenta a curva padrão para um perfil em aço W12x26 com fator de massividade igual a 132 m^{-1} . Para cada perfil estrutural foi realizada essa análise; entretanto, devido à extensão do processo, será apresentado apenas o caso citado para fins de exemplificação.

Figura 3.4 – Curva padrão para um perfil em aço com massividade de 132 m^{-1}



Fonte: Autor (2026).

Após a consideração conjunta dos parâmetros apresentados para cada perfil metálico e para os três materiais de proteção térmica, foram obtidas novas espessuras otimizadas, que serão utilizadas na função custo de cada sistema de proteção para posterior comparação com os resultados obtidos antes do processo de otimização.

3.7.3 Formulação do problema de otimização

A função objetivo foi definida como a minimização do custo total do sistema de proteção térmica, calculado a partir do produto entre o quantitativo de material $Q(t)$, dependente da espessura (t), e o respectivo preço unitário P . Assim, a formulação simplificada do problema de otimização pode ser expressa por meio da Equação 3.7.

$$\min C(t) = Q(t) \cdot P \quad (3.7)$$

Onde:

$C(t)$: custo do sistema de proteção passiva;

$Q(t)$: quantitativo do material em função da espessura t ;

P : preço unitário do material de proteção térmica.

O processo de otimização foi realizado a partir da consideração de restrições térmicas de segurança e limites práticos de aplicação do material. As Equações 3.8 e 3.9 apresentam as restrições adotadas.

$$\theta_a(t) \leq \theta_{lim} \quad (3.8)$$

$$t_{min} \leq t \leq t_{m\acute{a}x} \quad (3.9)$$

A principal restrição de desempenho adotada foi que a temperatura do aço $\theta_a(t)$ não fosse superior à temperatura crítica de $\theta_{lim} = 500$ °C, garantindo a manutenção da capacidade resistente do elemento estrutural durante a exposição ao incêndio. Adicionalmente, foram estabelecidos limites mínimo e máximo para a espessura do material de proteção térmica, limitando-a ao intervalo $0,001 \leq t \leq 0,1$ m, equivalente a espessuras entre 1 mm e 100 mm. A aplicação dessas restrições foi realizada para garantir soluções fisicamente viáveis e compatíveis com as condições executivas dos materiais analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no dimensionamento e na otimização de diferentes materiais de proteção térmica aplicados a elementos estruturais metálicos em situação de incêndio. A análise é estruturada em duas etapas complementares. Na primeira, apresentam-se os resultados do dimensionamento dos materiais de proteção passiva selecionados (tintas intumescentes, argamassas projetadas e placas de gesso acartonado), incluindo a determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) adotado no estudo e a verificação da possibilidade de sua redução em até 30 minutos, seguida de uma avaliação comparativa sob as perspectivas técnica e econômica. Na segunda etapa, apresentam-se os resultados da otimização das espessuras desses materiais de proteção térmica, com o objetivo de atender simultaneamente aos requisitos de segurança em situação de incêndio e à minimização dos custos associados.

4.1 Dimensionamento e análise técnico-econômica comparativa dos materiais

4.1.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

A edificação analisada foi classificada como pertencente ao Grupo D, divisão D-1, correspondente a locais destinados à prestação de serviços profissionais e técnicos, enquadrando-se como edificação de escritórios administrativos, conforme os critérios da ABNT NBR 14432 (2001). Considerando a ausência de subsolo e a altura da edificação inserida na classe P2 ($12\text{ m} < h \leq 23\text{ m}$), obteve-se, pelo método tabular, um TRRF igual a 60 minutos.

Adicionalmente, foi realizada a verificação pelo método do tempo equivalente, com base nos parâmetros de carga de incêndio, ventilação, risco de incêndio, condições do compartimento e características do sistema estrutural. Os valores adotados para esses parâmetros foram apresentados na Tabela 3.1. A aplicação da equação correspondente resultou em um tempo equivalente t_{eq} de 89,22 minutos, podendo-se aproximar para 90 minutos.

A comparação entre os dois procedimentos mostra que o valor obtido pelo método do tempo equivalente foi superior ao TRRF tabelado, indicando que, para as condições analisadas, o cenário de incêndio apresenta severidade superior àquela implicitamente considerada pelo método tabular. Assim, não se verificou possibilidade de redução do TRRF em até 30 minutos, uma vez que o método do tempo equivalente não conduziu a um valor inferior ao tabelado.

Para fins de dimensionamento teórico neste trabalho, adotou-se o TRRF de 60 minutos, em conformidade com Silva (2016), com a ABNT NBR 14432 (2001) e com a exigência mínima estabelecida pela Instrução Técnica - IT N° 01 do Corpo de Bombeiros Militar de Alagoas (CBMAL, 2021), que em seu Anexo B, estabelece um TRRF mínimo de 60 minutos para a proteção estrutural. Contudo, sob uma ótica conservadora de projeto, o valor de 90 minutos representaria uma condição mais severa e, portanto, conduziria a uma solução de proteção estrutural com maior nível de segurança em situação de incêndio.

4.1.2 Dimensionamento da espessura dos materiais de proteção térmica

Definido o TRRF de 60 minutos e considerando o fator de massividade de cada perfil (mostrado na seção 3), procede-se ao dimensionamento das espessuras dos materiais de proteção térmica selecionados, a partir das cartas de cobertura, com base nos catálogos técnicos. Essa etapa tem como objetivo verificar as espessuras necessárias para que os elementos estruturais apresentem desempenho térmico compatível com o TRRF adotado, limitando a elevação da temperatura do aço e preservando sua capacidade resistente.

A Tabela 4.1 apresenta as espessuras requeridas para cada material de proteção passiva, considerando-se a temperatura crítica do aço de 500 °C e a relação entre o TRRF adotado e o fator de massividade dos perfis.

Tabela 4.1 - Espessura dos materiais de proteção passiva

Caracterização dos elementos estruturais				Tinta Intumescente - Espessura (mm)		Argamassa Projetada - Espessura (mm)		Placa de Gesso Acartonado - Espessura (mm)	
Elementos	Pavim.	Perfil	Massiv.	Teclack-W	Titantech A80 y A85	Tecwool F de Lã de Rocha	Tria Promaspray F250	Painéis Tecbor	Painéis Antifúrmicos Tecbor
Vigas	1 - 3	W12x26	132	1,058	0,867	14	17	13,9	11,8
		W12x53	93	0,82	0,688	11	17	11,7	9,5
		W12x87	96	0,858	0,718	11	17	11,7	9,5
	4 - 6	W12x26	132	1,058	0,867	14	17	13,9	11,8
		W12x53	93	0,82	0,688	11	17	11,7	9,5
		W12x87	58	0,621	0,418	10	17	9,5	9,5
Pilares	1 - 3	W12x87	58	0,621	0,418	10	17	9,5	9,5
		W12x120	85	0,745	0,615	10	17	10,8	9,5
		W12x87	58	0,621	0,418	10	17	9,5	9,5
	4 - 6	W10x60	69	0,631	0,463	10	17	9,5	9,5
		W10x60	69	0,631	0,463	10	17	9,5	9,5
		W10x60	69	0,631	0,463	10	17	9,5	9,5

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados da Tabela 4.1 evidenciam que a massividade exerce influência direta sobre o dimensionamento das espessuras de proteção térmica, confirmando o comportamento esperado pela teoria. De modo geral, quanto maior a relação entre perímetro exposto ao fogo e área da seção transversal, maior a taxa de aquecimento do perfil e, consequentemente, maior a espessura necessária para assegurar o desempenho em situação de incêndio.

Os valores mais elevados de espessura foram observados para as vigas W12x26, em todos os pavimentos que apresentaram fator de massividade de 132 m^{-1} . Para esses elementos, registraram-se os maiores valores em praticamente todos os sistemas de proteção analisados, o que os caracteriza como os casos mais críticos sob o ponto de vista térmico. Em contrapartida, os menores valores de espessura concentram-se nos perfis com massividades de 58 m^{-1} e 69 m^{-1} , como as vigas W12x87 no intervalo dos pavimentos 4 a 6 e os pilares W10x60, evidenciando menor severidade térmica nessas condições.

Um aspecto particularmente relevante observado na Tabela 4.1 é que um mesmo perfil pode apresentar diferentes fatores de massividade em função das condições de exposição ao fogo, especialmente do número de faces expostas. Assim, mesmo quando a geometria da seção permanece inalterada, alterações no número de faces expostas modificam o perímetro sujeito à ação térmica e, consequentemente, o valor da massividade. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, no perfil W12x87, que apresenta diferentes valores de massividade

conforme a condição de exposição considerada. Tal resultado evidencia que o dimensionamento da proteção térmica não depende apenas do perfil nominal, mas também da configuração efetiva de exposição do elemento estrutural ao incêndio.

No caso das tintas intumescentes, verifica-se maior sensibilidade à variação da massividade, com alterações graduais das espessuras requeridas entre os diferentes perfis. Para o sistema Teclack-W, as espessuras variaram entre 0,621 mm e 1,058 mm, enquanto, para o sistema Titantech A80 y A85, os valores oscilaram entre 0,418 mm e 0,867 mm. Esse comportamento indica que, entre os sistemas analisados, as tintas intumescentes respondem de forma mais diretamente proporcional às mudanças do fator de massividade.

As argamassas projetadas apresentaram comportamento distinto entre os fabricantes considerados. O sistema Tecwool F de Lã de Rocha variou entre 10 mm e 14 mm, acompanhando, ainda que de forma discreta, a variação da massividade. Já o sistema Tria Promaspray F250 manteve espessura constante de 17 mm em todos os casos analisados, sugerindo uma prescrição de catálogo mais conservadora ou menos sensível às diferenças geométricas dos perfis dentro da faixa de massividade estudada.

Para as placas de gesso acartonado, observou-se comportamento relativamente mais uniforme, com variação limitada entre os valores obtidos. Os Painéis Tecbor apresentaram espessuras entre 9,5 mm e 13,9 mm, enquanto os Painéis Antifúrmicos Tecbor variaram entre 9,5 mm e 11,8 mm. Essa menor dispersão pode estar associada à padronização típica dos sistemas de enclausuramento, nos quais as recomendações de espessura tendem a ser organizadas em faixas discretas.

Os resultados mostram que, para uma mesma massividade, diferentes sistemas de proteção conduzem a espessuras bastante distintas, refletindo os mecanismos próprios de isolamento térmico de cada solução. As tintas intumescentes requerem espessuras significativamente menores, enquanto argamassas projetadas e placas de gesso acartonado apresentam valores mais elevados. Contudo, essa diferença não deve ser interpretada isoladamente como vantagem técnica ou econômica, uma vez que a escolha do sistema de proteção deve considerar também aspectos como custo global, facilidade de aplicação, impacto arquitetônico, produtividade executiva, manutenção e condições de uso da edificação.

4.1.3 Estimativa da quantidade dos materiais de proteção passiva

A partir das espessuras previamente dimensionadas para os sistemas de proteção térmica dos perfis metálicos, foram estimados os quantitativos necessários de materiais de proteção

passiva para os elementos estruturais expostos ao incêndio. A Tabela 4.2 apresenta os consumos estimados de tinta intumescente, em litros, de argamassa projetada, em quilogramas, e de placas de gesso acartonado, em metros quadrados, considerando as características geométricas dos perfis, as espessuras requeridas e a quantidade efetiva de elementos em cada pavimento.

Tabela 4.2 - Quantitativo dos materiais de proteção por perfil

Elem.	Pavim.	Perfil	Tinta Intumescente (L)		Argamassa Projetada (kg)		Placa de Gesso Acartonado (m ²)	
			Teclack -W	Titantech A80 y A85	Tecwool F de Lã de Rocha	Tria Promaspray F250	Painéis Tecbor	Painéis Antifúrmicos Tecbor
Vigas	1 - 3	W12x26	60,70	49,74	200,79	243,81	75,54	74,80
		W12x53	29,40	24,67	98,61	152,40	40,85	40,47
		W12x87	30,44	25,48	97,57	150,79	22,66	22,47
	4 - 6	W12x26	30,35	24,87	100,39	121,91	37,77	37,40
		W12x53	14,70	12,34	49,31	76,20	20,43	20,23
		W12x87	13,12	8,83	52,80	89,76	22,47	22,47
Pilares	1 - 3	W12x87	9,10	6,12	36,63	62,26	29,65	29,65
		W12x120	22,97	18,96	77,08	131,04	31,02	30,85
		W12x87	9,10	6,12	36,63	62,26	29,65	29,65
	4 - 6	W10x60	5,08	3,73	20,14	34,24	16,44	16,44
		W10x60	5,08	3,73	20,14	34,24	16,44	16,44
		W10x60	5,08	3,73	20,14	34,24	16,44	16,44

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados mostram que o quantitativo de material de proteção não depende exclusivamente do perfil nominal, mas da combinação entre espessura dimensionada, perímetro exposto ao fogo, comprimento efetivo dos elementos e quantidade de perfis presentes em cada pavimento. Nesse contexto, a massividade exerce influência importante, uma vez que afeta diretamente a espessura requerida, mas o consumo final de material também reflete a extensão total a ser protegida.

Observa-se que os maiores quantitativos se concentram, em geral, nas vigas localizadas entre os pavimentos 1 e 3, com destaque para o perfil W12x26, que apresentou os maiores valores em praticamente todos os sistemas analisados, atingindo 60,70 L e 49,74 L de tinta intumescente, 200,79 kg e 243,81 kg de argamassa projetada, e 75,54 m² e 74,80 m² de placas de gesso acartonado, a depender do fabricante considerado. Esses resultados indicam que tais elementos configuram situações mais críticas não apenas em razão da massividade, mas também em função da extensão total protegida.

Também se observa que, para um mesmo perfil, os quantitativos podem variar significativamente entre diferentes pavimentos. Esse comportamento é visível, por exemplo, no perfil W12x26, cujos valores nos pavimentos de 4 a 6 são aproximadamente metade daqueles observados nos pavimentos de 1 a 3. Tendência semelhante ocorre para o perfil W12x53. Tal diferença sugere influência combinada da quantidade de elementos, do comprimento efetivo e das condições de exposição ao fogo em cada situação analisada.

Outro aspecto relevante é que um mesmo perfil pode apresentar quantitativos distintos conforme sua função estrutural e suas condições de exposição ao incêndio. Isso ocorre porque a estimativa do consumo está associada ao perímetro efetivamente exposto ao fogo, o qual depende, entre outros fatores, do número de faces expostas. Assim, elementos com maior exposição tendem a demandar maior quantidade de material de proteção, ainda que possuam a mesma seção nominal.

Entre os sistemas analisados, verifica-se que as tintas intumescentes apresentam menores quantitativos em termos absolutos, em razão das reduzidas espessuras requeridas. Já as argamassas projetadas apresentaram os maiores consumos em massa, o que se explica pelas maiores espessuras adotadas e pela natureza do material. As placas de gesso acartonado, por sua vez, apresentaram valores intermediários em área, coerentes com a estratégia de proteção por enclausuramento. Ressalta-se, entretanto, que esses quantitativos não devem ser comparados de maneira particular, uma vez que se referem a unidades físicas distintas. Sua interpretação deve ser articulada, posteriormente, com a análise de custos.

A comparação entre fabricantes evidencia, ainda, diferenças relevantes dentro de um mesmo sistema de proteção. No caso das tintas intumescentes, os quantitativos estimados para o sistema Teclack-W foram sistematicamente superiores aos do sistema Titantech A80 y A85. Situação semelhante foi observada entre as argamassas projetadas, para as quais o sistema Tria Promaspray F250 apresentou consumos superiores aos do sistema Tecwool F de Lã de Rocha. Para as placas de gesso acartonado, as diferenças entre os sistemas analisados mostraram-se menos acentuadas, indicando maior uniformidade relativa entre as recomendações adotadas.

De modo geral, os resultados evidenciam que diferentes sistemas de proteção passiva conduzem a consumos bastante distintos para uma mesma situação estrutural. Assim, a estimativa dos quantitativos fornece subsídios importantes para a etapa de análise comparativa sob o ponto de vista econômico, permitindo avaliar não apenas o desempenho térmico das soluções, mas também sua viabilidade prática de aplicação no contexto estudado.

4.1.4 Estimativa de custos por material de proteção

Após a determinação das quantidades dos materiais de proteção térmica, considerando as configurações de exposição ao fogo dos perfis, conforme recomendações normativas e o número de elementos em cada pavimento, procedeu-se à estimativa dos custos de cada solução de segurança contra incêndio.

Nessa etapa, foram totalizados os volumes de tinta intumescente e argamassa projetada, assim como a área de placas de gesso acartonado necessários para cada tipo de material adotado. Na sequência, após a consolidação desses quantitativos, foi efetuado o cálculo do custo total de cada solução, utilizando-se os valores de referência como base indicados na Tabela 3.5.

A Tabela 4.3 sintetiza os resultados obtidos, relacionando o tipo de material, sua descrição simplificada, a quantidade total estimada necessária, a quantidade efetiva para compra e o custo efetivo estimado. Ressalta-se que, embora as tabelas utilizadas para o dimensionamento das espessuras de proteção tenham origem em referências técnicas internacionais, nesta etapa de levantamento de custos, foram adotados materiais disponíveis no mercado brasileiro e seus respectivos valores comerciais disponíveis nos sites dos fornecedores, a partir da Tabela 3.5, buscando maior aderência às condições reais de especificação e aquisição no contexto nacional.

Tabela 4.3 - Custo total estimado das soluções de proteção passiva

Sistema de proteção	Produto	Quantidade necessária estimada	Quantidade efetiva para compra	Custo efetivo estimado
Tinta intumescente	Tinta Anti-Chamas - Base Água 3,6 L Brasifire - Com Laudo	235,12 L	65 latas	R\$ 22.852,58
	Renner Stofire Tinta Intumescente Branco - Classificação A - 30 A 90 Minutos - 18 Litros - Para Estrutura Metálica	188,32 L	10 latas	R\$ 27.514,97
Argamassa projetada	Thermo-X – Argamassa Térmica, Acústica e Antichama (12 kg)	810,22 kg	68 sacos	R\$ 4.625,01
	Argamassa Projetada Firestop (22 kg)	1193,15 kg	54 sacos	R\$ 921,98
Placas de gesso acartonado	Placa de gesso acartonado RF 1200x1800x12,5mm Drywall (Rosa) Knauf	359,35 m ²	166 placas	R\$ 9.799,03
	Placa Gypsum Fortissima RF 1,20x 1,80 (15 mm)	357,30 m ²	165 placas	R\$ 11.918,38

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados evidenciam diferenças expressivas entre as soluções analisadas em termos de custo estimado de material. De modo geral, as tintas intumescentes apresentaram os maiores custos totais entre as alternativas avaliadas. A tinta anti-chamas *Brasifire* apresentou custo estimado de R\$ 22.852,58, enquanto a tinta intumescente Renner *Stofire* atingiu R\$ 27.514,97, configurando o maior valor entre todas as soluções comparadas.

Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, ao elevado custo unitário desses produtos e à necessidade de aplicação em espessuras compatíveis com o desempenho requerido em situação de incêndio, o que implica maior consumo de material. Embora as tintas intumescentes apresentem vantagens relevantes, como menor interferência arquitetônica e reduzido acréscimo de massa à estrutura, o custo elevado pode limitar sua atratividade em empreendimentos com grande quantidade de elementos estruturais a serem protegidos.

As soluções em placas de gesso acartonado apresentaram custos intermediários. A placa *RF Drywall Knauf* resultou em custo estimado de R\$ 9.799,03, enquanto a placa *Gypsum Fortissima RF* totalizou R\$ 11.918,38. Esses valores posicionam o sistema em faixa inferior à das tintas intumescentes, porém superior à das argamassas projetadas. Contudo, cabe destacar que os custos levantados contemplam essencialmente o material principal, não incluindo componentes e serviços normalmente associados à sua instalação, tais como perfis metálicos de suporte, elementos de fixação, tratamento de juntas, acabamentos e mão de obra especializada. Assim, sob condições reais de execução, o custo global dessa solução tende a ser superior ao valor aqui estimado.

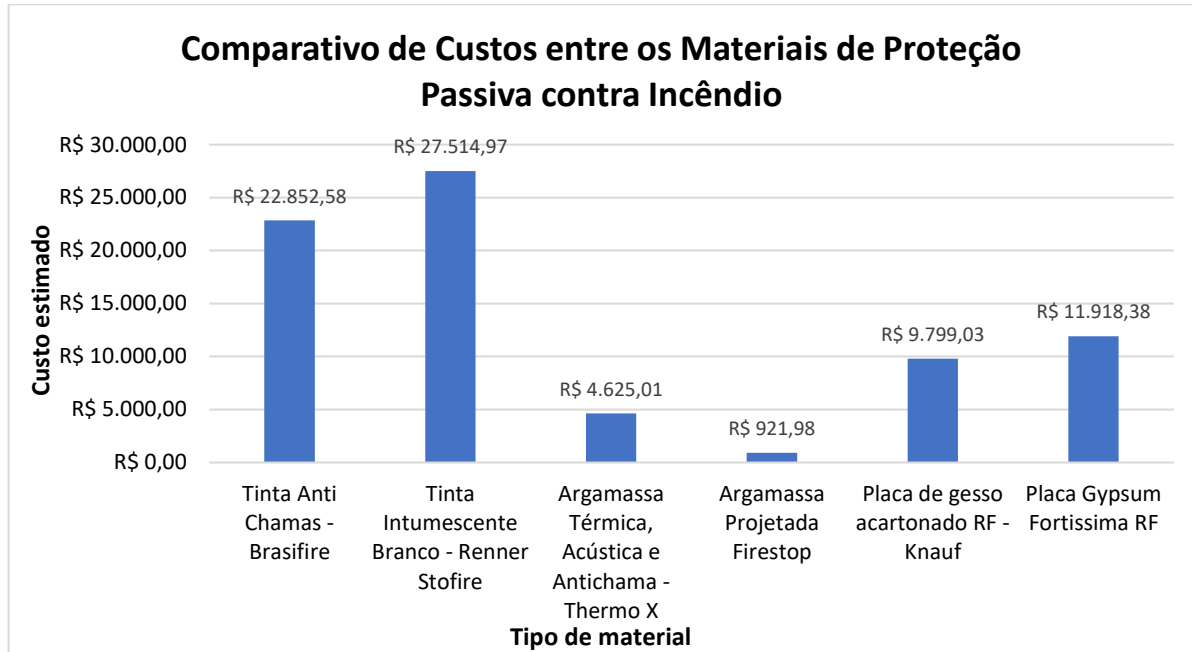
Entre os materiais avaliados, as argamassas projetadas apresentaram os menores custos estimados. A argamassa projetada *Firestop* registrou o menor valor total, de R\$ 921,98, ao passo que a argamassa *Thermo-X* apresentou custo de R\$ 4.625,01. Sob a ótica estritamente econômica, ambas se mostraram mais competitivas que as demais alternativas. No entanto, a seleção da solução mais adequada não deve se restringir ao menor custo direto do material.

No presente estudo, apesar do menor custo da *Firestop*, a indisponibilidade de informações técnicas complementares e de documentação suficiente para respaldar a avaliação de desempenho inviabilizou sua adoção como solução final. Em contrapartida, a argamassa *Thermo-X*, embora mais onerosa que a *Firestop*, apresentou respaldo documental e informações técnicas suficientes para sustentar sua aplicabilidade, configurando-se como a alternativa mais adequada dentro de um critério combinado de segurança, confiabilidade técnica e economia.

A Figura 4.1 reforça visualmente essa tendência, evidenciando a superioridade econômica das argamassas projetadas em relação às tintas intumescentes e às placas de gesso acartonado, no que se refere exclusivamente ao custo estimado dos materiais de proteção. Esse

resultado indica que, para o conjunto analisado, as argamassas projetadas constituem a solução de maior competitividade econômica, especialmente em cenários com elevada demanda de proteção de elementos estruturais.

Figura 4.1 - Representação de custos dos materiais de proteção passiva



Fonte: Autor, 2026.

A predominância da argamassa projetada como solução de menor custo entre os sistemas analisados corrobora tendências já reportadas na literatura técnica. De acordo com Pannoni (2015), os materiais projetados apresentam custos relativos classificados entre baixos e médios quando comparados aos materiais rígidos ou semirrígidos e aos revestimentos intumescentes. Nesse sentido, a convergência entre os resultados obtidos e as referências bibliográficas contribui para a validação da metodologia adotada, conferindo maior confiabilidade às análises realizadas.

Por fim, é importante ressaltar que os valores apresentados correspondem a uma estimativa comparativa de custo de material e não a um orçamento executivo completo. Não foram considerados, nesta etapa, fatores como transporte, logística, preparo de superfície, perdas de aplicação, sistemas auxiliares de fixação, equipamentos e mão de obra especializada. Tais variáveis podem alterar substancialmente o custo final da solução adotada. Desse modo, os resultados devem ser interpretados como uma base comparativa técnico-econômica entre alternativas de proteção passiva, e não como custo final de implantação.

4.2 Otimização dos sistemas de proteção térmica

A Tabela 4.4 apresenta as espessuras otimizadas obtidas para os sistemas de proteção térmica analisados, considerando os diferentes perfis metálicos do modelo estrutural. Observa-se que as maiores espessuras foram obtidas nos perfis com maior fator de massividade, enquanto os menores valores ocorreram nos perfis menos massivos. Esse comportamento é coerente com o aquecimento mais rápido dos elementos com maior relação entre perímetro exposto e área da seção transversal.

Entre os materiais avaliados, a tinta intumescente apresentou espessuras otimizadas entre 9,24 mm e 17,38 mm, as placas de gesso acartonado entre 13,52 mm e 22,75 mm e a argamassa projetada entre 2,99 mm e 6,67 mm. Para o perfil W12x26, com fator de massividade igual a 132 m^{-1} , foram obtidas as maiores espessuras nos três sistemas de proteção.

Tabela 4.4 - Espessura otimizadas dos materiais de proteção passiva

Caracterização dos elementos estruturais				Tinta Intumescente - (mm)	Argamassa Projetada - (mm)	Placa de Gesso Acartonado - (mm)
Elemento	Pavim.	Perfil	Massiv.	Titantech A80 y A85	Tecwool F de Lã de Rocha	Painéis Antifúrmicos Tecbor
Vigas	1 - 3	W12x26	132	17,38	6,67	22,75
		W12x53	93	13,65	4,76	18,88
		W12x87	96	13,98	4,91	19,24
	4 - 6	W12x26	132	17,38	6,67	22,75
		W12x53	93	13,65	4,76	18,88
		W12x87	58	9,24	2,99	13,52
Pilares	1 - 3	W12x87	58	9,24	2,99	13,52
		W12x120	85	12,74	4,36	17,84
		W12x87	58	9,24	2,99	13,52
	4 - 6	W10x60	69	10,74	3,55	15,44
		W10x60	69	10,74	3,55	15,44
		W10x60	69	10,74	3,55	15,44

Fonte: Autor, 2026.

As espessuras otimizadas dos materiais de proteção térmica apresentadas na Tabela 4.4, quando comparadas àquelas determinadas pelas cartas de cobertura mostradas na Tabela 4.1, evidenciam variações expressivas nas dimensões obtidas. A tinta intumescente e as placas de gesso acartonado apresentaram valores relativamente superiores aos determinados pelos

catálogos técnicos, enquanto a argamassa projetada apresentou espessura significativamente inferior.

Para a tinta intumescente, considerando o perfil W12x26 com fator de massividade de 132 m^{-1} , observa-se que a espessura otimizada obtida foi de 17,38 mm, valor relativamente elevado. Nesses materiais, a aplicação direta das equações de condução térmica para materiais homogêneos de espessura constante, como a Equação 2.17, pode gerar espessuras pouco representativas da prática, uma vez que a tinta intumescente se expande e forma uma camada carbonizada durante o incêndio. Desse modo, torna-se mais adequado utilizar dados experimentais ou tabelas técnicas de fabricantes para o dimensionamento desse tipo de material.

Para as placas de gesso acartonado, considerando o mesmo perfil estrutural, observa-se que a espessura indicada pelo catálogo é de 11,8 mm, enquanto o resultado obtido pelo processo de otimização foi de 22,7 mm. Dessa forma, a espessura calculada corresponde a aproximadamente o dobro da indicada pelo fabricante. Essa diferença pode ser atribuída às simplificações adotadas pelo modelo de transferência de calor da normativa brasileira, que considera propriedades térmicas constantes e uma camada homogênea de proteção. Em contrapartida, os catálogos técnicos geralmente são baseados em ensaios experimentais ou modelos calibrados, capazes de incorporar efeitos como desidratação do gesso, variação das propriedades térmicas com a temperatura, critérios específicos de exposição ao fogo e condições reais de montagem, juntas e fixações. Com isso, a formulação analítica baseada na Equação 2.17 tende a apresentar resultados mais conservadores.

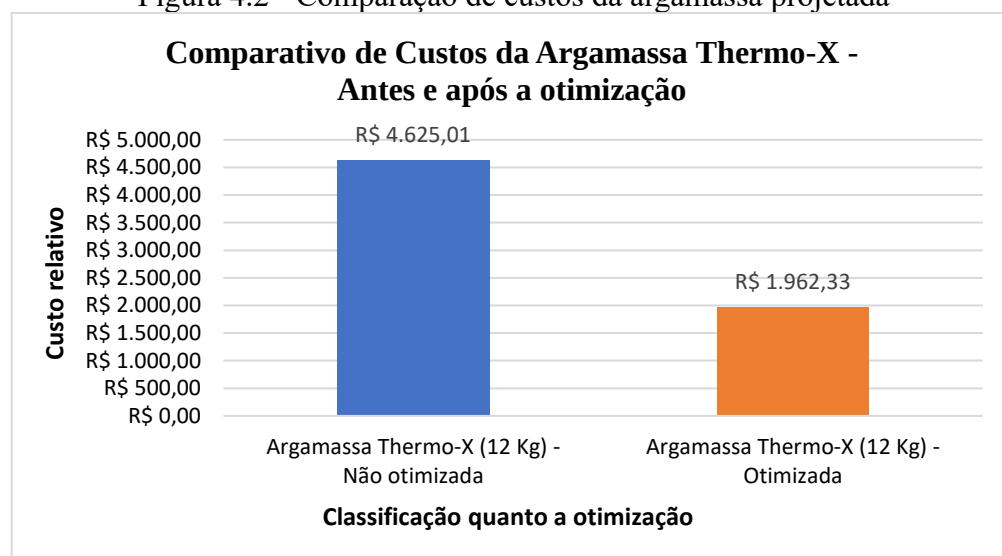
Em contrapartida aos materiais anteriormente citados, para a argamassa projetada, considerando o mesmo perfil estrutural, o valor encontrado pela otimização no Solver do *Excel* foi de 6,8 mm, enquanto o catálogo técnico indica espessura de 14 mm. Ao analisar essa significativa redução, observa-se que materiais com baixa condutividade térmica podem apresentar espessuras teóricas menores quando submetidos à formulação simplificada da Equação 2.17, principalmente por não integrar os efeitos práticos do sistema.

Ainda que o valor de $\lambda_m = 0,061 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ seja indicado no catálogo técnico, sua aplicação direta em uma formulação simplificada de transferência de calor pode resultar em espessuras inferiores às recomendadas pelo fabricante. Isso ocorre porque o modelo considera propriedades térmicas constantes e uma camada homogênea de proteção, enquanto o desempenho real da argamassa projetada envolve perda de umidade, variação das propriedades com a temperatura, condições de aplicação, aderência, retração e margens de segurança provenientes de validações experimentais e ensaios de desempenho.

Os resultados obtidos para os sistemas de tinta intumescente e placas de gesso acartonado indicaram espessuras otimizadas superiores às recomendadas pelos fabricantes, resultando em custos mais elevados que os das soluções de referência. Tal comportamento evidencia limitações da formulação analítica empregada para representar o desempenho desses sistemas, que dependem de validações experimentais não integralmente contempladas pelo modelo. Como os resultados não convergiram para o objetivo da otimização, que consiste na minimização da função custo, optou-se por não aprofundar a discussão desses casos, concentrando a análise nos resultados considerados tecnicamente mais coerentes.

Apesar de algumas limitações, principalmente em termos práticos, a argamassa projetada apresentou as menores espessuras otimizadas entre os três sistemas de proteção analisados e foi selecionada para a avaliação econômica apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Comparação de custos da argamassa projetada



Fonte: Autor, 2026.

Observa-se, a partir da Figura 4.2, que houve uma redução considerável no custo estimado da argamassa projetada Thermo-X com a aplicação do processo de otimização. Nota-se que o custo estimado do sistema de proteção passou de R\$ 4.625,01 para R\$ 1.962,33, representando uma redução aproximada de 57,6% em relação à situação não otimizada.

Esse resultado evidencia a influência direta da espessura do revestimento térmico no consumo de material e no custo final do sistema de proteção passiva. No entanto, como a espessura otimizada da argamassa projetada foi inferior ao valor recomendado em catálogo técnico, os resultados devem ser interpretados como uma estimativa comparativa e preliminar. Assim, a aplicação prática da otimização deve estar associada às recomendações normativas, aos dados dos fabricantes e, quando necessário, a validações experimentais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizada uma análise técnico-econômica comparativa de diferentes sistemas de proteção passiva aplicados a um modelo estrutural em aço de seis pavimentos em situação de incêndio. A partir da determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), do cálculo dos fatores de massividade dos elementos estruturais e da obtenção das espessuras de proteção por meio de cartas de cobertura, foram estimados os quantitativos e os custos associados aos sistemas analisados. Além disso, foi aplicado o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) com o objetivo de avaliar cenários de otimização das espessuras dos materiais de proteção térmica e seus impactos econômicos.

Os resultados demonstraram diferenças relevantes entre os sistemas de proteção avaliados. Na análise inicial de custos, as tintas intumescentes apresentaram os maiores valores estimados, as placas de gesso acartonado ocuparam uma faixa intermediária e as argamassas projetadas apresentaram os menores custos entre as soluções analisadas. Esse comportamento evidencia a importância da avaliação técnico-econômica na escolha do sistema de proteção térmica, uma vez que materiais com a mesma finalidade podem apresentar impactos financeiros significativamente distintos no projeto.

A aplicação do processo de otimização indicou que as espessuras obtidas pelo modelo analítico apresentaram diferenças expressivas em relação aos valores recomendados pelas cartas de cobertura dos fabricantes. Para a argamassa projetada Thermo-X, a otimização resultou na redução do quantitativo estimado de material de 68 para 29 sacos, com diminuição do custo de R\$ 4.625,01 para R\$ 1.962,33, correspondendo a uma redução aproximada de 57,6%. Esse resultado demonstra a influência direta da espessura do revestimento no consumo de material e no custo final do sistema de proteção passiva.

Entretanto, verificou-se que os sistemas com tinta intumescente e placas de gesso acartonado apresentaram maior discrepância em relação às espessuras indicadas nos catálogos técnicos. Essas diferenças podem estar associadas às limitações da formulação analítica adotada, que considera propriedades térmicas constantes e uma camada homogênea de proteção, não representando integralmente fenômenos como a expansão e formação de camada carbonizada nas tintas intumescentes, a desidratação do gesso, as condições de montagem, as juntas, as fixações e as margens de segurança provenientes de ensaios experimentais.

Dessa forma, conclui-se que o procedimento proposto é útil para análises comparativas e estimativas preliminares de custo de sistemas de proteção térmica passiva em estruturas metálicas. No entanto, os resultados obtidos por meio da otimização não devem ser

interpretados como substitutos diretos das recomendações normativas, dos catálogos técnicos dos fabricantes ou de validações experimentais. A metodologia pode auxiliar na tomada de decisão em fases iniciais de projeto, desde que seus resultados sejam avaliados em conjunto com critérios técnicos, executivos e normativos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar análises numéricas, por meio de softwares como o Ansys, para comparar os resultados obtidos pelo modelo analítico com simulações térmicas mais refinadas;
- Avaliar experimentalmente o desempenho dos sistemas de proteção térmica, especialmente para materiais com comportamento dependente da temperatura e das condições de aplicação;
- Ampliar a comparação técnico-econômica para outros produtos disponíveis no mercado, considerando diferentes fabricantes, espessuras comerciais e custos de aplicação;
- Investigar a influência da variação das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura nos resultados de dimensionamento e otimização;
- Aplicar a metodologia proposta a outros modelos estruturais, com diferentes geometrias, usos, TRRFs e condições de exposição ao fogo;
- Avaliar sistemas de proteção térmica aplicados a outros materiais estruturais, como concreto e madeira, considerando suas particularidades em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS

ALAGOAS. Corpo de Bombeiros Militar. **Instrução Técnica n.º 01/2021**: procedimentos administrativos. Maceió: CBMAL, 2021.

ALAGOAS. Corpo de Bombeiros Militar. **Instrução Técnica n.º 08/2021**: segurança estrutural nas edificações – resistência ao fogo dos elementos construtivos. Maceió: CBMAL, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119-88**: standard test methods for fire tests of building construction and materials. Philadelphia: ASTM, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DRYWALL. **Manual de montagem de sistemas drywall**. São Paulo: Associação Brasileira de Drywall, 2018. 84 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14323**: dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14323**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14715**: chapas de gesso para drywall. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: ensaio de resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9077**: saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÇÃO PASSIVA. **Manual de proteção passiva contra incêndio**. São Paulo: ABPP, 2018.

BARROSO, Lidiane Bittencourt; FERREIRA, Leandro Silveira; LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. Proteção passiva contra incêndios em edificações. **Revista de Ciência e Inovação do IF Farroupilha**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 71–85, 2017.

BASTOS, Eduardo Antônio. **Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BELLEI, Ildony Hélio; PINHO, Fernando Ottoboni; PINHO, Maurício Ottoboni. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2011. 558 p.

BERNARDES, Guilherme Franco. **Dimensionamento em situação de incêndio de perfis em aços estruturais convencionais e aços resistentes ao fogo**. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

BERTELLI, L. Tintas desenvolvidas para salvar vidas. **Revista Corrosão & Proteção**, [S. l.], v. 60, p. 11–13, 2016.

BEYLER, Craig; BEITEL, Jesse; IWANKIW, Nestor; LATTIMER, Brian. **Fire resistance testing for performance-based fire design of buildings: final report**. [S. l.], 2007

BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A. da. **Otimização de projetos de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2019. E-book.

BUCHANAN, Andrew H.; ABU, Anthony Kwabena. **Structural design for fire safety**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CHROMATECH. **Argamassa projetada: proteção passiva contra incêndio**. São Paulo, [2026]. Disponível em: <https://chromatech.eng.br/argamassaprojetada>. Acesso em: 29 abr. 2026.

CORREIA, Rubens Silva. **Otimização de vigas de concreto armado, utilizando a ferramenta solver**. 2016. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta e. **O método do tempo equivalente para o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 3, p. 154–167.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU, 6., 2006, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: FAUUSP, 2006. p. 1–10.

COSTA, Lucas Aragão Alves da; MELO, Carlos David Rodrigues. Otimização de treliças metálicas utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, Brasília, v. 2, n. 32, p. 1–15, 2016.

COSTA, Thales Henrique Silva. Proteção contra incêndio em elementos estruturais de aço. **Engenharia & Ação**, Fortaleza, v. 2, n. 1, e0592, 2024.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 3. ed. São Paulo: Zigurate, 2015. 136 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: ENV 1991-2-2: basis of design and actions on structures – Part 2-2: actions on structures exposed to fire**. Brussels: CEN, 1995.

FIRELOCK. **Monokote® Type 5GP: argamassa projetada para proteção passiva contra incêndio**. São Paulo, [2026]. Disponível em: <https://www.firelock.com.br/type-5gp.php>. Acesso em: 29 abr. 2026.

FRONTLINE SYSTEMS. **Analytic Solver Platform**: comprehensive solver upgrade. Incline Village: Frontline Systems, 2024. Software. Disponível em: <https://www.solver.com/analytic-solver-platform>. Acesso em: 29 abr. 2026.

GEWAIN, Richard G.; IWANKIW, Nestor R.; ALFAWAKHIRI, Farid; FRATER, George. **Fire facts for steel buildings**. Canadian Institute of Steel Construction, 2006.

GIERCZAK, J.; KMITA, A.; WRÓBLEWSKI, R.; SMARDZ, P. Steel structure catastrophe as a result of a fire in the production facilities in Lubań. In: SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE “CONSTRUCTION FAILURES”, 26., 2013, Międzyzdroje, Poland. **Proceedings [...]**. Międzyzdroje: [s. n.], 2013. p. 485–489.

GIRIRAJ; SWAROOP, Ajay. **A study of performance analysis of steel structures under fire conditions**. 2022. 9 f. Artigo científico (Civil Engineering) - Sri Satya Sai University of Technology & Medical Sciences, Sehore, India, 2022.

GOMES JÚNIOR, Aloísio de Castro; SOUZA, Marccone Jamilson Freitas. **Solver (Excel)**: manual de referência. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. 1 PDF. Disponível em: <http://www.decom.ufop.br/marcone/Disciplinas/MetodosOtimizacao/Solver.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2026.

GOMES, Fabrício Maciel; PEREIRA, Félix Monteiro; MARINS, Fernando Augusto Silva; SILVA, Messias Borges. Estudo comparativo entre métodos de otimização de problemas com múltiplas respostas. **Exacta**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 73–88, 2018.

GOODE, Michael G. **Fire protection of structural steel in high-rise building**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S. Department of Commerce Technology Administration, 2004.

GRAVIT, M.; RADAEV, A.; SHCHEGLOV, N.; KONSTANTINOVA, N.; TSEPOVA, A. Fire-Resistant Steel Structures: Optimization Mathematical Model with Minimum Predicted

Cost of Fire Protection Means. **Buildings**, [S. l.], v. 16, art. 215, 2026.

GUIMARÃES, Patrícia Pamplona de Oliveira. **Sobre o dimensionamento do revestimento contra fogo de estruturas de aço**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

INCÊNDIO AVCB. **Tinta antichamas para metal**. São Paulo, [2026]. 1 fotografia. Disponível em: https://www.incendioavcb.com.br/media/sig_BgMGliaUyi/produtos/tinta-antichamas-para-metal/tinta-antichamas-para-metal-05.jpeg. Acesso em: 29 abr. 2026.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FIRE AND RESCUE SERVICES (CTIF). Center of Fire Statistics. **World Fire Statistics: report nº 30**. [S. l.]: CTIF, 2025. Disponível em: <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>. Acesso em: 28 abr. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: fire-resistance tests: elements of building construction – Part 1: general requirements**. Geneva: ISO, 1999.

ISOVER. **Sistema Placo® de protección frente al fuego de perfiles metálicos con dos placas Placo® PPF15**. Madrid: ACAE, 2026. Disponível em: https://www.acae.es/cat/ISO/isover.html/ERAAB_ISO/ERAAB_ISO1/UISOF14/ISO-E012/sistema-placo--de-proteccion-frente-al-fuego-de-perfiles-metalicos-con-dos-placas-placo---ppf15.html. Acesso em: 29 abr. 2026.

KLEIN, H. W. **Otimização de vigas de concreto armado: dimensionamento à flexão**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2008.

KÖKSOY, Onur; YALCINOZ, Tamer. Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, [S. l.], v. 175, n. 2, p. 1657–1674, 2006.

KUBICKA, K.; PAWLAK, U.; RADÓN, U. Influence of the Thermal Insulation Type and Thickness on the Structure Mechanical Response Under Fire Conditions. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 9, art. 2606, 2019.

LASDON, Leon Scott; WARREN, Allan D.; JAIN, Arun; RATNER, Margery. **Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming**. ACM Transactions on Mathematical Software, New York, v. 4, n. 1, p. 34–50, 1978.

LASDON, Leon Scott; WARREN, Allan D.; RATNER, Margery W. **GRG2 user's guide: technical memorandum**. Austin: University of Texas at Austin, 1980.

LEITE, Matheus Batista; PEREIRA JÚNIOR, Wanderlei Malaquias. Utilização de técnicas de otimização no dimensionamento de vigas de concreto armado. **HOLOS**, [S. l.], v. 3, p. 1–18, 2019.

LI, G. Q.; HAN, J.; WANG, Y. C. Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results. **Journal of Fire Sciences**, v. 35, n. 2, p. 132–155,

2017.

LIN, Rogério. **A importância das associações de classe frente à segurança contra incêndio**. In: COSTA, Carla Neves et al. (org.). **Segurança contra incêndio em edificações: recomendações**. [S. l.]: [s. n.], 2018. p. 190–193.

LUCHERINI, A. et al. Application of cost-benefit analysis methodology for fire safety measures in structural fire engineering. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURES IN FIRE**, 13., 2024, Coimbra, Portugal. **Proceedings...** Coimbra, Portugal: [s. n.], 2024.

MAIA, J. P. **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARCELINO, Thayná C. S.; AZEVEDO, Macksuel S.; CALENZANI, Adenilcia Fernanda G. Computational tool for design of steel elements in fire situation with and without fire protection material. In: **IBERO-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING**, 43., 2022, Foz do Iguaçu. **Proceedings [...]**. Foz do Iguaçu: ABMEC, 2022. p. 1-10.

MELO, Raquel Cipriano. **Comparativo em sistemas construtivos inovadores na construção de unidades populares em Fortaleza-CE**. 2022. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2022.

MICROSOFT. **Microsoft Excel**. Versão 2312. [Redmond]: Microsoft Corporation, 2023. Software. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>. Acesso em: 29 abr. 2026.

MOREIRA, Caio Augusto Ribeiro. **Sistemas de proteção em estruturas metálicas em situação de incêndio**. 2019. 41 f. Monografia (Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MOUATASIM, Abdelkrim El; ELLAIA, Rachid; DE CURSI, Eduardo S. Stochastic perturbation of reduced gradient & GRG methods for nonconvex programming problems. **Applied Mathematics and Computation**, [S. l.], v. 226, n. 1, p. 198–211, 2014.

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

OLIVEIRA, Rodrigo Bartolomeu Romano da Silva e; MORENO JÚNIOR, Armando Lopes; VIEIRA JÚNIOR, Luiz Carlos Marcos. Tinta intumescente como revestimento de proteção ao fogo. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 115–132, jan./fev. 2017.

PALHARES, R. de A.; NICOLETTI, R. S.; ARCINE, M. de F.; SOUZA, A. S. C. de. Influence of water coatings on the thermal analysis of steel profiles in a fire situation. **Acta Scientiarum. Tecnologia**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. e60876, 2022.

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 4. ed. Belo Horizonte: Gerda Aço, 2007. 84 p. (Coletânea do Uso do Aço).

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 6. ed. São Paulo: Gerda, 2015. 94 p. (Coletânea do Uso do Aço).

PANNONI, Fábio Domingos. **Projeto e durabilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2017. 116 p. (Série Manual de Construção em Aço).

PINTO, Tiago Miguel Ferreira. **Estudo de tintas intumescentes na proteção de elementos estruturais em condições de incêndio**. 2008. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2008.

PORTAL INCÊNDIO. **Proteção passiva: pintura intumescente ou argamassa projetada?** São Paulo, 2026. Disponível em: <https://portalincendio.com.br/Publicacao.aspx?id=311559>. Acesso em: 29 abr. 2026.

RAGSDALE, Cliff T. **Modelagem de planilha e análise de decisão: uma introdução prática a business analytics**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

RICARDO, Alverlando Silva. **Análise da confiabilidade estrutural de elementos de aço em situação de incêndio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

RODRIGUES, João Paulo Correia; OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão de. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio: segundo as Normas Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

RODRIGUES, Larisa Daniele Teles. **Determinação numérica e analítica da carga crítica uniformemente distribuída de vigas de aço em situação de incêndio natural**. 2013. 219 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

RST BRANDSCHUTZTECHNIK. **Brandschutzbekleidung Knauf: Stahlträger**. [S. l.]: Suíça, 2026. Disponível em: <https://www.rst-brandschutztechnik.ch/ausfuehrung/knauf-stahltraeger/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

SACOMAN, Marcos Antonio Ribeiro. **Otimização de projetos utilizando GRG, Solver Excel**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 40., 2012, Belém. **Anais [...]**. Brasília, DF: ABENGE, 2012. p. 1–10.

SAKKAS, K.; SOFIANOS, A.; NOMIKOS, P.; PANIAS, D. Behaviour of passive fire protection k-geopolymer under successive severe fire incidents. **Materials**, [S. l.], v. 8, p. 6096–6104, 2015.

SAKKAS, K.; SOFIANOS, A.; NOMIKOS, P.; PANIAS, D. Inorganic polymeric materials for passive fire protection of underground constructions. **Fire and Materials**, [S. l.], v. 37, p. 140–150, 2013.

SANTA HELENA. **Entenda a importância da proteção passiva em incêndios**. [S. l.]: Santa Helena, 2020. Disponível em: <https://www.stahelena.com.br/blog/entenda-a-importancia-da-protecao-passiva-em-incendios>. Acesso em: 31 jul. 2024.

SANTOS, E. G.; SOUZA, H. J. **A utilização e técnicas construtivas em drywall**. 2014. 58 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases, Cataguases, 2014.

SEITO, A. I. (coord.); GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B. da; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. e. **A segurança contra incêndio no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, Valdir Pignatta e. Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process: a simple derivation. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 27, n. 14, p. 2036–2043, 2005.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2004.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

ULUSOY, S. Otimização do dimensionamento de componentes de aço protegidos em altas temperaturas. **Revista de la Construcción**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 277–292, 2023.

VAN COILE, Ruben; HOPKIN, Danny; LANGE, David; JOMAAS, Grunde; BISBY, Luke. The need for hierarchies of acceptance criteria for probabilistic risk assessments in fire engineering. **Fire Technology**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 1111–1146, jul. 2019.

VANDERPLAATS, G. **Numerical optimization techniques for engineering design**. 3. ed. Colorado Springs: McGraw-Hill, 1999.

VANDERPLAATS, G. Structural optimization for statics, dynamics and beyond. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 316–322, 2006.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta e. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005. 78 p. (Série Manual de Construção em Aço).

VASCONCELOS, R. F. **Otimização de elementos pré-moldados de concreto: lajes alveolares e vigas com cabo reto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ANEXOS

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES QUANTO À OCUPAÇÃO

Grupo	Ocupação/ uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e assemelhados	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hotéis residenciais	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Armarinhos, tabacarias, mercearias, fruteiras, butiques e outros
		C-2	Comércio de grande e médio portes	Edifícios de lojas, lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercado e outros
		C-3	Centros comerciais	Centro de compras em geral (<i>shopping centers</i>)
D	Serviços profissionais pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleireiros, laboratórios de análises clínicas sem internação, centro profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agências bancárias e assemelhados
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
E	Educacional e cultura física	E-1	Escolas em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e outros
		E-2	Escolas especiais	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira e outras
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais, ginástica (artística, dança, musculação e outros), esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e outros
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternas, jardins-de-infância
		E-6	Escolas para portadores de deficiências	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
F	Locais de reunião pública	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Museus, centros de documentos históricos e outros
		F-2	Templos e auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral
		F-3	Centros esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoferroviárias, aeroportos, estações de transbordo e outros
		F-5	Locais de produção e apresentação de artes cênicas	Teatros em geral, cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e outros

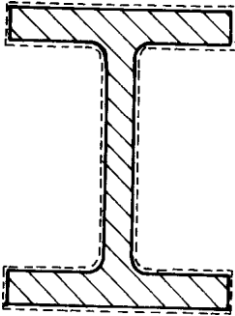
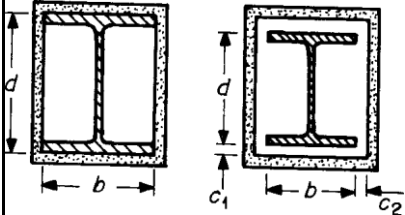
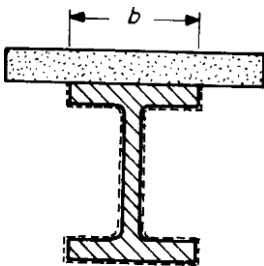
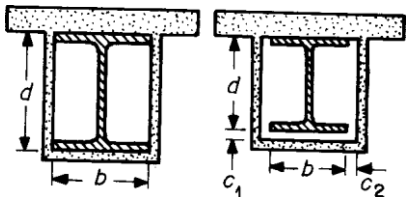
CONTINUAÇÃO - ANEXO A

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
F	Locais de reunião pública	F-6	Clubes sociais	Boates e clubes noturnos em geral, salões de baile, restaurantes dançantes, clubes sociais e assemelhados
		F-7	Construções provisórias	Circos e assemelhados
		F-8	Locais para refeições	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e outros
G	Serviços automotivos	G-1	Garagens sem acesso de público e sem abastecimento	Garagens automáticas
		G-2	Garagens com acesso de público e sem abastecimento	Garagens coletivas sem automação, em geral, sem abastecimento (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-3	Locais dotados de abastecimento de combustível	Postos de abastecimento e serviço, garagens (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-4	Serviços de conservação, manutenção e reparos	Postos de serviço sem abastecimento, oficinas de conserto de veículos (exceto de carga e coletivos), borracharia (sem recauchutagem)
		G-5	Serviços de manutenção em veículos de grande porte e retificadoras em geral	Oficinas e garagens de veículos de carga e coletivos, máquinas agrícolas e rodoviárias, retificadoras de motores
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1	Hospitais veterinários e assemelhados	Hospitais, clínicas e consultórios veterinários e assemelhados (inclui-se alojamento com ou sem adestramento)
		H-2	Locais onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais	Asilos, orfanatos, abrigos geriátricos, reformatórios sem celas e outros
		H-3	Hospitais e assemelhados	Hospitais, casa de saúde, prontos-socorros, clínicas com internação, ambulatórios e postos de atendimento de urgência, postos de saúde e puericultura e outros
		H-4	Prédios e instalações vinculadas às forças armadas, polícias civil e militar	Quartéis, centrais de polícia, delegacia distritais, postos policiais e outros
		H-5	Locais onde a liberdade das pessoas sofre restrições	Hospitais psiquiátricos, reformatórios, prisões em geral e instituições assemelhadas
I	Industrial, comercial de médio e alto risco, atacadista	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados ou depositados apresentem médio potencial de incêndio	Locais onde a carga de incêndio não atinja 1 200 MJ/m ² . Ver tabela C.1
		I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados e/ou depositados apresentem grande potencial de incêndio	Locais onde a carga de incêndio ultrapassa 1 200 MJ/m ² . Ver tabela C.1
J	Depósitos	J-1	Depósitos de baixo risco de incêndio	Depósitos sem risco de incêndio expressivo. Edificações que armazenam tijolos, pedras, areias, cimentos, metais e outros materiais incombustíveis
		J-2	Depósitos de médio e alto risco de incêndio	Depósitos com risco de incêndio maior. Edificações que armazenam alimentos, madeira, papel, tecidos e outros

ANEXO B – TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF), EM MINUTOS

Grupo	Ocupação/ uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s ≤ 10 m	Classe P ₁ h ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h ≤ 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

ANEXO C – FATOR DE MASSIVIDADE PARA ELEMENTOS COM PROTEÇÃO TÉRMICA

Situação	Descrição	Fator de massividade (u_m/A)
	Proteção tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{Perímetro da seção da peça de aço}}{\text{Área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa ¹⁾ , de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b + d)}{\text{Área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{Perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{Área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa ¹⁾ , de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d + b}{\text{Área da seção da peça de aço}}$

¹⁾ Para c_1 e c_2 superior a $d/4$, deve-se utilizar bibliografia especializada.

ANEXO D – TINTA IGNÍFUGA TECLACK-W

PINTURA IGNÍFUGA TECLACK-W®



Ficha técnica atualizada 31/03/21

TECLACK-W

Tabela de massividade

TABELA DE ESPESSURAS PINTURA TECLACK-W® PARA PERFIS ABERTOS (tipo I y H). As espessuras que figuram nesta tabela são conforme os que figuram no Informe ETA - 16/0359. Tabela válida para temperatura de desenho de 500 °C. Para outras temperaturas consultar ao departamento técnico. (* Espessuras de pintura Intumescente Teclack-W® expressados em µm)				
Massividade (m ⁻¹)	R 15 min	R 30 min	R 45 min	R 60 min
57	248	248	401	621
60	248	248	401	621
65	248	248	406	621
70	248	248	431	631
75	248	248	456	669
80	248	248	481	707
85	248	248	506	745
90	248	248	531	782
95	248	248	556	820
100	248	248	581	858
105	248	248	606	889
110	248	248	631	917
115	248	248	657	946
120	248	248	684	974
125	248	262	710	1002
130	248	276	736	1030
135	248	290	762	1058
140	248	304	789	1086
145	248	318	815	1114
150	248	331	841	1142
155	248	345	867	1171
160	248	359	890	1199
165	248	373	913	1227
170	248	387	936	1255
175	248	401	958	1283
180	248	415	981	1311
185	248	429	1004	1339
190	248	443	1026	1368
195	248	457	1049	1396
200	248	471	1071	-
205	248	485	1094	-
210	248	499	1117	-
215	248	513	1139	-
220	248	527	1162	-
225	248	541	1184	-
230	248	555	1207	-
235	248	569	1230	-
240	248	583	1252	-
245	248	597	1275	-
250	248	611	1298	-
255	248	625	1320	-
260	248	641	1343	-
265	248	657	1365	-
270	248	673	1388	-
275	248	689	-	-
280	248	705	-	-
285	248	721	-	-
290	248	737	-	-
295	248	754	-	-
300	248	770	-	-
305	248	786	-	-
310	248	802	-	-
315	248	818	-	-
320	248	834	-	-
325	248	850	-	-
330	248	866	-	-
335	248	889	-	-
340	248	916	-	-
345	248	942	-	-
350	248	969	-	-
355	248	996	-	-
360	248	1022	-	-
365	248	1049	-	-
370	248	1075	-	-
375	248	1102	-	-
380	248	1128	-	-
385	248	1155	-	-
388	248	1171	-	-

ANEXO E – TINTA TITANTECH A80 Y A85

PROTECCIÓN PASIVA CONTRA EL FUEGO

Tabla de espesores de las Pinturas Intumescentes TITANTECH A80 y A85 de acuerdo con la norma UNE ENV-13381-8

	PILARES 500°C						
≤ m-1	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	180 min
0	104	104	104	433	1192	2207	4980
5	104	104	104	433	1192	2207	4980
10	104	104	104	433	1192	2207	4980
15	104	104	104	433	1192	2207	4980
20	104	104	104	433	1192	2207	4980
25	104	104	104	433	1192	2207	4980
30	104	104	104	433	1192	2207	4980
35	104	104	104	433	1192	2207	4980
40	104	104	104	433	1192	2207	4980
45	104	104	104	433	1192	2207	4980
50	104	104	104	433	1192	2207	4980
55	104	104	104	433	1192	2207	4980
60	104	104	104	433	1192	2207	4980
65	104	104	104	433	1192	2207	4980
70	104	104	104	478	1233	2207	4980
75	104	104	161	536	1287	2399	5271
80	104	104	213	587	1334	2609	5587
85	104	104	259	631	1375	2807	5885
90	104	104	300	670	1411	2995	6168
95	104	104	335	705	1443	3173	6436
100	104	104	367	736	1472	3342	6691
105	104	104	396	763	1497	3503	Masividad alta
110	104	104	422	788	1521	3656	Masividad alta
115	104	104	446	811	1542	3802	Masividad alta
120	104	104	468	832	1561	3942	Masividad alta
125	104	124	487	851	1579	4075	Masividad alta
130	104	143	506	869	1595	4202	Masividad alta
135	104	160	523	885	1610	4324	Masividad alta
140	104	176	538	900	1624	4441	Masividad alta
145	104	191	553	914	1637	4553	Masividad alta
150	104	205	566	927	1649	4661	Masividad alta
155	104	218	578	939	1660	4764	Masividad alta
160	104	230	590	950	1670	4863	Masividad alta
165	104	242	601	961	1680	4959	Masividad alta
170	104	252	612	971	1689	5051	Masividad alta
175	104	262	621	980	1698	5140	Masividad alta
180	104	272	630	989	1706	5225	Masividad alta
185	104	281	639	997	1714	5308	Masividad alta
190	104	289	647	1005	1721	5387	Masividad alta
195	104	297	655	1013	1728	5464	Masividad alta
200	104	305	662	1020	1735	5538	Masividad alta
205	104	312	669	1026	1741	5610	Masividad alta
210	104	319	676	1033	1747	5680	Masividad alta
215	104	326	682	1039	1752	5747	Masividad alta
220	104	332	688	1045	1758	5812	Masividad alta
225	104	338	694	1050	1763	5876	Masividad alta
230	104	343	700	1056	1768	5937	Masividad alta
235	104	349	705	1061	1772	5997	Masividad alta
240	104	354	710	1066	1777	6054	Masividad alta
245	104	359	715	1070	1781	6110	Masividad alta
250	104	364	719	1075	1785	6165	Masividad alta
255	104	369	724	1079	1789	6218	Masividad alta
260	104	373	728	1083	1793	6269	Masividad alta
265	104	377	732	1087	1797	6319	Masividad alta
270	104	381	736	1091	1800	6368	Masividad alta
275	104	385	740	1094	1804	6415	Masividad alta
280	104	389	743	1098	1807	6461	Masividad alta
285	104	393	747	1101	1810	6506	Masividad alta
290	104	396	750	1105	1813	6550	Masividad alta
295	104	400	754	1108	1816	6593	Masividad alta
300	104	403	757	1111	1819	6634	Masividad alta
305	104	406	760	1114	1822	6675	Masividad alta
310	104	409	763	1117	1824	6714	Masividad alta
315	104	412	766	1119	1827	6753	Masividad alta
320	104	415	769	1122	1829	6791	Masividad alta
325	104	418	771	1125	1832	6827	Masividad alta
330	104	420	774	1127	1834	Masividad alta	Masividad alta
335	104	423	776	1130	1836	Masividad alta	Masividad alta
340	104	426	779	1132	1839	Masividad alta	Masividad alta
345	104	428	781	1134	1841	Masividad alta	Masividad alta
350	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta

Tabla válida para temperatura crítica del acero de 500°C. Para otras temperaturas críticas, por favor, consulte con nuestro departamento técnico. Esesores sólo de pintura intumescente y están expresados en milímetros. Válidos para perfiles abiertos tipo "I", H, U, L, T, etc... Para vigas a 4 caras seleccionar espesores de la tabla "PILARES".

PROTECCIÓN PASIVA CONTRA EL FUEGO

Tabla de espesores de las Pinturas Intumescentes TITANTECH A80 y A85 de acuerdo con la norma UNE ENV-13381-8

≤ m-1	PILARES 500°C						
	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	180 min
0	104	104	104	433	1192	2207	4980
5	104	104	104	433	1192	2207	4980
10	104	104	104	433	1192	2207	4980
15	104	104	104	433	1192	2207	4980
20	104	104	104	433	1192	2207	4980
25	104	104	104	433	1192	2207	4980
30	104	104	104	433	1192	2207	4980
35	104	104	104	433	1192	2207	4980
40	104	104	104	433	1192	2207	4980
45	104	104	104	433	1192	2207	4980
50	104	104	104	433	1192	2207	4980
55	104	104	104	433	1192	2207	4980
60	104	104	104	433	1192	2207	4980
65	104	104	104	433	1192	2207	4980
70	104	104	104	478	1233	2207	4980
75	104	104	161	536	1287	2399	5271
80	104	104	213	587	1334	2609	5587
85	104	104	259	631	1375	2807	5885
90	104	104	300	670	1411	2995	6168
95	104	104	335	705	1443	3173	6436
100	104	104	367	736	1472	3342	6691
105	104	104	396	763	1497	3503	Masividad alta
110	104	104	422	788	1521	3656	Masividad alta
115	104	104	446	811	1542	3802	Masividad alta
120	104	104	468	832	1561	3942	Masividad alta
125	104	124	487	851	1579	4075	Masividad alta
130	104	143	506	869	1595	4202	Masividad alta
135	104	160	523	885	1610	4324	Masividad alta
140	104	176	538	900	1624	4441	Masividad alta
145	104	191	553	914	1637	4553	Masividad alta
150	104	205	566	927	1649	4661	Masividad alta
155	104	218	578	939	1660	4764	Masividad alta
160	104	230	590	950	1670	4863	Masividad alta
165	104	242	601	961	1680	4959	Masividad alta
170	104	252	612	971	1689	5051	Masividad alta
175	104	262	621	980	1698	5140	Masividad alta
180	104	272	630	989	1706	5225	Masividad alta
185	104	281	639	997	1714	5308	Masividad alta
190	104	289	647	1005	1721	5387	Masividad alta
195	104	297	655	1013	1728	5464	Masividad alta
200	104	305	662	1020	1735	5538	Masividad alta
205	104	312	669	1026	1741	5610	Masividad alta
210	104	319	676	1033	1747	5680	Masividad alta
215	104	326	682	1039	1752	5747	Masividad alta
220	104	332	688	1045	1758	5812	Masividad alta
225	104	338	694	1050	1763	5876	Masividad alta
230	104	343	700	1056	1768	5937	Masividad alta
235	104	349	705	1061	1772	5997	Masividad alta
240	104	354	710	1066	1777	6054	Masividad alta
245	104	359	715	1070	1781	6110	Masividad alta
250	104	364	719	1075	1785	6165	Masividad alta
255	104	369	724	1079	1789	6218	Masividad alta
260	104	373	728	1083	1793	6269	Masividad alta
265	104	377	732	1087	1797	6319	Masividad alta
270	104	381	736	1091	1800	6368	Masividad alta
275	104	385	740	1094	1804	6415	Masividad alta
280	104	389	743	1098	1807	6461	Masividad alta
285	104	393	747	1101	1810	6506	Masividad alta
290	104	396	750	1105	1813	6550	Masividad alta
295	104	400	754	1108	1816	6593	Masividad alta
300	104	403	757	1111	1819	6634	Masividad alta
305	104	406	760	1114	1822	6675	Masividad alta
310	104	409	763	1117	1824	6714	Masividad alta
315	104	412	766	1119	1827	6753	Masividad alta
320	104	415	769	1122	1829	6791	Masividad alta
325	104	418	771	1125	1832	6827	Masividad alta
330	104	420	774	1127	1834	Masividad alta	Masividad alta
335	104	423	776	1130	1836	Masividad alta	Masividad alta
340	104	426	779	1132	1839	Masividad alta	Masividad alta
345	104	428	781	1134	1841	Masividad alta	Masividad alta
350	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta	Masividad alta

Tabla válida para temperatura crítica del acero de 500°C. Para otras temperaturas críticas, por favor, consulte con nuestro departamento técnico. Espesores sólo de pintura intumescente y están expresados en micras. Válidos para perfiles abiertos tipo "I", "H", "L", "T", etc... Para vigas a 4 caras seleccionar espesores de la tabla "PILARES".

ANEXO F – ARGAMASSA TECWOOL F

TECWOOL® F

Proteção de elementos de aço

TABELAS PARA A DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA ARGAMASSA EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO REQUERIDA E AO FATOR DA SECÇÃO DO PERFIL.

Os dados dessa tabela são os que figuram no informe de caracterização do expediente 079105-001

Tabela válida para 500 C° de temperatura de desenho em um aço segundo UNE ENV 13381-4.

Pilares e Vigas secção aberta

comparativa resultados ensaio
sob a norma EN 13381-4 e
classificação segundo a norma
EN 13501-2.

Masividade (m-1)	R30 min	R45 min	R60 min	R90 min	R120 min	R180 min	R240 min
67	10	10	10	13	19	33	46
70	10	10	10	13	20	34	47
80	10	10	10	15	22	36	50
90	10	10	10	17	24	38	53
100	10	10	11	18	26	40	55
110	10	10	12	19	27	42	57
120	10	10	13	20	28	43	58
130	10	10	13	21	29	44	60
140	10	10	14	22	30	45	61
150	10	11	15	23	30	46	62
160	10	11	15	23	31	47	63
170	10	12	16	24	32	48	64
180	10	12	16	24	32	48	64
190	10	12	16	25	33	49	65
200	10	13	17	25	33	49	66
210	10	13	17	25	34	50	66
220	10	13	17	26	34	50	67
230	10	14	18	26	34	51	67
240	10	14	18	26	35	51	68
250	10	14	18	27	35	52	68
260	10	14	18	27	35	52	69
270	10	14	19	27	35	52	69
280	10	15	19	27	36	53	-
290	10	15	19	27	36	53	-
300	11	15	19	28	36	53	-
310	11	15	19	28	36	53	-
320	11	15	19	28	36	54	-
330	11	15	20	28	37	54	-
340	11	15	20	28	37	54	-
350	11	15	20	28	37	54	-
360	11	16	20	29	37	54	-
370	11	16	20	29	37	55	-
380	11	16	20	29	37	55	-
390	12	16	20	29	38	55	-
400	12	16	20	29	38	55	-
410	12	16	20	29	38	55	-
420	12	16	20	29	38	55	-
430	12	16	21	29	38	55	-
440	12	16	21	29	38	56	-
495	12	17	21	30	39	56	-

ANEXO G - ARGAMASSA TRIA PROMASPRAY F250

Proteção ao fogo de estruturas metálicas							
MASSIVIDADE	ESPESSURA (mm)						
m ³	R 15	R 30	R 60	R 90	R 120	R 180	R 240
65	17	17	17	17	24	40	56
70	17	17	17	17	26	43	59
75	17	17	17	18	27	45	62
80	17	17	17	20	29	47	65
85	17	17	17	21	30	49	68
90	17	17	17	22	31	51	71
95	17	17	17	23	33	53	73
100	17	17	17	23	34	55	76
110	17	17	17	25	36	58	81
120	17	17	17	27	38	62	
130	17	17	17	28	40	65	
140	17	17	17	30	42	67	
150	17	17	18	31	44	70	
160	17	17	19	32	45	72	
170	17	17	19	33	47	75	
180	17	17	20	34	48	77	
190	17	17	21	35	50	79	
200	17	17	21	36	51	80	
210	17	17	22	37	52	82	
220	17	17	22	38	53		
230	17	17	23	39	54		
240	17	17	23	39	55		
250	17	17	23	40	56		
260	17	17	23	41	57		
270	17	17	25	41	58		
280	17	17	25	42	59		
290	17	17	25	42	59		
300	17	17	26	43	60		
310	17	17	26	43	61		
320	17	17	26	44	61		
330	17	17	27	44	62		
340	17	17	27	45	63		

(Ensaio: LICOF - 048TT05)

ANEXO H – PAINÉIS TECBOR


PAINÉIS TECBOR®

Os dados deste quadro são os constantes do relatório de avaliação do dossier **058417-002.m2**
Testado de acordo com a norma UNE- EN 13381-4:2014 e classificado de acordo com a norma EN 13501-2:2016

TESTE DE PROTEÇÃO DE NOVA ESTRUTURA METÁLICA ESPESSURA DO PAINEL DE TECBOR® (mm)									
Masividade	Período de resistência ao fogo 60 minutos								
Conceção temperatura de projeto (°C)	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Fator de secção m ¹	Espessura em (mm) do material de proteção para manter a temperatura do aço abaixo da temperatura de projeto abaixo da temperatura de projeto								
41	10,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
70	15,2	13,1	11,4	9,9	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
80	16,2	14,2	12,5	11,1	9,8	9,5	9,5	9,5	9,5
90	17,0	15,0	13,4	12,0	10,8	9,8	9,5	9,5	9,5
100	17,7	15,8	14,2	12,8	11,7	10,7	9,8	9,5	9,5
110	18,2	16,4	14,8	13,5	12,4	11,4	10,5	9,8	9,5
120	18,7	16,9	15,3	14,0	12,9	12,0	11,2	10,4	9,8
130	19,1	17,3	15,8	14,5	13,5	12,5	11,7	11,0	10,4
140	19,5	17,7	16,2	15,0	13,9	13,0	12,2	11,5	10,8
150	19,8	18,0	16,6	15,3	14,3	13,4	12,6	11,9	11,3
160	20,1	18,3	16,9	15,7	14,6	13,7	12,9	12,3	11,7
170	20,4	18,6	17,2	16,0	14,9	14,0	13,3	12,6	12,0
180	20,6	18,8	17,4	16,2	15,2	14,3	13,6	12,9	12,3
190	20,8	19,1	17,6	16,5	15,4	14,6	13,8	13,2	12,6
200	21,0	19,3	17,9	16,7	15,7	14,8	14,1	13,4	12,8
210	21,1	19,4	18,0	16,9	15,9	15,0	14,3	13,6	13,0
220	21,3	19,6	18,2	17,1	16,1	15,2	14,5	13,8	13,2
230	21,4	19,8	18,4	17,2	16,2	15,4	14,6	14,0	13,4
240	21,6	19,9	18,5	17,4	16,4	15,5	14,8	14,2	13,6
250	21,7	20,0	18,7	17,5	16,5	15,7	15,0	14,3	13,8
260	21,8	20,1	18,8	17,6	16,7	15,8	15,1	14,5	13,9
270	21,9	20,3	18,9	17,8	16,8	16,0	15,2	14,6	14,1
280	22,0	20,3	19,0	17,9	16,9	16,1	15,4	14,7	14,2
290	22,1	20,4	19,1	18,0	17,0	16,2	15,5	14,9	14,3
300	22,2	20,5	19,2	18,1	17,1	16,3	15,6	15,0	14,4
310	22,3	20,6	19,3	18,2	17,2	16,4	15,7	15,1	14,5
320	22,3	20,7	19,4	18,3	17,3	16,5	15,8	15,2	14,6
330	22,4	20,8	19,5	18,3	17,4	16,6	15,9	15,3	14,7
340	22,5	20,9	19,5	18,4	17,5	16,7	16,0	15,3	14,8
350	22,5	20,9	19,6	18,5	17,6	16,7	16,0	15,4	14,9
360	22,6	21,0	19,7	18,6	17,6	16,8	16,1	15,5	15,0
370	22,7	21,1	19,7	18,6	17,7	16,9	16,2	15,6	15,0
373	22,7	21,1	19,8	18,6	17,7	16,9	16,2	15,6	15,1

Data de revisão: 15/02/2024
 Nº de Versão: 0
 Data de impressão: 15/02/2024

Tableas Massividades

ANEXO I – PAINÉIS ANTIFÚRMICOS TECBOR

Estructura metálica

MASIVIDAD CAJEADA TECBOR®

Los datos de esta tabla son los que figuran en el informe de evaluación del expediente **058417-002**.
Tabla válida para 500 °C de temperatura de diseño en el acero según **UNE ENV 13381-4**.

NUEVO ENSAYO PROTECCIÓN ESTRUCTURA METÁLICA PARA UNA TEMPERATURA CRÍTICA DE 500 °C. ESPEORES PANEL TECBOR (mm)

Masividad	ESPEOR (mm)								
m ⁻¹	R-15 15 min	R-20 20 min	R-30 30 min	R-45 45 min	R-60 60 min	R-90 90 min	R-120 120 min	R-180 180 min	R-240 240 min
58	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	13,3	23,7	34,0
70	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,8	16,2	27,0	37,8
80	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	12,4	18,0	29,1	40,2
90	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	13,7	19,4	30,8	42,2
100	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	14,8	20,6	32,3	43,9
110	9,5	9,5	9,5	9,5	9,9	15,8	21,7	33,5	45,3
120	9,5	9,5	9,5	9,5	10,6	16,6	22,6	34,5	46,5
130	9,5	9,5	9,5	9,5	11,3	17,3	23,3	35,4	47,5
140	9,5	9,5	9,5	9,5	11,8	17,9	24,0	36,2	48,4
150	9,5	9,5	9,5	9,5	12,3	18,5	24,6	36,9	49,2
160	9,5	9,5	9,5	9,6	12,7	18,9	25,1	37,5	49,9
170	9,5	9,5	9,5	10,0	13,1	19,4	25,6	38,1	50,6
180	9,5	9,5	9,5	10,3	13,5	19,8	26,0	38,6	51,2
190	9,5	9,5	9,5	10,6	13,8	20,1	26,4	39,1	51,7
200	9,5	9,5	9,5	10,9	14,1	20,4	26,8	39,5	52,5
210	9,5	9,5	9,5	11,2	14,4	20,7	27,1	39,8	52,6
220	9,5	9,5	9,5	11,4	14,6	21,0	27,4	40,2	53,0
230	9,5	9,5	9,5	11,6	14,8	21,2	27,7	40,5	53,4
240	9,5	9,5	9,5	11,8	15,0	21,5	27,9	40,8	53,7
250	9,5	9,5	9,5	12,0	15,2	21,7	28,1	41,1	54,0
260	9,5	9,5	9,5	12,1	15,4	21,9	28,4	41,3	54,3
270	9,5	9,5	9,5	12,3	15,6	22,1	28,6	41,6	54,6
280	9,5	9,5	9,5	12,4	15,7	22,2	28,7	41,8	54,8
290	9,5	9,5	9,5	12,6	15,9	22,4	28,9	42,0	55,1
300	9,5	9,5	9,5	12,7	16,0	22,5	29,1	42,2	55,3
310	9,5	9,5	9,6	12,8	16,1	22,7	29,2	42,4	55,5
320	9,5	9,5	9,7	12,9	16,2	22,8	29,4	42,5	55,7
330	9,5	9,5	9,8	13,1	16,3	22,9	29,5	42,7	55,9
340	9,5	9,5	9,9	13,2	16,5	23,0	29,6	42,8	56,0
350	9,5	9,5	9,9	13,2	16,6	23,2	29,8	43,0	56,2
360	9,5	9,5	10,0	13,3	16,6	23,3	29,9	43,1	56,4
370	9,5	9,5	10,1	13,4	16,7	23,4	30,0	43,3	56,5
380	9,5	9,5	10,2	13,5	16,8	23,5	30,1	43,4	56,6
390	9,5	9,5	10,3	13,6	16,9	23,6	30,2	43,5	56,8
400	9,5	9,5	10,3	13,7	17,0	23,6	30,3	43,6	56,9
410	9,5	9,5	10,4	13,7	17,1	23,7	30,4	43,7	57,0
420	9,5	9,5	10,5	13,8	17,1	23,8	30,5	43,8	57,1
430	9,5	9,5	10,5	13,9	17,2	23,9	30,6	43,9	57,3
440	9,5	9,5	10,6	13,9	17,3	23,9	30,6	44,0	57,4
498	9,5	9,5	10,9	14,2	17,6	24,3	31,0	44,5	57,9

