

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MILTON MATEUS GUIMARÃES DOS SANTOS

**FIRESTEEL: UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE
ELEMENTOS RETILÍNEOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

MACEIÓ

2023

MILTON MATEUS GUIMARÃES DOS SANTOS

**FIRESTEEL: UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE
ELEMENTOS RETILÍNEOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Barbosa dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Júnior

MACEIÓ

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

S237f Santos, Milton Mateus Guimarães dos.
Firesteel : uma ferramenta computacional para verificação de elementos retilíneos de aço em situação de incêndio / Milton Mateus Guimarães dos Santos. – 2023.
59 f. : il. color.

Orientador: Luciano Barbosa dos Santos.
Coorientador: Eduardo Toledo de Lima Júnior.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 52-54.
Anexos: f. 55-59.

1. Estruturas de aço. 2. Situação de incêndio. 3. Análise térmica. I.
Título.

CDU: 624.012.45 : 614.84

Folha de Aprovação

AUTOR: MILTON MATEUS GUIMARÃES DOS SANTOS

FIRESTEEL: UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ESTUDO DE ELEMENTOS RETILÍNEOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL) como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em 23 de novembro de 2023.

Prof. Dr. Luciano Barbosa dos Santos (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Júnior (Coorientadora)
Universidade Federal de Alagoas

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adeildo Soares Ramos Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. João Carlos Cordeiro Barbirato (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos concedidas em minha vida.

À minha família pelo apoio durante todos os momentos da minha vida, em especial à minha mãe, Maria José, minha irmã, Maria Andressa, meu padrasto, Claudemir Santana e a Brunna Rodrigues.

Ao orientador deste trabalho, Luciano Barbosa, pela disponibilidade, compreensão e atenção na orientação deste trabalho. Agradeço também pelas aulas da disciplina Estruturas de Madeira, Estruturas de Aço e Estruturas de Aço em Situação de incêndio, que ressaltaram fortemente o meu interesse pela área de Estruturas e me trouxe a esta área das Estruturas.

Ao coorientador deste trabalho, Eduardo Toledo, pela disponibilidade, compreensão e atenção na orientação deste trabalho. Agradeço também pelas aulas da disciplina Análise Probabilística de Estruturas e por ser mais uma inspiração para seguir a área das Estruturas.

Ao meu orientador de pesquisa científica, Eduardo Nobre, pela oportunidade de trabalhar junto a ele e me guiar na área de Engenharia Naval, a qual se demonstrou uma área de muito interesse e bastante vislumbrante das Estruturas. Agradeço também pelas aulas da disciplina Mecânica dos Sólidos 2, nas quais sempre desempenhou um trabalho de um grande mentor.

Ao Professor João Carlos Barbirato, o qual também me orientou em trabalhos científicos e que, durante a pandemia, me trouxe de volta a alegria de estudar. Agradeço também pelas aulas da disciplina Teoria das Estruturas 2 e Análise Matricial de Estruturas.

Ao Professor Adeildo Ramos Júnior, com o qual fui monitor de suas disciplinas por quase dois anos, e apresentou a mim novas áreas de estudo da Engenharia Estrutural bastante interessantes.

Ao Professor Francisco Vieira Barros, famoso “Chico Potiguar”, pelas aulas maravilhosas de Cálculo I que me fez vislumbrar a Matemática e a sua aplicação na Engenharia. Agradeço também por seu apoio durante minha trajetória acadêmica, por sua grande amizade e por ser, para mim, uma figura paterna.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e pelas contribuições e apontamentos que enriqueceram este trabalho.

Aos professores que tive durante toda a graduação, em especial aos do Centro de Tecnologia (CTEC) e do Instituto de Matemática (IM), em especial àqueles aos quais fui monitor de suas respectivas disciplinas.

Aos amigos e companheiros de graduação, em especial: Mateus Marques e David Cabral, que me acompanharam desde o início do curso e foram grandes companheiros de café entre as aulas do CTEC.

Aos companheiros e toda a equipe do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), em especial aos pesquisadores Gleide Karolayne e Matheus Amâncio.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e à Fundação Universitária de Desenvolvimento de Extensão e Pesquisa (FUNDEPES).

**“Se eu vi mais longe, foi por
estar sobre o ombro de gigantes”**

- Isaac Newton

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional com interface gráfica para a verificação de elementos de barra retilíneos de aço em situação de incêndio. O incêndio, definido como a ocorrência de fogo descontrolado, gera elevação da temperatura em peças estruturais, resultando na degradação dos materiais e na redução da capacidade resistente. Como consequência, o fenômeno do incêndio pode comprometer a integridade e as propriedades dos elementos estruturais. Nesse contexto, considerar os efeitos do aumento da temperatura nos elementos estruturais é um tópico importante no projeto de estruturas, a fim de garantir a integridade do patrimônio e a segurança de seus usuários até que as forças de combate a incêndio e salvamento atuem contra o incêndio. Assim, para alcançar o objetivo proposto, a metodologia para desenvolvimento apoiou-se em cinco macro etapas: i) estudo dos modelos e formulações referentes a verificação de elementos de barra retilíneas de aço e à consideração dos efeitos térmicos devido aos incêndios; ii) implementação em *scripts* das formulações adotadas nas normas brasileiras para análise da evolução térmica e verificação de elementos estruturais de aço em situação de incêndio; iii) modelagem da interface gráfica da aplicação desenvolvida na linguagem *Python*; iv) integração entre a interface gráfica e as formulações implementadas em *scripts* e v) Análise de resultados baseados em exemplos da literatura. A ferramenta pode ser aplicada na verificação de elementos estruturais de aço sob solicitações mecânicas isoladas ou combinadas, estando o elemento envolto, ou não, por revestimento de proteção contra fogo.

Palavras-chave: Incêndio, Estruturas de aço, Análise térmica, Método Analítico Simplificado.

ABSTRACT

This work aims to introduce a computational tool with a graphical interface for the verification of straight steel bar elements in a fire scenario. Fire, defined as the occurrence of uncontrolled fire, generates a rise in temperature in structural components, resulting in material degradation and a reduction in load-bearing capacity. Consequently, the fire phenomenon can compromise the integrity and properties of the structural elements. In this context, considering the effects of temperature increase on structural elements is a crucial topic in structural design to ensure asset integrity and user safety until firefighting and rescue forces act against the fire. Thus, to achieve the proposed objective, the development methodology was based on five major stages: i) study of models and formulations related to the verification of straight steel bar elements and the consideration of thermal effects due to fires; ii) implementation in scripts of the formulations adopted in Brazilian standards for thermal evolution analysis and verification of structural steel elements in fire scenarios; iii) modeling of the graphical interface of the application developed in the Python language; iv) integration between the graphical interface and the formulations implemented in scripts; and v) analysis of results based on examples from the literature. The tool can be applied to verify structural steel elements under isolated or combined mechanical loads, whether the element is surrounded or not by fire protection coating.

Keywords: Fire, Steel Structures, Thermal Analysis, Simplified Analytic Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da antiga biblioteca de Alexandria.	11
Figura 2: Gravura do incêndio que destruiu a biblioteca e parte da cidade de Alexandria.....	11
Figura 3: Prédio Wilton Paes de Almeida em chamas (a) e após colapso estrutural (b).	12
Figura 4: Metodologia proposta.....	15
Figura 5: Curva de incêndio real.	17
Figura 6: Curva real de incêndio e curva de incêndio padrão.	18
Figura 7: Curvas temperatura x tempo dos modelos de incêndio-padrão apresentados.	20
Figura 8: Fluxograma do processo iterativo-incremental no tempo.....	21
Figura 9: Fator de Massividade para seções sem material de proteção contra fogo.....	23
Figura 10: Fator de Massividade para seções com material de proteção contra fogo.	24
Figura 11: Curvas dos fatores de redução kE, θ, ky, θ e $k\sigma, \theta$ em função da temperatura.	26
Figura 12: Calor específico do aço em função da temperatura.	27
Figura 13: Valores de (b/t) limite 30	30
Figura 14: Exemplo de Flambagem Lateral com Torção (FLT).	33
Figura 15: Exemplo de Flambagem Local da Mesa (FLM).	33
Figura 16: Exemplo de Flambagem Local da Alma (FLA).	34
Figura 17: Exemplos de valores de κ para situações de pilares ou vigas.....	37
Figura 18: Exemplo de aplicação de enrijecedores em elementos de aço.	38
Figura 19: Tela principal do <i>software</i> Qt Designer 5.	41
Figura 20: Fluxograma da arquitetura da aplicação.....	42
Figura 21: Aba "Modelos e Dados" da aplicação <i>FireSteel</i>	43
Figura 22: Aba "Verificação" da aplicação <i>FireSteel</i>	44
Figura 23: Exemplo de elemento de aço submetido à tração.	46
Figura 24: Simulação da Evolução da temperatura do perfil de aço W 310x38,7.	46
Figura 25: Elemento de aço submetido à compressão (pilar).....	47
Figura 26: Gráfico Esforço resistente de Compressão x Temperatura do Pilar W 310x38,7... 48	48
Figura 27: Exemplo de elemento de aço submetido à flexão (viga).....	48
Figura 28: Gráfico Temperatura x Tempo da viga VS 250x21.	49
Figura 29: Gráfico Momento Fletor no eixo -X x Tempo da viga VS 250x21.	50
Figura 30: Exemplo de elemento de aço submetido ao cisalhamento (viga).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Isenções de verificação ao incêndio, conforme ABNT NBR 14432:2000.	19
Tabela 2: Fatores de redução para o aço.	26
Tabela 3: Propriedades do revestimento para o caso 01.	45
Tabela 4: Resultados da evolução térmica com e sem proteção térmica de gesso acartonado.	45
Tabela 5: Esforços resistentes à tração para o caso apresentado por Vieira <i>et al.</i> (2016).	46
Tabela 6: Dados para a verificação do esforço resistente à compressão para o Pilar em seção transversal W310x38,7 à temperatura de 500°C.	47
Tabela 7: Dados para o caso Nascimento e Ferreira.	49
Tabela 8: Resultados das verificações a flexão para o caso Nascimento e Ferreira (2022).	50
Tabela 9: Resultados das verificações a flexão para o caso Martins (2000).	51
Tabela 10: Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minutos.	56
Tabela 11: Classificação das edificações quanto à sua ocupação (parte 01).	57
Tabela 12: Classificação das edificações quanto à sua ocupação (parte 02).	58
Tabela 13: Valores de $\gamma_{s, 2}$ em função do risco de ativação do incêndio (r).	59
Tabela 14: Fatores de ponderação das medidas de segurança contra incêndio.	60

SUMÁRIO

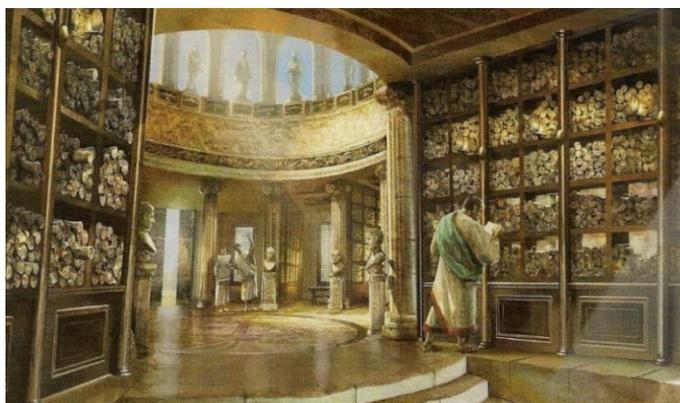
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Histórico e evolução na área de estruturas sob ação do incêndio	13
1.2. Justificativa do trabalho.....	14
1.3. Objetivo	14
1.4. Metodologia de Pesquisa	15
1.5. Delimitação do Trabalho	16
2. O INCÊNDIO E SUA AÇÃO NAS ESTRUTURAS DE AÇO	17
2.1. O incêndio.....	17
2.1.1. Exigências para Verificação de Estruturas à Situação de Incêndio	18
2.1.2. Determinação do TRRF.....	19
2.2. Modelos de incêndio-padrão.....	19
2.2.1. Processo iterativo-incremental no tempo de elevação da temperatura	21
2.2.2. Formulação de elevação da temperatura do aço sem proteção contra fogo	21
2.2.3. Formulação de elevação da temperatura do aço com proteção contra fogo	23
2.3. Propriedades físicas no Aço sob Altas Temperaturas	25
2.3.1. Limites de escoamento e Módulo de Elasticidade	25
2.3.2. Massa Específica e Coeficiente de Poisson	26
2.3.3. Calor específico.....	27
3. ESFORÇOS RESISTENTES.....	28
3.1. Resistência à Tração	28
3.1.1. Resistência à Tração devido ao escoamento em Temperatura Ambiente.....	28
3.1.2. Resistência à Tração em Situação de Incêndio	28
3.2. Resistência à Compressão.....	29
3.2.1. Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente	29
3.2.2. Resistência à Compressão em Situação de Incêndio	31

3.3.	Resistência à Flexão	32
3.3.1.	Resistência à Flexão em Temperatura Ambiente	32
3.3.2.	Resistência à Flexão em Situação de Incêndio	36
3.4.	Resistência ao Cisalhamento	37
3.4.1.	Resistência ao Cisalhamento em Temperatura Ambiente	37
3.4.2.	Resistência ao Cisalhamento em Situação de Incêndio	38
3.5.	Resistência à Solicitações Axiais Combinadas em temperatura ambiente e situação de incêndio	39
4.	INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO (GUI) PARA <i>FIRESTEEL</i>	41
4.1.	Arquitetura da aplicação <i>FireSteel</i>	41
4.2.	Aspectos gráficos da GUI	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1.	Caso 01: Pastorello (2020)	45
5.2.	Caso 02: Vieira <i>et al.</i> (2016)	45
5.3.	Caso 03: Rodrigues e Oliveira (2015)	46
5.4.	Caso 04: Nascimento e Ferreira (2022)	48
5.5.	Caso 05: Martins (2000)	50
6.	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A	56
	ANEXO B	59

1. INTRODUÇÃO

Registros históricos demonstram que os incêndios estão presentes na sociedade desde a antiguidade, os quais ameaçam a integridade dos patrimônios, a segurança das construções e dos seres vivos presentes na região de ocorrência. Os registros mais antigos de incêndios presentes na literatura são os incêndios da biblioteca de Alexandria, de Roma e de Londres, ocorridos respectivamente em 48 a.C., 64 d.C. e 1666 d.C., dentre os quais destaca-se o caso da Biblioteca de Alexandria (Figura 1).

Figura 1: **Representação da antiga biblioteca de Alexandria.**



Fonte: Biblioteca Benedicto Monteiro, 2020.

A Biblioteca de Alexandria foi uma das bibliotecas mais importantes do mundo, e, do mesmo modo, sua perda também. O incêndio deste repositório científico não só ceifou muitas vidas e destruiu sua estrutura (Figura 2), como também destruiu inúmeras obras de grandes filósofos e pensadores da época, como Euclides de Alexandria, Arquimedes, Hiparco, Hipácia, Ptolomeu, dentre outros. É possível dizer, ainda, que tamanha perda pode ter gerado um atraso no desenvolvimento científico mundial.

Figura 2: **Gravura do incêndio que destruiu a biblioteca e parte da cidade de Alexandria.**



Fonte: HIPERCULTURA, 2023.

Quanto as ocorrências de incêndios na atualidade, mais especificamente no Brasil, podem ser citadas as tragédias dos incêndios no Gran-Circo Norte Americano, ocorrido em Niterói (RJ) no ano de 1961, nos edifícios Andraus em 1972 e Joelma 1974, ambos localizados em São Paulo (SP), e na Boate Kiss, ocorrido em Santa Maria (RS) em 2013. Além destes, há um caso emblemático ocorrido no Brasil: o incêndio do prédio Wilton Paes de Almeida (Figura 3a) localizado em São Paulo (SP), que ocorreu em 2018 e ocasionou o colapso de sua estrutura (Figura 3b).

Figura 3: **Prédio Wilton Paes de Almeida em chamas (a) e após colapso estrutural (b).**



Fontes: G1 SP (a), 2019, e EL PAÍS (b), 2018.

Visando evitar e/ou minimizar as perdas dos patrimônios, da integridade das construções e das vidas presentes em ocorrências de incêndios, regulamentações de sistemas de segurança contra incêndio são criadas para proteger a vida e assegurar que, caso iniciados, os incêndios não se propaguem (Sousa e Silva, 2015).

Segundo a NBR 14432 (ABNT, 2001), os sistemas são subdivididos em sistemas ativos, definidos como o conjunto de elementos que tem o objetivo de combater imediatamente um incêndio já iniciado e evitar sua propagação pela edificação, e passivos, que são responsáveis de evitar a propagação do incêndio, bem como garantir que haja tempo suficiente para a evacuação do local com segurança. A atuação conjunta desses sistemas também visa permitir que a estrutura resista à ação do fogo o suficiente para que as forças de combate e salvamento cheguem ao local e entrem em ação, trazendo mais chances para o salvamento de vidas e a proteção patrimonial.

Visto que os incêndios podem comprometer a segurança das construções, este trabalho propõe a aplicação *FireSteel*, uma ferramenta computacional desenvolvida na linguagem *Python* para a análise de peças de aço em situação de incêndio. A ferramenta proposta permite

verificar a peça ao incêndio-padrão pelo Método Analítico Simplificado (MAS), presente na ABNT NBR 14323:2013, o que consiste na verificação dos esforços resistentes da peça e na determinação da temperatura crítica para a peça estrutural, com seu respectivo carregamento.

1.1. Histórico e evolução na área de estruturas sob ação do incêndio

Nos Estados Unidos, a abordagem inicial à segurança contra incêndios é refletida no primeiro *Handbook* de 1896, que priorizava à proteção patrimonial e era destinada a facilitar o trabalho dos inspetores de seguros. No entanto, uma mudança de paradigma ocorreu após quatro grandes incêndios com perda de vidas notáveis entre 1903 e 1911. Estes eventos levaram à criação, em 1914, da quinta edição *do Fire Protection Handbook* pela *National Fire Protection Association* (NFPA), marcando um ponto de virada ao priorizar a proteção de vidas.

No Brasil, até os anos 70, o cenário assemelhava-se ao dos Estados Unidos até 1911, com regulamentações municipais e do corpo de bombeiros focalizando a segurança patrimonial. No entanto, as tragédias ocorridas no Brasil, citadas anteriormente, provocaram mudanças significativas, motivando estudos aprofundados que proporcionaram avanços cruciais na área e culminaram em transformações no sistema brasileiro de prevenção e combate a incêndios.

Melhado (1989) representou um marco inicial no Brasil, explorando a fundamentação do comportamento das estruturas de aço em situações de incêndio. Este estudo estabeleceu critérios de proteção, fornecendo a base conceitual para investigações posteriores.

Em 1996, um grupo de estudo foi criado visando desenvolver critérios para o dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio (Silva e Fakury, 2002). Este grupo foi uma diretriz à tese de Silva (1997), que avançou na compreensão da área, apresentando curvas temperatura-tempo e expressões para a determinação da ação térmica nas peças estruturais. Além disso, realizou uma análise comparativa entre as normas brasileira (ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento) e europeia (EUROCODE 1), consolidando aspectos normativos e metodologias de segurança.

O estudo de Abreu e Fakury (1998) concentrou-se na elevação de temperatura em perfis de aço, desenvolvendo um programa crucial para a determinação da temperatura de elementos estruturais. Essa pesquisa forneceu dados fundamentais para a compreensão da elevação de temperatura em diferentes perfis de aço.

As atividades desenvolvidas por Souza Júnior (1998) introduziram a consideração das variações das propriedades mecânicas do material em análises de pórticos de aço submetidos a

altas temperaturas, contribuindo para uma abordagem mais abrangente do comportamento estrutural.

Fakury (1999) proporcionou uma contribuição prática, detalhando o uso da normativa ABNT NBR 14323:1999 e apresentando um método simplificado de cálculo. O trabalho abordou propriedades do aço em situações de incêndio, combinações de ações, proteção estrutural, elevação de temperatura e temperatura crítica.

Todos esses trabalhos foram base à ABNT NBR 14343:1999, a qual também tomou como referência o EUROCODE 3 Parte 1.2 (1995) para o desenvolvimento de suas recomendações. Entretanto, com as atualizações das normas ABNT NBR 8800 (2008) e da EUROCODE 3 Parte 1.2 (2005), fez-se necessário a atualização da ABNT NBR 14323 (2013), trazendo modificações em critérios importantes para a verificação das estruturas de aço em situação de incêndio.

1.2. Justificativa do trabalho

Diante do exposto, ressalta-se a importância da análise e verificação de elementos estruturais de aço em situação de incêndio, a fim de permitir que estruturas deste tipo de sistema possam manter sua integridade por tempo suficiente para a chegada das forças de combate e salvamento, diminuindo os riscos de colapsos e, principalmente, facilitando as operações de resgate das vidas ameaçadas pelo incêndio.

Destaca-se ainda que a implementação de modelos computacionais permite maior compreensão do fenômeno ocorrido em elementos de aço em situação de incêndio e estudar a influência dos parâmetros envolvidos no problema, auxiliando a projetar estruturas de aço aptas à situação de incêndio ao possibilitar o usuário a comparar casos de modo a definir a melhor configuração do elemento estrutural para resistir ao fenômeno do incêndio.

1.3. Objetivo

O presente trabalho elaborou uma aplicação computacional para verificação da resistência de elementos estruturais de aço sob elevação térmica devido à ação de incêndio, com o auxílio de interface gráfica do usuário (Graphical User Interface, GUI) desenvolvida em linguagem *Python*, proporcionando uma melhor compreensão acerca dos efeitos do fenômeno sobre a capacidade resistiva e propriedades mecânicas, bem como da influência de alguns parâmetros sobre a degradação da peça estrutural.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados ao longo do desenvolvimento deste trabalho:

- Modelar o fenômeno de elevação de temperatura em elementos de aço conforme a curva de incêndio-padrão;
- Implementar as verificações de elementos retilíneos de aço solicitados a esforços axiais, cisalhantes e de flexão em situação normal e de incêndio;
- Implementar uma interface gráfica do usuário (GUI), integrando as análises anteriores.

1.4. Metodologia de Pesquisa

Para alcançar os objetivos propostos neste plano de trabalho, a metodologia de desenvolvimento apoiou-se em cinco macro etapas: i) estudo dos modelos e formulações referentes verificação de elementos de barra retilíneos de aço e a consideração da elevação da temperatura devido aos incêndios; ii) implementação em *scripts* das formulações adotadas nas normas brasileiras para análise da evolução térmica e dimensionamento de elementos estruturais de aço em situação de incêndio; iii) modelagem da interface gráfica da aplicação desenvolvida na linguagem *Python* cenários de estudos encontrados na literatura; iv) integração entre a interface gráfica e as formulações implementadas em *scripts* e v) Análise de resultados baseados em exemplos da literatura. A Figura 4 ilustra a metodologia proposta.

Figura 4: Metodologia proposta.



Fonte: Autor, 2023.

Primeiramente, para a familiarização com o problema do incêndio e seus efeitos sobre os elementos estruturais de aço, na etapa (i) foi realizado um estudo bibliográfico acerca da elevação da temperatura em aço e das metodologias de verificação da capacidade resistente de elementos estruturais a determinado tipo de solicitação, com base, principalmente, nas normativas brasileiras. Posteriormente, a etapa (ii) tratou-se da implementação de rotinas com as formulações obtidas na etapa (i), a qual foi realizada em linguagem *Python*, interligando a análise térmica do elemento de aço com sua verificação para a situação de incêndio, implementando assim:

- Modelagem do fenômeno de elevação de temperatura em elementos de aço em situação de incêndio utilizando o Método Analítico Simplificado, presente na ABNT NBR 14432:2000;
- Verificação de elementos de aço solicitados a esforços axiais, cisalhantes e de flexão em situação normal e de incêndio, com base nas normas ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 14323:2013, respectivamente.

Na etapa (iii), uma interface gráfica do usuário (GUI) foi desenvolvida com o uso do *software* Qt Designer 5, que se trata de um empacotador da linguagem Python para a biblioteca PyQt5. Por fim, a etapa (iv) trata da integração das rotinas desenvolvidas na etapa (ii) com a interface gráfica do usuário (GUI) obtida pela etapa (iii). Os resultados obtidos foram analisados comparativamente (v) com casos disponíveis na literatura para verificar a representatividade na modelagem de incêndios e os esforços resistentes ao longo do fenômeno de estudo.

1.5. Delimitação do Trabalho

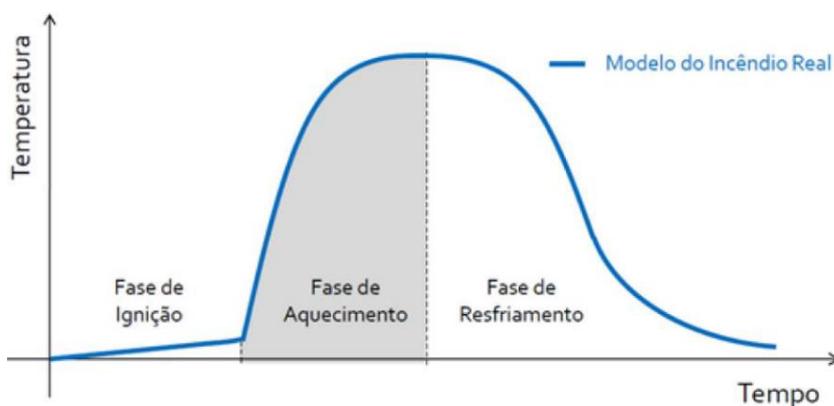
O presente trabalho avalia o fenômeno da redução do esforço resistente de elementos estruturais retilíneos de aço em situação de incêndio, focando em elementos de seção transversal “I” ou “H” de perfis laminados e soldados. Visto que os incêndios são fenômenos de difícil caracterização devido às inúmeras variáveis presentes em ambientes em chamas, foram utilizados nesse trabalho os modelos de incêndio-padrão para realizar o processo de elevação térmica do incêndio. Por sua vez, a elevação da temperatura no aço é simulada utilizando o Método Analítico Simplificado considerando uma temperatura uniforme em todo domínio do elemento de barra sob o incêndio-padrão, o que não ocorre na prática, mas é assegurado pela ABNT devido à alta condutividade térmica do aço.

2. O INCÊNDIO E SUA AÇÃO NAS ESTRUTURAS DE AÇO

2.1. O incêndio

Durante um incêndio, os gases do ambiente aumentam sua temperatura e, por consequência, ocorre o aumento da temperatura do elemento devido ao gradiente de temperatura gerado pelo fenômeno. Nesse sentido, esse gradiente opera em função de três mecanismos de transferência de calor: convecção e radiação, ocorrendo a troca de calor entre os gases do ambiente e os elementos, e a condução, transferência de calor interna dos elementos. Assim, primeiramente, é necessário descrever a temperatura dos gases no ambiente em incêndio, a qual é descrita pela curva de incêndio-real (Figura 5).

Figura 5: Curva de incêndio real.



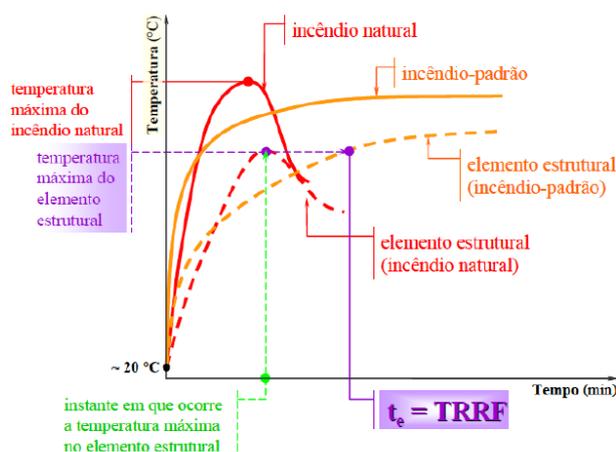
Fonte: Santos, 2022.

A curva de incêndio-real pode ser dividida em três fases: ignição, aquecimento e resfriamento. A ignição ocorre quando os elementos iniciam sua inflamação e seus elementos subjacentes também passarão pelo processo sequencialmente, de modo que a temperatura do ambiente aumenta gradualmente até a ocorrência do *flashover*. Segundo Kimura (2009), o *flashover* marca o aumento brusco da curva Temperatura x tempo, que ocorre no instante em que o compartimento é tomado completamente pelo fogo de forma repentina. Vale ressaltar que as proteções ativas podem ser suficientes para a extinção do incêndio antes que se inicie o *flashover*.

A segunda fase de um incêndio, ou fase de aquecimento, inicia-se com o *flashover*, na qual toda a carga disponível entra em ignição gerando uma elevação da temperatura rápida até o seu valor máximo durante o incêndio, o que dará início a fase de resfriamento (Kimura, 2009). Por fim, após a temperatura máxima, a fase de resfriamento ocorre pois todo o material combustível foi consumido e assim não há mais geração de calor, fazendo a temperatura retornar ao seu valor ambiente natural.

Entretanto, definir uma curva de incêndio-real é uma atividade complexa, visto que há vários fatores que influenciam o comportamento de um incêndio, tais como características do ambiente e os materiais combustíveis presentes no mesmo (Sousa e Silva, 2015). Desse modo, uma curva de incêndio-padrão foi desenvolvida para simplificar a avaliação da evolução térmica do incêndio em elementos estruturais. De acordo com Silva (1997), no modelo de incêndio-padrão (Figura 6) admite-se que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeite as curvas padronizadas para ensaio.

Figura 6: Curva real de incêndio e curva de incêndio padrão.



Fonte: Costa, 2008.

Com o uso da curva de incêndio-padrão, a elevação da temperatura dos gases é analisada em função do tempo de fogo-padrão até alcançar o valor de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). No TRRF, avalia-se a temperatura final dos gases e do elemento estrutural em incêndio-padrão (ver Figura 6).

Além disso, vale ressaltar que a evolução da temperatura dos elementos de aço pode ser realizada em casos nos quais o elemento estrutural possua ou não proteção térmica. Desse modo, é possível avaliar não somente a degradação do esforço resistente conforme as normativas brasileiras, mas também o efeito da proteção contra fogo aplicada ao elemento estrutural exposto ao fogo durante um incêndio.

2.1.1. Exigências para Verificação de Estruturas à Situação de Incêndio

Os dimensionamentos e/ou verificações em situação de incêndio não são obrigatórios para todas as estruturas. As verificações dos elementos estruturais em situações de incêndio não são obrigatórias para os elementos que estejam livres da ação do fogo, segundo a ANBT NBR 14432:2000, de modo que um elemento estrutural externo ao edifício possua distanciamento

suficiente as aberturas existentes na fachada para garantir que o aumento de sua temperatura não colapse o mesmo (Souto, 2015).

A ABNT NBR 14432:2000 também permite que um elemento estrutural específico seja considerado livre da ação do fogo em situações em que seu confinamento é livre dessa ação. O mesmo código normativo define um conjunto de edificações que podem dispensar a verificação de incêndio devido à facilidade de desocupação, o qual foi resumido por Silva (2004) e é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Isenções de verificação ao incêndio, conforme ABNT NBR 14432:2000.

Área (m ²)	Uso	Carga de incêndio específica	Altura	Meios de proteção contra incêndio
≤ 750	Qualquer	Qualquer	Qualquer	-
≤ 1500	Qualquer	≤ 2000 MJ/m ²	≤ 2 pavimentos	-
Qualquer	Centros esportivos Terminais de pass.	Qualquer	≤ 23 m	-
Qualquer	Garagens abertas	Qualquer	≤ 30 m	-
Qualquer	Depósitos	Baixa	Térrea	-
Qualquer	Qualquer	≤ 500 MJ/m ²	Térrea	-
Qualquer	Industrial	≤ 1200 MJ/m ²	Térrea	-
Qualquer	Depósitos	≤ 20000 MJ/m ²	Térrea	-
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Térrea	Chuveiros automáticos
≤ 5000	Qualquer	Qualquer	Térrea	Fachadas de aproximação

Fonte: Silva, 2004.

2.1.2. Determinação do TRRF

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) é uma medida que indica por quanto tempo de incêndio-padrão um elemento estrutural deve manter sua capacidade resistente. Essa duração é expressa em minutos e pode variar conforme o tipo de elemento estrutural e a situação de projeto a ser atendida no projeto de edificações.

Verificada a necessidade de avaliar o desempenho da estrutura ao incêndio, a ABNT possibilita determinar o TRRF por dois métodos: tabular, com base nos dados disposto no ANEXO A, e tempo equivalente, também apresentado na normativa ABNT NBR 15200:2012 e detalhado no ANEXO B deste trabalho.

2.2. Modelos de incêndio-padrão

De acordo com Souto (2015), os modelos de incêndio-padrão são definidos por curvas que relacionam temperatura e tempo dos gases do ambiente sob incêndio de forma padronizada,

o que não representa fielmente um incêndio real. Entretanto, essas curvas são bastante utilizadas em conjunto com o tempo padronizado TRRF para determinar a temperatura nas estruturas.

A ABNT NBR 14432:2000 equaciona a curva de incêndio-padrão geral para obter a temperatura dos gases do ambiente em incêndio θ_g conforme a Equação (1),

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log(8 t + 1). \quad (1)$$

Para elementos estruturais locados em paredes externas das edificações que podem ser expostas a incêndio de diferentes partes da fachada, ou seja, diretamente do interior do respectivo compartimento de fogos ou de um compartimento adjacente à respectiva parede externa, a curva de incêndio-padrão é definida, segundo a normativa Eurocode 1 (2002), pela Equação (2),

$$\theta_g = \theta_o + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}). \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), temos que:

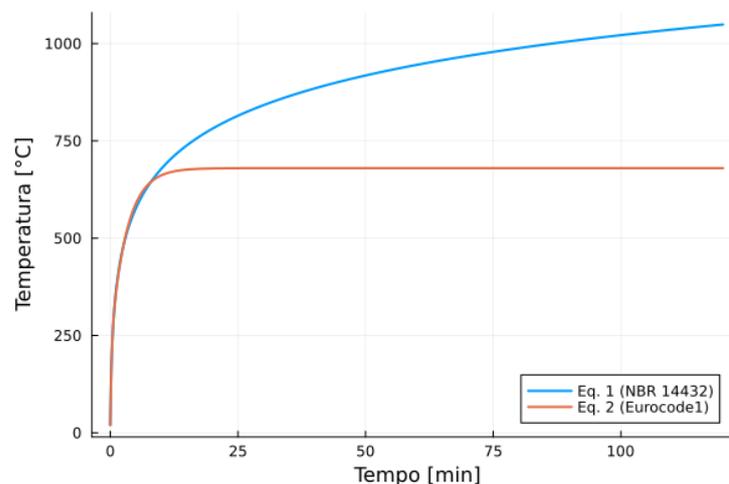
t é o tempo, em minutos;

θ_o é a temperatura ambiente anterior ao aquecimento, geralmente adotada em 20 °C, em graus Celsius;

θ_g é a temperatura dos gases devido ao incêndio no instante t próxima do elemento estrutural a ser analisado, em graus Celsius.

Com base nas Equações (1) e (2), é possível caracterizar graficamente a temperatura dos gases na interface do elemento estrutural a ser analisado. Observa-se na Figura 7 que as curvas em questão não apresentam a fase de resfriamento e estão sempre aumentando a temperatura dos gases, o que não ocorre no incêndio real e é uma característica dos modelos de curva de incêndio-padrão.

Figura 7: **Curvas temperatura x tempo dos modelos de incêndio-padrão apresentados.**



Fonte: Autor, 2023.

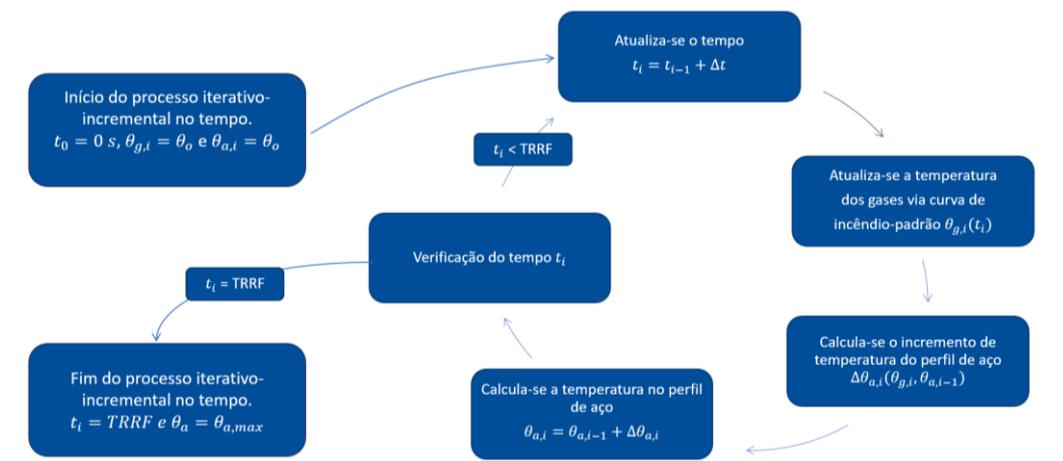
Apesar de não apresentar uma fase de resfriamento, Kimura (2009) afirma que os modelos de incêndio-padrão possuem grande aderência com o comportamento de incêndios reais de grandes proporções na fase de aquecimento (após o *flashover*), na qual a velocidade de aquecimento dos gases do ambiente é extremamente alta.

2.2.1. Processo iterativo-incremental no tempo de elevação da temperatura

Para realizar-se a elevação da temperatura dos elementos de aço situação de incêndio, é necessário incorporar o calor proveniente dos gases do ambiente ao elemento de aço. Entretanto, as equações que definem a variação de calor nos elementos devido a temperatura dos gases em função do tempo são matematicamente complexas, tornando inviável, caso seja possível, o uso de uma solução analítica.

Desse modo, é necessário utilizar método aproximados como, neste caso, o processo iterativo-incremental no tempo, que consiste em calcular um acréscimo de temperatura ao aço ($\Delta\theta_a$), a cada passo de tempo Δt , para definir qual será a temperatura no aço (θ_a) devido a interação com os gases do ambiente em incêndio (θ_g) em um instante de tempo t qualquer. Apresenta-se na Figura 8 um fluxograma que define visualmente o procedimento descrito.

Figura 8: Fluxograma do processo iterativo-incremental no tempo.



Fonte: Autor, 2023.

Ressalta-se que a determinação de $\Delta\theta_a$ varia de acordo com o tipo de formulação utilizada, as quais serão abordadas as formulações para casos sem proteção contra fogo e com proteção contra fogo (com exceção da proteção em tinta intumescente).

2.2.2. Formulação de elevação da temperatura do aço sem proteção contra fogo

Durante um incêndio, os elementos da estrutura em chamas sofrem elevação de temperatura. Visto que o aço possui alta condutividade térmica, o calor é distribuído

rapidamente por todo o elemento estrutural, permitindo a ABNT NBR 14323:2013 fazer a consideração de um campo de temperatura uniforme ao longo da seção transversal e do comprimento de um elemento estrutural linear (Souto, 2015).

Com essas considerações, a referida norma dispõe da Equação (3) para determinar a variação da temperatura em um elemento estrutural de aço sem proteção térmica, e da Equação (4), a qual permite obter a temperatura do elemento estrutural em um instante t qualquer.

$$\Delta\theta_a(t) = k_{sh} \frac{F}{c_a \rho_a} \varphi(t) \Delta t \quad (3)$$

$$\theta_a(t) = \Delta\theta_a(t) + \theta_a(t - \Delta t) \quad (4)$$

Nestas equações, tem-se que:

$\theta_a(t)$ é a temperatura do elemento estrutural para um instante t , em graus Celsius;

$\Delta\theta_a(t)$ é a variação de temperatura do elemento estrutural para um instante t , em graus Celsius;

F é o fator de massividade da seção transversal do elemento estrutural, obtida pela relação (u/A_g) e expresso em m^{-1} ;

u é o perímetro da seção transversal do elemento estrutural exposto ao incêndio, em metros;

A_g é área bruta da seção transversal do elemento estrutural, em metros quadrados;

c_a é o calor específico do aço em $J/kg^\circ C$;

ρ_a é a massa específica do aço, expressa em kg/m^3 ;

k_{sh} é o fator de correção para o efeito de sombreamento, o qual pode ser definido como 1 ou segundo o item 8.5.1.1.2 da ABNT NBR 14323:2013;

Δt é o incremento de tempo, em segundos;

φ é o fluxo de calor por unidade de área em um instante qualquer t , expressa em W/m^2 , e é obtida com base na Equação (5).

$$\varphi(t) = \varphi_c(t) + \varphi_r(t) \quad (5)$$

O fluxo de calor do elemento estrutural de aço é subdividido em parcelas de convecção φ_c e de radiação φ_r , as quais são determinadas em um instante qualquer t por meio das Equações (6) e (7).

$$\varphi_c(t) = \alpha_c (\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t)) \quad (6)$$

$$\varphi_r(t) = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t - \Delta t) + 273)^4 \right] \quad (7)$$

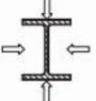
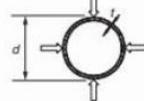
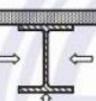
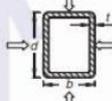
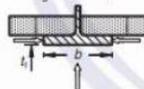
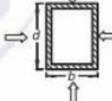
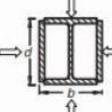
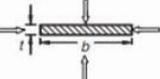
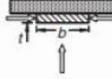
Nestas equações:

α_a é o coeficiente de transferência de calor por convecção, recomendado pela ABNT NBR 14323:2013 como 25 W/m²C para incêndio-padrão e 35 W/m²C para incêndio-natural;

ϵ_{res} é a emissividade resultante, adotada para efeitos práticos como igual a 0,7 segundo a ABNT NBR 14323:2013.

Ressalta-se que a Equação (3) é representativa para as peças retilíneas as quais não possuam quaisquer tipos de proteções térmicas, bem como também que o fator de massividade F pode ser obtido de acordo com as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 (Figura 9).

Figura 9: Fator de Massividade para seções sem material de proteção contra fogo.

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção-caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$ 
<p>Mesa de seção I ou H exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t_f}{b t_f}$ 	<p>Seção-caixão soldada exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Cantoneira exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2}{t}$ 	<p>Seção I ou H com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Chapa exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+t)}{b t}$ 	<p>Chapa exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t}{b t}$ 

Fonte: ABNT NBR 14323, 2013.

2.2.3. Formulação de elevação da temperatura do aço com proteção contra fogo

Tratando-se de elementos retilíneos de aço com proteção contra fogo, com exceção dos casos de tinta intumescente, a ABNT NBR 14323:2013 permite obter a variação da temperatura do elemento de aço revestido com proteção térmica pela equação (8)

$$\Delta\theta_a(t) = \frac{\lambda_m F_m}{t_m c_a \rho_a} \frac{(\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t)) \Delta t}{\left(\frac{\xi}{4}\right) + 1} - \frac{\Delta\theta_g(t)}{\left(\frac{4}{\xi}\right) + 1}, \quad (8)$$

com $\Delta\theta_a(t) \geq 0$ se $\Delta\theta_g(t) > 0$ e

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{t_m c_a \rho_a} F_m, \quad (9)$$

nas quais:

λ_m é a condutividade térmica do material de proteção térmica, expressa em Wm/°C;

ρ_m é a massa específica do material de proteção térmica, expressa em kg/m³;

c_m é o calor específico do material de proteção térmica, expresso em J/kg°C;

t_m é a espessura do material de proteção térmica, expresso em metros;

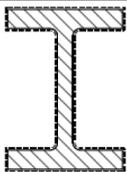
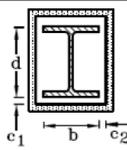
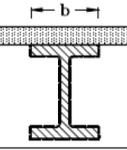
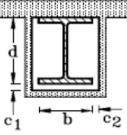
$\Delta\theta_g(t)$ é variação de temperatura dos gases em um instante t devido ao incremento de tempo Δt , expresso em segundos;

F_m é o fator de massividade da seção transversal do elemento estrutural envolvidos por proteção térmica, obtida pela relação (u_m/A_g) , expresso em m⁻¹;

u_m é o perímetro efetivo do material de proteção contra fogo exposto ao incêndio, em metros.

Vale ressaltar que é possível determinar F_m segundo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013, como mostrado na Figura 10.

Figura 10: Fator de Massividade para seções com material de proteção contra fogo.

Situação	Descrição	Fator de massividade (u_m/A)
	Seção com proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(d + c_1 + b + c_2)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo contorno, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d + c_1 + b + 2c_2}{\text{área da seção da peça de aço}}$

Fonte: ABNT NBR 14323, 2013.

Por fim, a temperatura do aço com proteção térmica para um instante qualquer t é obtido considerando a Equação (4) realizando o processo incremental no tempo.

2.3. Propriedades físicas no Aço sob Altas Temperaturas

O aço possui diversas propriedades e características físicas, as quais são fundamentais para avaliação do seu comportamento tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio. Sabendo que a variação de temperatura provoca alterações nestas propriedades, esta seção apresenta as propriedades mecânicas e térmicas do aço de interesse e destaca quais destas sofrem variação com a temperatura segundo a ABNT NBR 14323:2013.

2.3.1. Limites de Escoamento e Módulo de Elasticidade

A ação do fogo afeta significativamente a resistência das estruturas devido a elevação de sua temperatura (Ricardo, 2022), tal que os códigos normativos definem fatores de redução para as propriedades mecânicas relacionadas à resistência do material. Nesse sentido, a ABNT NBR 14323:2013 aplica fatores de redução para o módulo de elasticidade e as resistências ao escoamento para elementos sujeitos ou não à flambagem, respectivamente $k_{E,\theta}$, $k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$, de modo que:

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (10)$$

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (11)$$

$$k_{\sigma,\theta} = \frac{f_{\sigma,\theta}}{f_y} \quad (12)$$

nas quais:

E é o módulo de elasticidade do aço a temperatura ambiente (20 °C);

E_θ é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

f_y é a resistência ao escoamento do aço a temperatura ambiente (20 °C);

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a para elementos não sujeitos à flambagem;

$f_{\sigma,\theta}$ é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a para elementos sujeitos à flambagem.

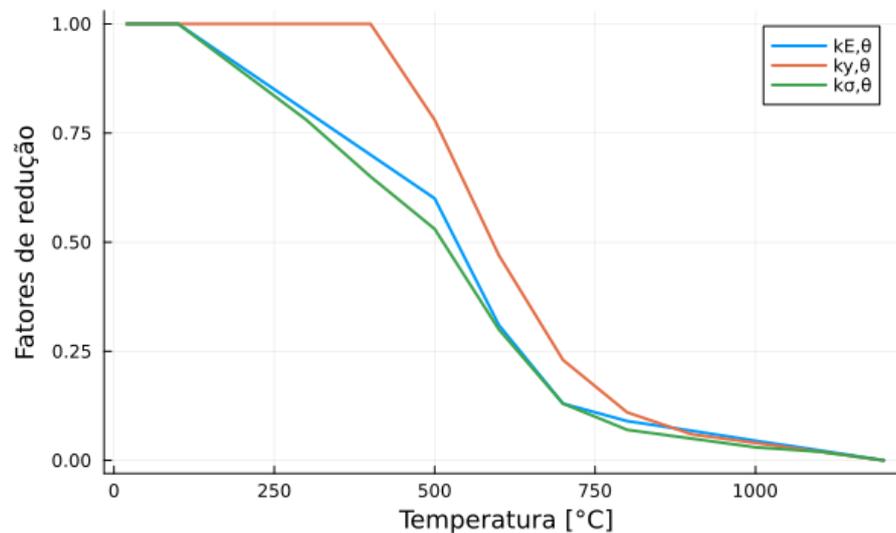
Os fatores de redução relacionados a degradação do aço têm seus valores disposto, de forma discreta, pela ABNT NBR 14323:2013, os quais são apresentados numericamente na Tabela 2 e utilizados para representar as curvas dos fatores de redução $k_{E,\theta}$, $k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$ em função da temperatura (Figura 11).

Tabela 2: Fatores de redução para o aço.

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução para o módulo de elasticidade do aço $k_{E,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento do aço para elementos não sujeitos à flambagem local $k_{y,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento do aço para elementos sujeitos à flambagem local $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	0,900	1,000	0,890
300	0,800	1,000	0,780
400	0,700	1,000	0,650
500	0,600	0,780	0,530
600	0,310	0,470	0,300
700	0,130	0,230	0,130
800	0,090	0,110	0,070
900	0,068	0,060	0,050
1.000	0,045	0,040	0,030
1.100	0,023	0,020	0,020
1.200	0,000	0,000	0,000

Fonte: ABNT NBR 14323:2013.

Figura 11: Curvas dos fatores de redução $k_{E,\theta}$, $k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$ em função da temperatura.



Fonte: Autor, 2023.

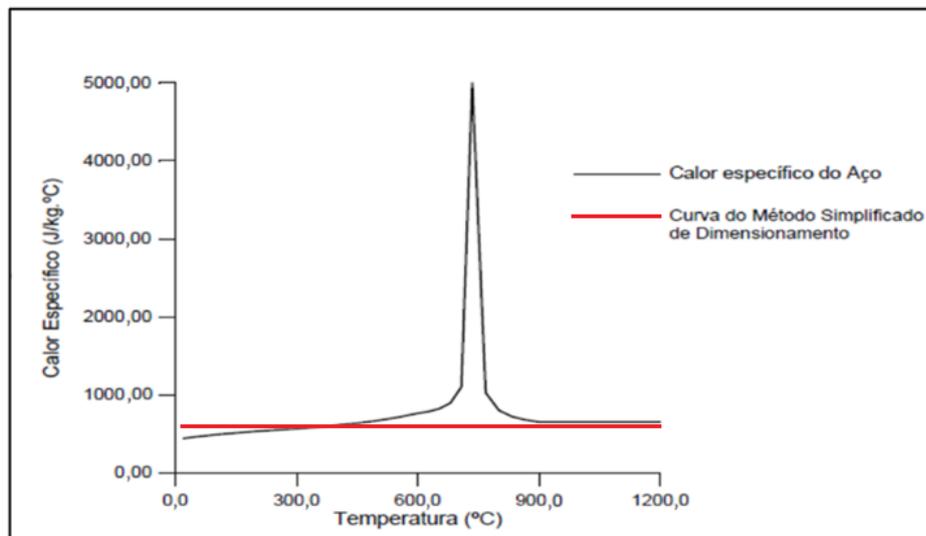
2.3.2. Massa Específica e Coeficiente de Poisson

A massa específica ρ_a e o coeficiente de Poisson ν são destacados pela ABNT NBR 14323:2013, a qual permite considerá-los como independentes da temperatura. Assim, recomenda-se que a massa específica e o coeficiente de Poisson sejam considerados como 7850 kg/m³ e 0,3, respectivamente.

2.3.3. Calor específico

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta que o calor específico c_a , quantidade de calor necessário para elevar em 1 °C um quilograma de um material, possui valor que varia em função da temperatura. Entretanto, este código normativo permite para o método simplificado que o calor específico constante (Figura 12) igual a $c_a = 600 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$.

Figura 12: Calor específico do aço em função da temperatura.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323, 2013.

3. ESFORÇOS RESISTENTES

Considerando as normas brasileiras, a capacidade resistente dos elementos estruturais de aço em temperatura ambiente é realizada com base nas formulações presentes na ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifício. Por sua vez, os esforços resistentes dos elementos estruturais de aço em situação de incêndio são caracterizados segundo as especificações da ABNT NBR 14323:2013 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

Para que os esforços resistentes de um elemento estrutural retilíneo de aço exposto ao fogo sejam determinados de acordo com a ABNT NBR 14323:2013, é necessário que a temperatura do elemento seja determinada, como mostrado na Seção 2. Desse modo, com a simulação do incêndio por meio da curva de incêndio-padrão, obtêm-se a temperatura do elemento estrutural de aço, posteriormente os esforços resistentes dos elementos estruturais são obtidos e, por fim, realiza-se a verificação do elemento retilíneo, de seção I ou H, às suas solicitações em situação de incêndio.

3.1. Resistência à Tração

3.1.1. Resistência à Tração devido ao escoamento em Temperatura Ambiente

O esforço resistente à tração devido ao escoamento de um elemento de aço em temperatura ambiente T_{Rd} , é definido, segundo a ABNT NBR 8800:2008, pela Equação (13).

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_s} \quad (13)$$

na qual:

$N_{t,Rd}$ é a tração resistente do elemento de aço à temperatura ambiente, em kN;

A_g é a área bruta da seção transversal do elemento estrutural, em metros quadrados;

f_y é a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente (20 °C), em kN/m²;

γ_s é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente (20 °C), definido pela ABNT NBR 8800:2013 como igual a 1,10.

3.1.2. Resistência à Tração em Situação de Incêndio

Em situação de incêndio, o esforço resistente à tração devido ao escoamento de um elemento de aço $T_{fi,Rd}$, é definido, segundo a ABNT NBR 14323:2013, pela Equação (14).

$$N_{t,fi,Rd} = A_g f_{y,\theta} \quad (14)$$

na qual:

$N_{t,fi,Rd}$ é a tração resistente do elemento de aço em situação de incêndio, em kN, para uma temperatura θ_a ;

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a , em kN, obtido pela relação apresentada a Equação (11).

3.2. Resistência à Compressão

3.2.1. Resistência à Compressão em Temperatura Ambiente

A força axial resistente à compressão C_{Rd} , para um elemento de barra, em temperatura ambiente é definida na normativa ABNT NBR 8800:2008 segundo a Equação (15)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_s}, \quad (15)$$

na qual:

$N_{c,Rd}$ é a compressão resistente do elemento de aço em temperatura ambiente, em kN;

Q é o fator de redução total associado à flambagem local do elemento de barra, de valor menor ou igual a 1,0;

χ é o fator de redução total associado à flambagem global do elemento de barra, de valor menor ou igual a 1,0.

A ABNT NBR 8800:2008 define o fator Q por meio da Equação (16)

$$Q = Q_a Q_s. \quad (16)$$

Para elementos de barra em seção I ou H, Q_s é o fator de redução associado à flambagem local do elemento apoiado-livre (AL) da seção transversal, de valor menor ou igual a 1,0. Este fator é definido, com base no ANEXO F da ABNT NBR 8800:2008, pela Equação (17)

$$Q_s = \begin{cases} 1, & \text{se } \frac{b}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, & \text{se } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, & \text{se } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases} \quad (17)$$

na qual b e t são, respectivamente, a largura e espessura da mesa (elemento AL) de seção I ou H analisada (ver Figura 13).

Figura 13: Valores de (b/t) limite

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800, 2008.

Adotando uma condição conservadora e com base nas premissas da ABNT NBR 8800:2008 e na Figura 13, o fator de redução Q_a , referente à flambagem local do elemento apoiado-apoiado (AA) da seção transversal de barra I ou H, é definido na Equação (18)

$$Q_a = \begin{cases} 1, & \text{se } \frac{b}{t} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ 1 - \left(b - 1,92t \sqrt{\frac{E}{f_y} \left(1 - \frac{0,34}{(b/t)} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right)} \right) \cdot t / A_g, & \text{se } \frac{b}{t} > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}, \quad (18)$$

De posse do coeficiente de redução devido à instabilidade local Q , é possível determinar o coeficiente de redução devido à instabilidade local χ , o qual tem valor máximo igual a 1,00 e é expresso na Equação (19)

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2, & \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2}, & \lambda_0 > 1,5' \end{cases} \quad (19)$$

na qual a esbeltez reduzida λ_0 é obtida pela Equação (20)

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (20)$$

A esbeltez reduzida também é função do menor valor da carga crítica de flambagem elástica N_e do elemento de seção transversal I ou H, à qual é obtida pela Equação (21)

$$N_e = \min \left(\frac{\pi^2 EI_x}{(k_x L_x)^2}, \frac{\pi^2 EI_y}{(k_y L_y)^2}, \frac{1}{r_o^2} \left(\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} + GI_t \right) \right), \quad (21)$$

na qual:

$k_i L_i$ é o comprimento de flambagem por flexão em relação a eixo i , sendo o eixo x , y ou z ;

I_i é o momento de inércia da seção transversal em relação a eixo i , sendo o eixo x ou y ;

I_t é a constante de torção da seção transversal;

r_o é o raio de giração da seção transversal;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal.

3.2.2. Resistência à Compressão em Situação de Incêndio

A compressão resistente em situação de incêndio $C_{fi,Rd}$, para um elemento de barra de seção I ou H, deve considerar a possibilidade de flambagem local da mesa ou alma da seção transversal. Dessa forma, a ABNT NBR 14323:2013 define $C_{fi,Rd}$ pela Equação (22).

$$N_{c,fi,Rd} = \begin{cases} \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y, & \frac{b}{t} \leq 0,85 \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} \\ Q \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} A_g f_y, & \frac{b}{t} > 0,85 \left(\frac{b}{t} \right)_{lim} \end{cases}, \quad (22)$$

na qual:

$N_{t,fi,Rd}$ é a compressão resistente do elemento de aço em situação de incêndio, em kN, para uma temperatura θ_a ;

$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ é a esbeltez limite da mesa ou alma da seção transversal do elemento de aço, a ser observado na Figura 13;

$k_{y,\theta}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço para elementos não sujeitos à flambagem local, obtido na Tabela 2;

$k_{\sigma,\theta}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço para elementos sujeitos à flambagem local, obtido na Tabela 2;

χ_{fi} é o fator de redução total associado à flambagem global do elemento de barra em situação de incêndio, de valor menor ou igual a 1,0 e que é obtido pela Equação (23)

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{o,fi} + \sqrt{\varphi_{o,fi}^2 - \lambda_{o,fi}^2}} \quad (23)$$

Por sua vez, os coeficientes $\lambda_{o,fi}$ e $\varphi_{o,fi}$ são obtidos pelas equações a seguir.

$$\lambda_{o,fi} = \frac{\lambda_o}{0,85} \quad (24)$$

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (25)$$

$$\varphi_{o,fi} = 0,5(1 + \alpha\lambda_{o,fi} + \lambda_{o,fi}^2) \quad (26)$$

Vale ressaltar que os valores de Q_s e Q_a , utilizados para calcular Q e λ_o , devem ser determinados utilizando os módulos de elasticidade e resistência ao escoamento em situação de incêndio (E_θ e $f_{y,\theta}$, respectivamente) ao invés dos módulos de elasticidade e resistência ao escoamento em temperatura ambiente (E e f_y , respectivamente), tal como expressos nas Equações (17) e (18).

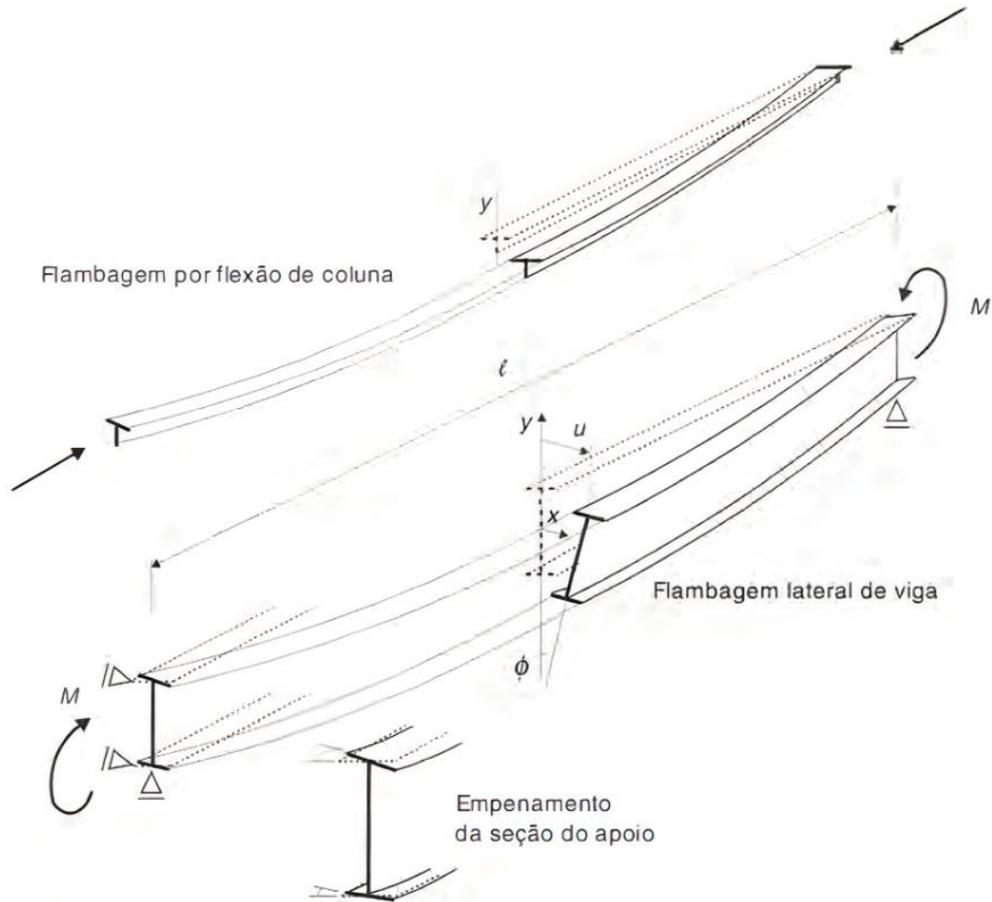
3.3. Resistência à Flexão

3.3.1. Resistência à Flexão em Temperatura Ambiente

O momento fletor resistente pode ser determinado para os eixos “x” e “y”, coplanares à seção transversal e paralelos entre si. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), uma seção transversal submetida à flexão pode alcançar o seu Estado Limite Último (ELU) devido à plastificação total da seção transversal e a fenômenos de instabilidade, dentre os quais podem ocorrer a

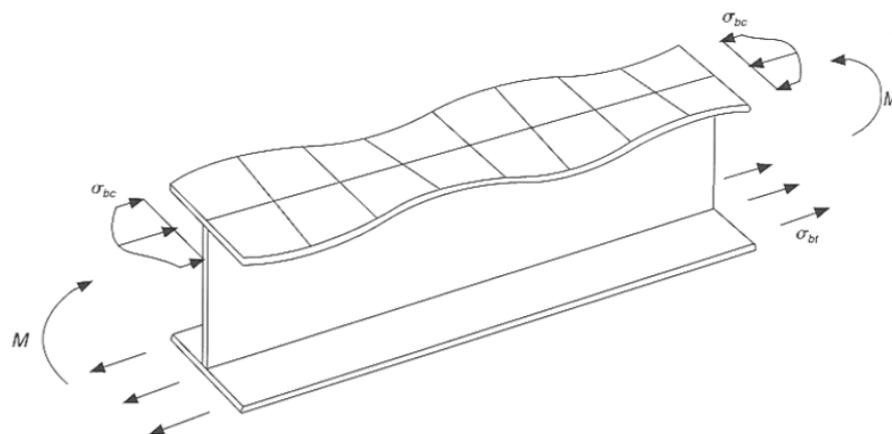
Flambagem Lateral com Torção (ver Figura 14), Flambagem Local da Mesa (FLM, ver Figura 15) e Flambagem Local da Alma (FLA, ver Figura 16).

Figura 14: **Exemplo de Flambagem Lateral com Torção (FLT).**



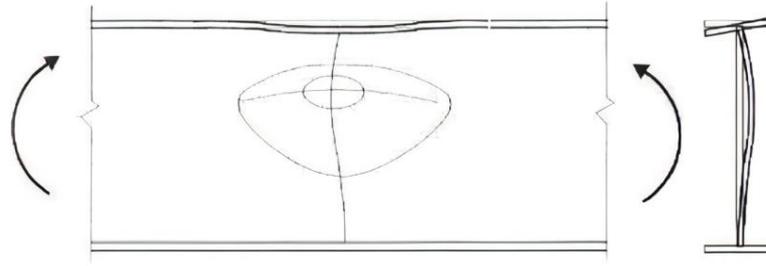
Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Figura 15: **Exemplo de Flambagem Local da Mesa (FLM).**



Fonte: Pfeil e Pfeil, 2009.

Figura 16: Exemplo de Flambagem Local da Alma (FLA).



Fonte: Pfeil e Pfeil, 2009.

Primeiramente, é necessário definir o momento fletor resistente para o início da plastificação (27) e para a plastificação total da seção transversal (28)

$$M_i = W_i f_y \quad (27)$$

e

$$M_{i,pl} = Z_i f_y \quad (28)$$

nas quais:

M_i é o momento fletor resistente para o início de plastificação da seção transversal em uma direção i (x ou y);

W_i é o momento elástico resistente da seção transversal em uma direção i (x ou y);

$M_{i,pl}$ é o momento fletor resistente para plastificação total da seção transversal em uma direção i (x ou y);

Z_i é o momento plástico resistente da seção transversal em uma direção i (x ou y).

Agora, define-se o Momento Fletor Resistente da Seção transversal como o menor valor de momento fletor resistente para cada caso de instabilidade (FLT, FLM e FLA). Para cada caso de instabilidade em elementos retilíneos de seção transversal I ou H, pode ser equacionado o momento resistente de cada de forma geral com base na ABNT NBR 8800:2008, pela expressão

$$M_{i,F} = \begin{cases} \frac{M_{i,pl}}{\gamma_s}, & \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{1}{\gamma_s} \left[M_{i,pl} - (M_{i,pl} - M_{i,r}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], & \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ \frac{M_{i,cr}}{\gamma_s} \leq \frac{M_{i,pl}}{\gamma_s}, & \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (29)$$

na qual:

$M_{i,F}$ é o momento fletor resistente em uma direção i (x ou y) para um caso de flambagem F (FLT, FLM ou FLA);

$M_{i,r}$ é o momento fletor resistente em uma direção i (x ou y), igual a $0,7M_i$ para FLT e FLM ou M_i para FLA;

λ é a esbeltez da peça ou de sua mesa ou alma da seção transversal, calculada na Equação (30);

λ_p é a esbeltez limite para a plastificação e a flambagem inelástica, definido na Equação (31);

λ_r é a esbeltez limite para a flambagem inelástica e elástica, definido na Equação (32);

$M_{i,cr}$ é a momento fletor crítico em uma direção i (x ou y), definido na Equação (33);

$$\lambda = \begin{cases} L_b/r_i, & \text{se FLT} \\ b/t, & \text{se FLM} \\ h/t_w, & \text{se FLA} \end{cases} \quad (30)$$

$$\lambda_p = \begin{cases} 1,76 \sqrt{E/f_y}, & \text{se FLT} \\ 0,38 \sqrt{E/f_y}, & \text{se FLM} \\ 3,76 \sqrt{E/f_y}, & \text{se FLA} \end{cases} \quad (31)$$

$$\lambda_r = \begin{cases} \frac{1,38 \sqrt{I_i I_t}}{r_i \beta_1 I_t} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_i} 2}}, & \text{se FLT} \\ 0,83 \sqrt{E/(0,7 f_y)}, & \text{se FLM} \\ 5,70 \sqrt{E/f_y}, & \text{se FLA} \end{cases} \quad (32)$$

$$M_{i,cr} = \begin{cases} \frac{\pi^2 E I_i}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_i} \left(1 + 0,039 \frac{I_i L_b^2}{C_w} \right)}, & \text{se FLT} \\ \frac{0,69 E}{\lambda^2} W, & \text{se FLM ou FLA} \end{cases} \quad (33)$$

Para tais equações, tem-se que:

L_b é o comprimento livre para flambagem lateral com torção;

r_i é o raio de giração na direção i ;

b é a largura da mesa;

t é a espessura da mesa;

h é a altura da alma;

t_w é a largura da mesa;

t_w é a largura da mesa;

β_1 é uma constante, obtida pela Equação (34).

$$\beta_1 = \frac{0,7W_i f_y}{EI_i} \quad (34)$$

Por fim, o momento fletor resistente da seção transversal é dado pela Equação (35).

$$M_{i,Rd} = \min(M_{i,FLT}, M_{i,FLA}, M_{i,FLM}) \quad (35)$$

3.3.2. Resistência à Flexão em Situação de Incêndio

Segundo a ABNT NBR 14323:2013, o Momento Fletor Resistente para a situação de incêndio em uma direção i ($M_{i,fi,Rd}$), considerando o fator de correção da distribuição da temperatura na seção $\kappa = 1$ para uma análise mais conservadora, é determinado pela equação:

$$M_{i,fi,Rd} = \min(M_{i,fi,FLT}, M_{i,fi,FLA}, M_{i,fi,FLM}), \quad (36)$$

de tal modo que os Momentos Fletores resistentes para FLM, FLA e FLT são determinados, respectivamente, pelas Equações (37) a (39).

$$M_{i,fi,FLM} = \begin{cases} \kappa k_{y,\theta} M_{i,pl}, & \lambda \leq 0,85\lambda_p \\ \kappa k_{y,\theta} M_i, & 0,85\lambda_p < \lambda \leq 0,85\lambda_r \\ \kappa k_{\sigma,\theta} M_i, & \lambda > 0,85\lambda_r \end{cases} \quad (37)$$

$$M_{i,fi,FLA} = \begin{cases} k_{y,\theta} M_{i,pl}, & \lambda \leq 0,85\lambda_p \\ k_{y,\theta} M_i, & \lambda > 0,85\lambda_p \end{cases} \quad (38)$$

$$M_{i,fi,FLT} = \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (39)$$

Ressalta-se que o coeficiente χ_{fi} presente na Equação (39) é determinado com base na Equação (23). Entretanto, na determinação de $M_{i,fi,FLT}$, o fator χ_{fi} dever ser calculado a esbeltez reduzida em situação de incêndio $\lambda_{o,fi}$ conforme a Equação (40)

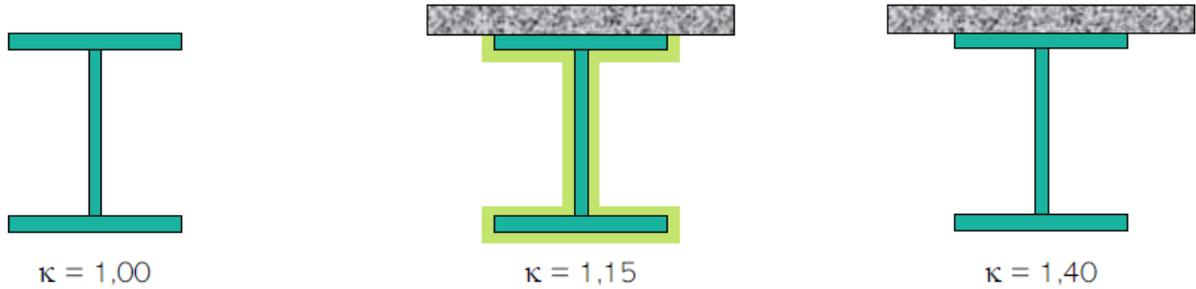
$$\lambda_{o,fi} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta} M_{i,pl}}{k_{E,\theta} M_{i,cr}}} \quad (40)$$

na qual, tem-se que:

$k_{E,\theta}$ é o fator de redução para a módulo de elasticidade do aço para uma temperatura θ_a , obtido na Tabela 2.

Além disso, o fator κ considera o efeito benéfico de uma distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal, como é possível de ocorrer em vigas

Figura 17: Exemplos de valores de κ para situações de pilares ou vigas.



Fonte: Santos, 2022.

3.4. Resistência ao Cisalhamento

3.4.1. Resistência ao Cisalhamento em Temperatura Ambiente

A resistência ao cisalhamento, ou esforço cortante, em temperatura ambiente V_{Rd} é em coadunação com a ABNT NBR 8800:2008, definindo tal esforço resistente pela Equação (41).

$$V_{Rd} = \begin{cases} \frac{V_{pl}}{\gamma_s}, & \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_s}, & \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_s}, & \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (41)$$

com:

$$V_{pl} = 0,60(dt_w)f_y, \quad (42)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w}, \quad (43)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}, \quad (44)$$

$$\lambda_p = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (45)$$

e

$$k_v = \begin{cases} 5, & \text{para (1)} \\ 5 \left(1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2\right), & \text{para (2)} \end{cases} \quad (46)$$

nas quais:

V_{pl} é o esforço cisalhante para plastificação da alma da seção transversal;

d é a altura total da seção transversal no sentido da alma;

h é a altura da alma da seção transversal;

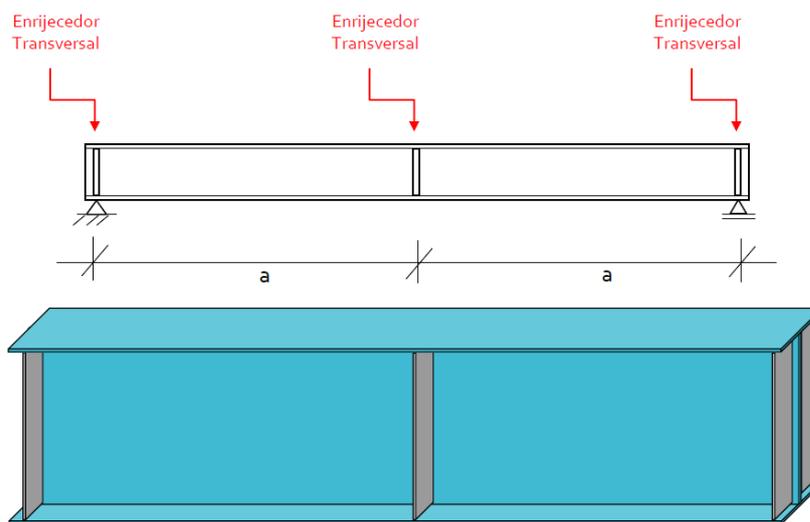
t_w é a espessura da alma da seção transversal;

k_v é a constante de flambagem local por cisalhamento, na qual equivale a (1) se $\frac{a}{h} > 3$, $\frac{a}{h} >$

$\left(\frac{260t_w}{h}\right)^2$ ou não houver enrijecedores da seção transversal (ver Figura 18), do contrário equivale a (2);

a é a distância entre enrijecedores aplicado ao elemento retilíneo de barra I ou H (Figura 18).

Figura 18: Exemplo de aplicação de enrijecedores em elementos de aço.



Fonte: adaptado de Santos, 2020.

3.4.2. Resistência ao Cisalhamento em Situação de Incêndio

Para a determinação do esforço resistente ao cisalhamento em situação de incêndio $V_{fi,Rd}$, a ABNT NBR 14323:2013 permite que a equação esforço resistente ao

cisalhamento em temperatura ambiente (41) seja utilizada com alguns ajustes para considerar a situação de incêndio. Dessa forma, $V_{fi,Rd}$ é determinado na Equação (47).

$$V_{fi,Rd} = \begin{cases} \kappa k_{y,\theta} V_{i,pl}, & \lambda \leq 0,85\lambda_p \\ \kappa \frac{0,85\lambda_p}{\lambda} k_{\sigma,\theta} V_{i,pl}, & 0,85\lambda_p < \lambda \leq 0,85\lambda_r \\ 1,24\kappa \left(\frac{0,85\lambda_p}{\lambda}\right)^2 k_{\sigma,\theta} V_{i,pl}, & \lambda > 0,85\lambda_r \end{cases}, \quad (47)$$

Vale ressaltar que o parâmetro κ é o mesmo citado na seção 3.3.2, mas que só é considerado para o cálculo do esforço resistente ao cisalhamento em situação de incêndio na ABNT NBR 14323:1999. Para a versão de 2013 desta normativa, κ é desconsiderado e, assim, este é removido da Equação (47).

3.5. Resistência à Solicitações Axiais Combinadas em temperatura ambiente e situação de incêndio

Por fim, as solicitações axiais combinadas (ação conjunta de momentos fletores em x e/ou y com tração ou compressão) podem ser verificadas de forma análoga para as situações de temperatura ambiente e incêndio, as quais serão denominadas neste trabalho como os fatores f (48) e f_{fi} (49), respectivamente, como mostrado a seguir.

$$f = \begin{cases} \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right), & \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \\ \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right), & \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \end{cases}, \quad (48)$$

$$f_{fi} = \begin{cases} \frac{N_{Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \right), & \frac{N_{Sd}}{N_{fi,Rd}} \geq 0,2 \\ \frac{N_{Sd}}{2N_{fi,Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \right), & \frac{N_{Sd}}{N_{fi,Rd}} < 0,2 \end{cases}, \quad (49)$$

nas quais:

N_{Rd} é o esforço normal resistente em temperatura ambiente, podendo ser a tração $N_{t,Rd}$ ou a compressão $N_{c,Rd}$;

$N_{fi,Rd}$ é o esforço normal resistente em situação de incêndio para uma temperatura θ_a , podendo ser a tração $N_{t,fi,Rd}$ ou a compressão $N_{c,fi,Rd}$, ambas em situação de incêndio;

N_{Sd} é o esforço normal solicitante, podendo ser a tração ou a compressão;

$M_{i,Sd}$ é o momento fletor solicitante em uma direção i ;

f é o fator de solicitação relativa do elemento de barra solicitados a ações axiais combinada em temperatura ambiente;

f_{fi} é o fator de solicitação relativa do elemento de barra solicitados a ações axiais combinada em situação de incêndio, a uma temperatura θ_a ;

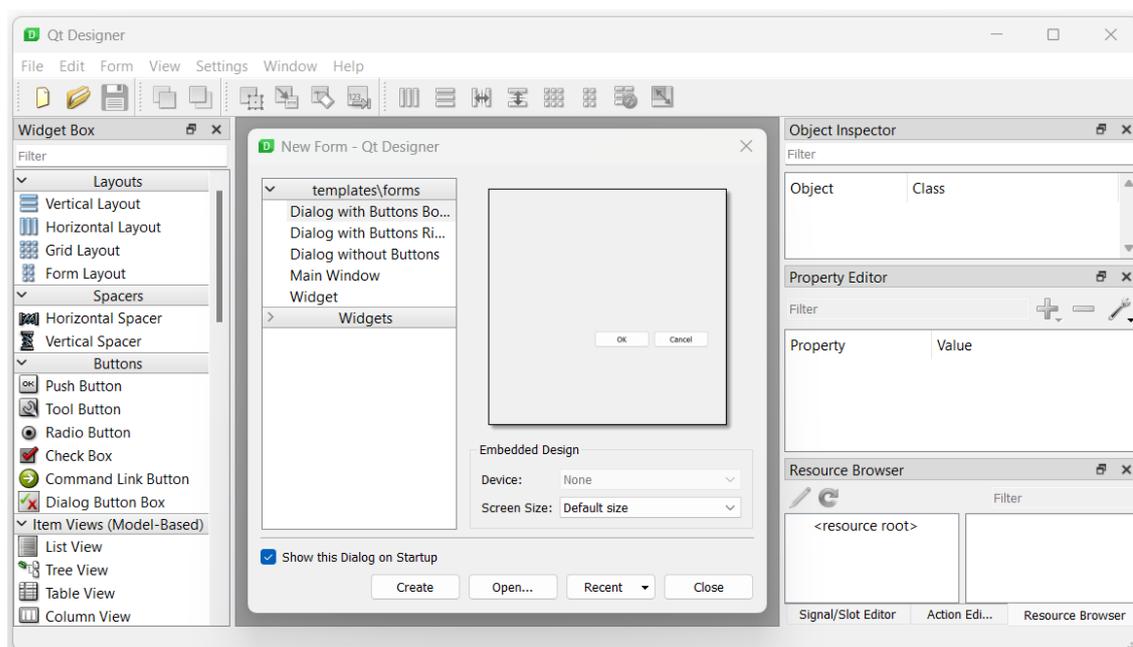
Observe que os fatores f e f_{fi} são adimensionais e verificam somente se a combinação das solicitações axiais resulta, ou não, no colapso o elemento. Deste modo, tem-se que o elemento retilíneo resiste a solicitação se f e f_{fi} for menor ou igual a um, do contrário temos que o elemento de barra sob análise não resiste a configuração de solicitação combinada.

4. INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO (GUI) PARA *FIRESTEEL*

O acesso às tecnologias facilita a realização e desenvolvimento das atividades existentes nas mais diversas áreas. Segundo Rocha e Baranauskas (2003), as tecnologias se disseminam rapidamente entre os indivíduos devido ao desenvolvimento de sistemas computacionais, interfaces e aplicativos que trazem maior acessibilidade. Assim, denota-se a utilidade de uma interface interativa às aplicações computacionais, facilitando a interação homem-máquina e trazendo uma melhor experiência ao usuário.

Para o desenvolvimento da interface gráfica da aplicação *FireSteel*, buscou-se elaborar um *framework* intuitivo e que facilitasse ao usuário a caracterização do problema de interesse e sua simulação. Para tal, foi definido o uso da ferramenta Qt Designer 5 (Figura 19), a qual se trata um empacotador da linguagem *Python* para a biblioteca PyQt5 (PYQT, 2020) que facilita o desenvolvimento de uma GUI de maneira visual, intuitiva e sem edição direta por código.

Figura 19: Tela principal do software Qt Designer 5.



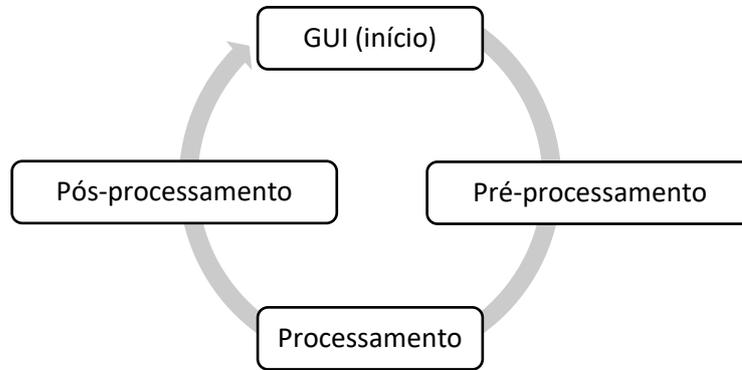
Fonte: Autor, 2023.

4.1. Arquitetura da aplicação *FireSteel*

A organização de dados, módulos e funções de uma aplicação em uma ordem lógica é conhecida como arquitetura da aplicação, tendo como responsabilidade principal ajudar no desenvolvimento e na manutenção do código. Para tal, a aplicação é subdividida em 4 módulos,

todos desenvolvidos na linguagem *Python*: GUI, Pré-processador, Processador e Pós-processador, como apresentado na Figura 20.

Figura 20: Fluxograma da arquitetura da aplicação.



Fonte: Autor, 2023.

A GUI define toda a lógica da interface do usuário e gerencia todos os outros módulos da aplicação, possibilitando a troca de dados e a comunicação entre estes de acordo com as solicitações do usuário.

O Pré-processamento é responsável pelo armazenamento de dados inseridos na aba “Modelos e Dados” (ver Figura 21), para determinar os elementos estruturais a serem verificados e armazenar as suas propriedades de interesse, bem como a entrada de esforços solicitantes, o qual não é determinado na aplicação segundo as normativas e deve ser fornecido pelo usuário, e as propriedades do modelo de incêndio a ser simulado.

Por sua vez, o Processamento consiste em realizar a simulação do incêndio e obter para os esforços de resistentes dos elementos estruturais de aço. Para tal, o Processamento consiste em duas rotinas: *ThermalEvolution.py* e *ResistantForces.py*, no qual a primeira rotina coleta os dados do incêndio e dos modelos (elementos de aço e suas respectivas proteção contra fogo, caso aplicada), para fornecer o histórico de temperatura de cada elemento estrutural de aço. Por sua vez, a rotina *ResistantForces.py* recebe os históricos de temperatura da rotina *ThermalEvolution.py* e seus respectivos modelos para avaliar, a cada instante de evolução térmica, a nova capacidade resistente do elemento estrutural de aço em situação de incêndio.

Após a simulação do incêndio e a verificação dos seus esforços resistentes, o Pós-processamento gerencia tais resultados e os envia para a GUI, na aba “Verificação” (ver Figura 22), para uma exibição por resumos e gráficos da simulação.

4.2. Aspectos gráficos da GUI

A GUI desenvolvida consiste em duas abas, “Modelos e Dados” e “Simulação”. A primeira aba (ver Figura 21) permite a inserção e o gerenciamento de suas propriedades dos elementos estruturais, bem como definir esforços internos solicitantes (EIS) para a verificação em situação de incêndio e os dados para a modelagem do incêndio. A inserção destas informações ao armazenamento de dados da aplicação é realizada, respectivamente, pelos botões “Carregar modelo”, “Aplicar EIS a análise” e “Aplicar parâmetros a análise”, como mostrado na Figura 21.

Figura 21: Aba "Modelos e Dados" da aplicação *FireSteel*.

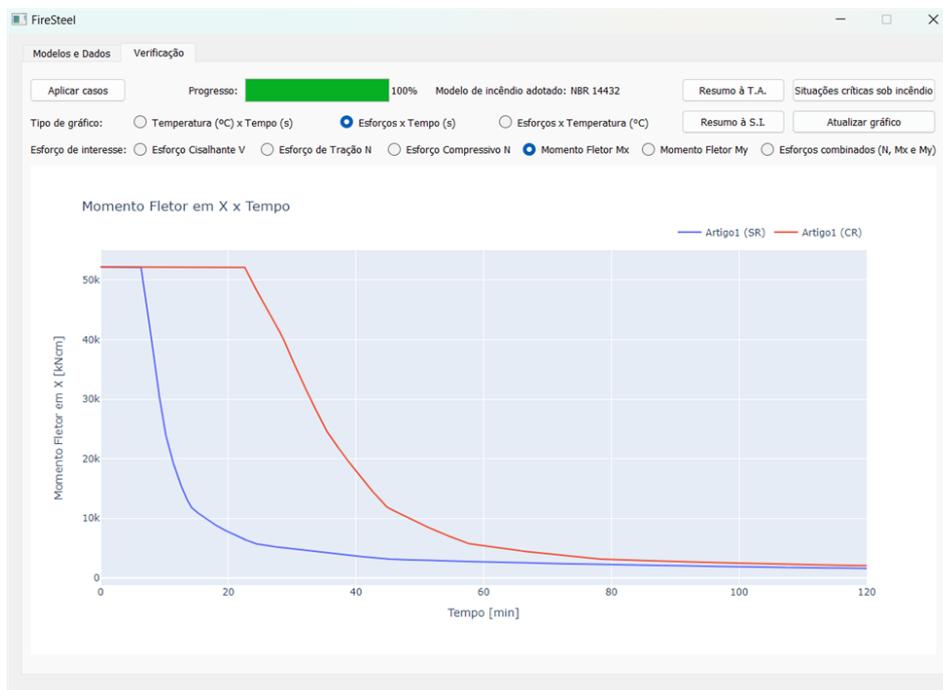
Fonte: Autor, 2023.

Na aba “Aplicar” (ver Figura 22), é possível realizar a aplicação da curva de incêndio-padrão para cada elemento no botão “Aplicar Casos”. Após a análise desses casos, a interface dispõe ao usuário os resultados para que as informações de interesse do usuário sejam obtidas, as quais são disponibilizadas ao operar os botões listados a seguir.

- Resumo à T.A.: resumo dos esforços resistentes à temperatura ambiente de cada elemento estrutural simulado;
- Resumo à S.I.: resumo dos esforços resistentes à situação de incêndio de cada elemento estrutural simulado para os TRRF padrões;

- Situações críticas sob incêndio: resume os esforços solicitantes, bem como a temperatura e o instante em que a resistência se iguala a cada solicitação, caracterizando a situação crítica, ou de colapso;
- Atualizar gráfico: dispõe ao usuário, no espaço de apresentação visual de dados (ver Figura 22), um gráfico representativo do comportamento que se deseja investigar, o qual é definido acima da área de gráfico pelo usuário.

Figura 22: Aba "Verificação" da aplicação *FireSteel*.



Fonte: Autor, 2023.

Como mostrado na região superior de GUI da aplicação *firesteel*, é possível visualizar três tipos de gráficos: “Temperatura x Tempo”, “Esforços x Tempo” e “Esforços x Temperatura”. A primeira opção apresenta a evolução térmica da temperatura dos gases e dos elementos submetidos ao incêndio, permitindo inclusive comparar o comportamento térmico de elementos diferentes e da influência da proteção contra fogo.

Por sua vez, as outras duas opções permitem verificar, respectivamente, os esforços resistentes de interesse em função do tempo (neste diferencia-se os elementos com e sem proteção) e em função da temperatura, considerando somente casos sem proteção contra fogo, visto que este componente apesar retarda a elevação da temperatura. Ressalta-se para analisar um certo esforço de interesse, basta definir o “Esforço de interesse” como “Esforço cisalhante V”, “Esforço de Tração N”, “Esforço de Compressão N”, “Momento Fletor Mx”, “Momento Fletor My” ou “Esforços Combinados (N, Mx e My)”.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar aplicação *FireSteel* uma revisão bibliográfica foi realizada em busca de exemplos de verificação de elementos de aço em situação de incêndio. Dentre os exemplos utilizados no estudo comparativo, foram considerados os casos presentes nas bibliografias:

- Caso 01: Pastorello (2020);
- Caso 02: Vieira *et al* (2016);
- Caso 03: Rodrigues e Oliveira (2015);
- Caso 04: Nascimento e Ferreira (2022);
- Caso 05: Martins (2000).

5.1.Caso 01: Pastorello (2020)

O caso 01 consiste na análise da evolução térmica de um elemento de viga metálica em seção transversal W 250 x 115 (H) – ver propriedades com e sem revestimento de gesso cartonado, cujas propriedades da proteção térmica são apresentadas na Tabela 3. Por sua vez, os resultados da temperatura em incêndio para um TRRF igual a 30 minutos, obtidos por Pastorello (2020) e *FireSteel*, são apresentados na Tabela 4, validando a resposta do sistema proposto em relação ao trabalho de referência.

Tabela 3: Propriedades do revestimento para o caso 01.

Propriedades	Grandezas
Massa específica (ρ_a)	800 kg/m ³
Condutividade Térmica (λ_a)	0,15 W/m °C
Calor Específico (c_a)	1200 J/kg °C
Espessura (t_m)	15 mm

Fonte: Pastorello, 2020.

Tabela 4: Resultados da evolução térmica com e sem proteção térmica de gesso acartonado.

Temperatura	Pastorello (2020)	<i>FireSteel</i>
Inicial	20,00 °C	20,00 °C
Final sem revestimento	804,98 °C	804,98 °C
Final com revestimento	154,82 °C	154,83 °C

Fonte: Pastorello, 2020.

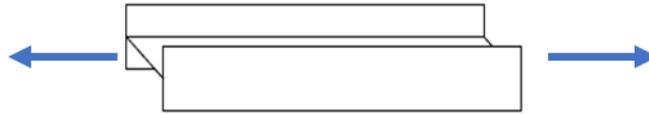
Assim, verifica-se que o módulo de evolução térmica demonstra grande representatividade.

5.2.Caso 02: Vieira *et al.* (2016)

Neste caso, o exemplo apresentado por Vieira *et al.* (2016) consiste em um elemento de barra em aço de seção transversal W 150 x 31,7, na qual sua resistência à tração (ver Figura 23)

deve ser determinada para uma temperatura de 799,18 °C. Os resultados obtidos por Vieira *et al.* (2016) e *FireSteel* são apresentados na Tabela 5.

Figura 23: Exemplo de elemento de aço submetido à tração.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5: Esforços resistentes à tração para o caso apresentado por Vieira *et al.* (2016).

x	Vieira <i>et al.</i> (2016)	<i>FireSteel</i>
Esforço resistente à tração	161,325 kN	161,306 kN

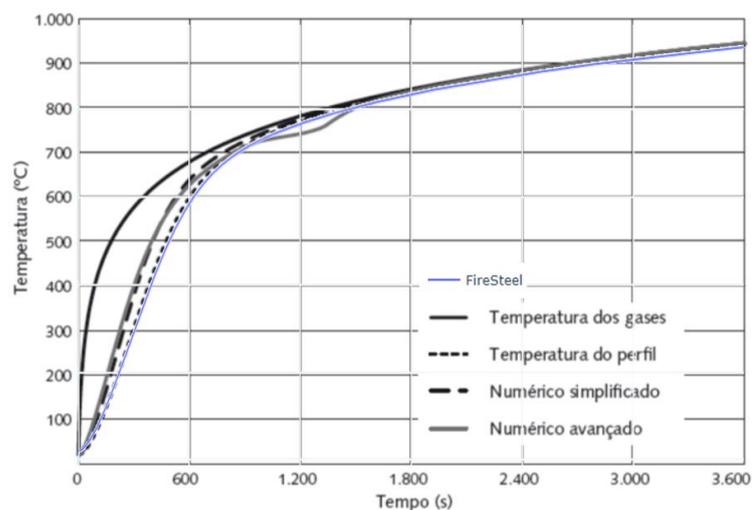
Fonte: Pastorello, 2020.

Observando os dados da Tabela 5, denota-se que o módulo para verificação do esforço resistente de tração apresentou resultados dentro do esperado.

5.3.Caso 03: Rodrigues e Oliveira (2015)

Rodrigues e Oliveira (2015) propõem um problema relacionado à um pilar rotulado com comprimento de 2,80 metros, de seção transversal W 310x38,7, o qual deve ser exposto à curva de incêndio-padrão da ABNT NBR 14432:2000 por 60 minutos, com todas as faces expostas. Os resultados de referência são confrontados com os resultados da aplicação *FireSteel* e apresentados na Figura 24.

Figura 24: Simulação da Evolução da temperatura do perfil de aço W 310x38,7.



Fonte: adaptado de Rodrigues e Oliveira, 2015.

Rodrigues e Oliveira realizaram a simulação do incêndio de forma manual (Temperatura do perfil) em um *software* de análise via Método dos Elementos Finitos (MEF), considerando as propriedades térmicas constantes (Numérico simplificado) e variáveis em função da temperatura (Numérico avançado). Observa-se que a curva da elevação da temperatura do perfil obtida por *FireSteel* possui grande aderência à curva “Temperatura do perfil”, a qual se trata do mesmo modelo de elevação térmica, enquanto apresenta boa representatividade para os demais modelos, até mesmo ao caso de propriedades variáveis em “Numérico avançado”.

Além disso, Rodrigues e Oliveira apresentam o esforço resistente à compressão do pilar (ver Figura 25) em perfil W 310x38,7 para a temperatura de 500°C, baseado no Método Analítico Simplificado. Desse modo, dispõe-se os dados do problema na Tabela 6.

Figura 25: Elemento de aço submetido à compressão (pilar).



Fonte: Autor, 2023.

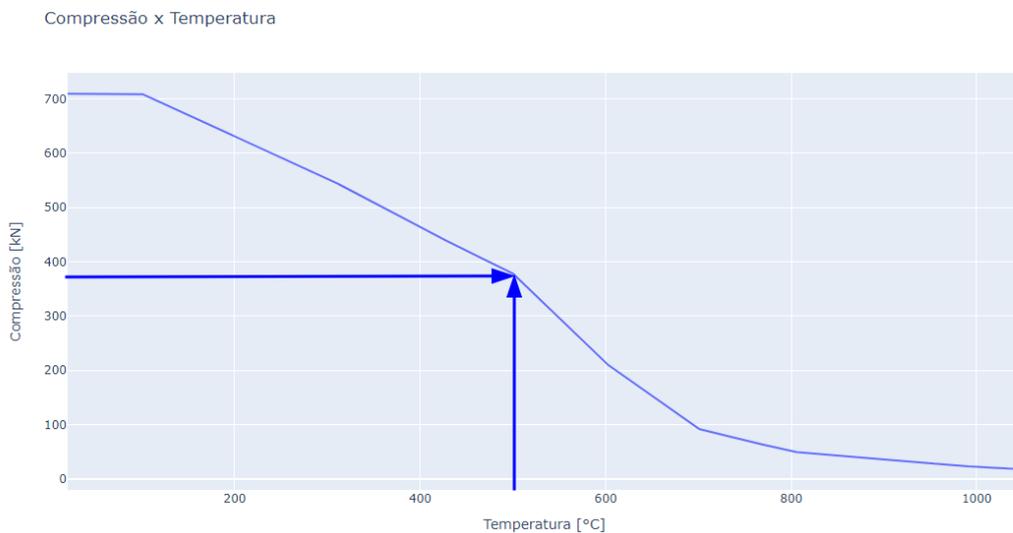
Tabela 6: Dados para a verificação do esforço resistente à compressão para o Pilar em seção transversal W310x38,7 à temperatura de 500°C.

Propriedades	Grandezas
Módulo de Elasticidade (E)	20.000 kN/cm ²
Resistência ao escoamento (f_y)	34,5 kN/cm ²
Temperatura (θ_a)	500 °C
Raio de giração do Eixo X (r_x)	13,14 cm
Raio de giração do Eixo Y (r_y)	3,82
Momento de inércia do Eixo X (I_x)	5581 cm ⁴
Momento de inércia do Eixo Y (I_y)	727 cm ⁴
Momento de inércia para torção (I_t)	13,2 cm ⁴

Fonte: Rodrigues e Oliveira, 2015.

Os resultados da aplicação *FireSteel* demonstram que, à temperatura de 500°C, o pilar em questão possui esforço resistente à compressão de 378,34 kN, enquanto Rodrigues e Oliveira (2015) apresentam que o mesmo pilar possui resistência à compressão de 378,60 kN. Ademais, *FireSteel* disponibilizou um gráfico do esforço resistente à compressão em situação de incêndio *versus* temperatura do pilar, demarcando a degradação do esforço resistente do pilar desde o início do *flashover* até 120 minutos do início do incêndio.

Figura 26: Gráfico Esforço resistente de Compressão x Temperatura do Pilar W 310x38,7.

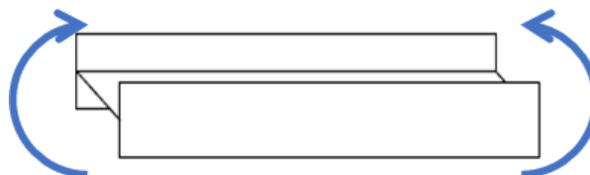


Fonte: Autor, 2023.

5.4.Caso 04: Nascimento e Ferreira (2022)

Para este caso, Nascimento e Ferreira (2022) realizam a análise térmica de uma viga em perfil VS 250x21 submetida à flexão (ver Figura 27), com e sem proteção térmica, em situação de incêndio para um TRRF de 60 minutos. As propriedades do elemento estrutural, de sua proteção térmica e os dados iniciais do incêndio são apresentados na Tabela 7.

Figura 27: Exemplo de elemento de aço submetido à flexão (viga).



Fonte: Autor.

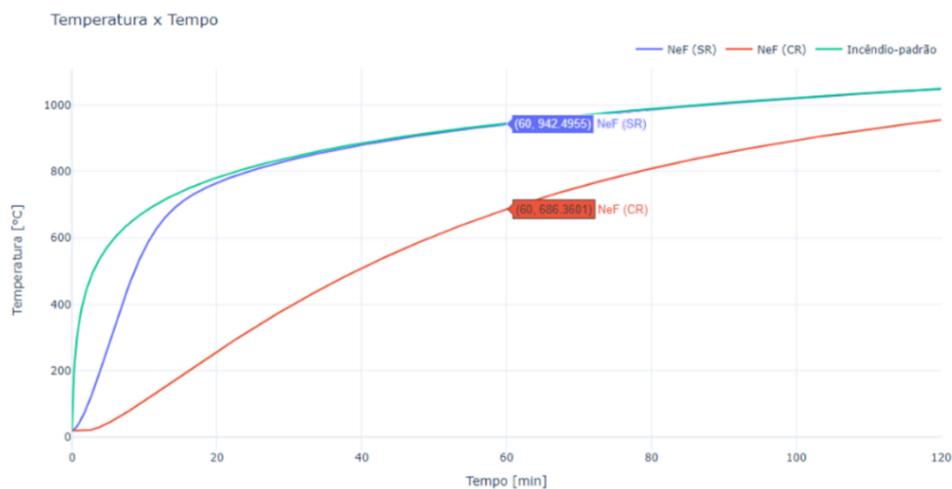
Tabela 7: Dados para o caso Nascimento e Ferreira.

Propriedades	Grandezas
Módulo de Elasticidade (E)	20.000 kN/cm ²
Resistência ao escoamento (f_y)	34,5 kN/cm ²
Massa específica do aço (ρ_a)	7850 kg/m ³
Calor específico do aço (c_a)	600 J/kg°C
Temperatura inicial do ambiente e perfis	20 °C
Vão da viga (L)	200 cm
Fator de massividade (F)	322,159 m ⁻¹
Fator de sombreamento (k_{sh})	0,656
Espessura do revestimento (t_m)	0,02 m
Condutividade do revestimento (λ_m)	0,173 Wm/°C
Calor específico do revestimento (c_m)	2344 J/kg°C
Massa específica do revestimento (ρ_m)	240 kg/m ³

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados de Nascimento e Ferreira (2022) apresentam as temperaturas da viga sem e com revestimento para um TRRF de 60 minutos como $\theta_{a,1} = 942,496$ °C e $\theta_{a,2} = 686,36$ °C, respectivamente. Para a análise da evolução térmica, a aplicação *FireSteel* obteve resultados bastante representativos, sendo as temperaturas, em TRRF de 60 minutos, para as situações sem e com revestimento iguais a 942,4955 °C e 686,3601 °C, respectivamente. Na (Figura 28) apresentam-se o gráfico da evolução térmico da viga sem (SR) e com revestimento (CR) disponibilizado em *FireSteel*.

Figura 28: Gráfico Temperatura x Tempo da viga VS 250x21.



Fonte: Autor, 2023.

Em seguida, as verificações de momento fletor resistente foram realizadas por Nascimento e Ferreira (2022). Ressalta-se que a viga foi travada continuamente na laje, o que isenta a peça de verificação de FLT, e uma de suas mesas está em contato com a laje (ver Figura

17), o que permite definir o fator κ igual a 1,4 e 1,15 para as análises sem e com revestimento, respectivamente. Os resultados de Nascimento e Ferreira (2022) são apresentados e comparados juntamente aos resultados de *FireSteel* na Tabela 8.

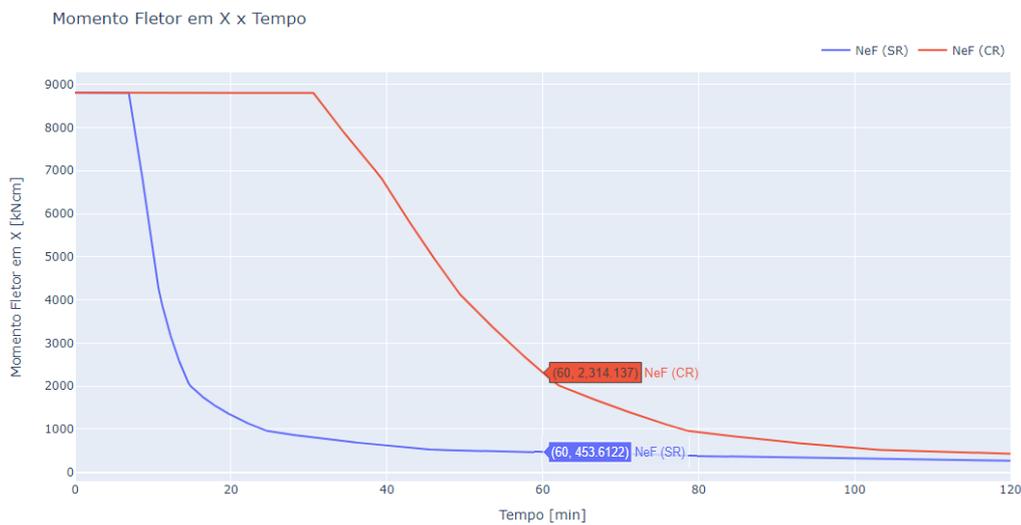
Tabela 8: Resultados das verificações a flexão para o caso Nascimento e Ferreira (2022).

Viga VS 250x21	Nascimento e Ferreira (2022)	<i>FireSteel</i>
Sem revestimento	6,24 kNm	6,2436 kNm
Com revestimento	23,16 kNm	23,1414 kNm

Fonte: Autor, 2023.

A seguir, a aplicação *FireSteel* dispõe do histórico do esforço resistente em função do incêndio (Figura 29).

Figura 29: Gráfico Momento Fletor no eixo -X x Tempo da viga VS 250x21.

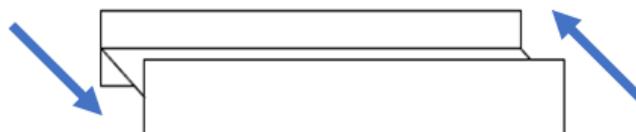


Fonte: Autor, 2023.

5.5.Caso 05: Martins (2000)

Por fim, estuda-se o caso de Martins (2000) para fazer uma verificação de uma viga ao cisalhamento (ver Figura 30). Este caso é verificado pelo autor com base na ABNT NBR 14323:1999 (normativa desatualizada, estando vigente a ABNT NBR 14323:2013), entretanto não há diferenças consideráveis entre as versões da normativa.

Figura 30: Exemplo de elemento de aço submetido ao cisalhamento (viga).



Fonte: Autor, 2023.

Este caso estudado trata de uma viga de perfil VS 650x114 que alcança uma temperatura de 332°C em situação de incêndio. Por essa viga estar travada na laje e não possuir material de proteção térmica, é possível considerar o fator κ igual a 1,40. Conforme o perfil e o fator κ , obtêm-se os esforços resistente ao cisalhamento do caso de estudo.

Tabela 9: **Resultados das verificações a flexão para o caso Martins (2000).**

-	Martins (2000)	<i>FireSteel</i>
Viga VS 650x114	837,72 kN	837,7263 kN

Fonte: Autor (2023).

Observa-se aqui a precisão da aplicação desenvolvida para as análises de resistência ao cisalhamento em situação de incêndio.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma aplicação computacional para a verificação de elementos estruturais de aço, de seção I ou H, em situação de incêndio, disponibilizando a mesma dentro de uma interface gráfica do usuário (GUI).

Foram utilizados modelos de incêndio-padrão para a elevação térmica de elementos de aço, bem como o modelo analítico simplificado para determinação dos esforços resistentes destes elementos estruturais de barra, para situações com e sem o uso de proteção contra fogo. Os resultados obtidos demonstraram grande aderência em relação aos resultados da literatura, os quais também se baseiam, em sua maior parte, nas normativas brasileiras.

A ferramenta foi desenvolvida em rotinas de linguagem de programação *Python* e, a fim de trazer uma interação mais dinâmica a projetistas e usuários, esses módulos foram integrados dentro de uma interface gráfica do usuário (GUI), também desenvolvida em linguagem *Python*. Por meio dessa, a inserção de dados dos casos de estudo, a realização das análises térmicas, verificações de capacidades resistentes e análise de resultados são realizadas em uma única interface, tornando o processo de estudo de elementos de aço em situação de incêndio simplificado, além de dispor relatórios de resistência e o comportamento térmico dos elementos de aço em formato gráfico, como era de interesse do autor.

Diante dos resultados obtidos em relação aos exemplos disponíveis na literatura técnica, conclui-se que a aplicação é representativa para simular a situação de incêndio e determinar as resistências à tração, compressão, flexão e cisalhamento para elementos estruturais retilíneos de aço em seção I ou H, dispondo de um ambiente computacional de fácil utilização para análises gráficas e numéricas do comportamento de estruturas de aço em situação de incêndio, facilitando a compreensão do fenômeno estudado e auxiliando a realização de verificações estruturais em situação de incêndio.

Ademais, os estudos realizados e a aplicação desenvolvida podem ser estendidos visando abordar a variação de parâmetros físicos na análise da evolução térmica e comparar seus resultados com modelos via Método dos Elementos Finitos e estudos experimentais. Além disso, a metodologia de verificação em situação de incêndio pode ser acoplada à análise matricial de estruturas, avaliando os efeitos dos incêndios em elementos estruturais de um compartimento e sua interação com os elementos adjacentes, propiciando uma análise global da estrutura durante a ocorrência de incêndios em quaisquer compartimentos de uma edificação.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. M. P., FAKURY, R. H. Elevação de Temperatura em Elementos Estruturais de Aço de Edifícios em Incêndio. **VII Semana de Iniciação Científica da UFMG**, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **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. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

Conheça a biblioteca de Alexandria: uma das mais importantes do mundo. **Biblioteca Benedicto Monteiro**, 2020. Disponível em: <https://www.biblio.campusananindeua.ufpa.br/index.php/ultimas-noticias/573-conheca-a-biblioteca-de-alexandria>. Acesso em: 27 set. 2023.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese de Doutorado em Engenharia das Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 3: Design of steel structures - Part 1-2: Structural fire design**. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZACION. **EUROCODE 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire**. Brussels, 2002.

FAKURY, R. F. Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio. **II Seminário Internacional: O uso de estruturas metálicas na construção civil**, 1999.

Incêndio e desabamento do prédio no Largo do Paissandu completa um ano: veja o que se sabe sobre o caso. **G1 SP**, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao->

paulo/noticia/2019/05/01/incendio-e-desabamento-do-predio-no-largo-do-paissandu-completa-um-ano-veja-o-que-se-sabe-sobre-o-caso.ghtml. Acesso em: 27 set. 2023.

JIMÉNEZ, C. Da desocupação ao desabamento, 17 anos de abandono do edifício que virou escombros. **EL PAÍS**, 2018. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2018/05/01/politica/1525203859_345442.html. Acesso em: 27 set. 2023.

KIMURA, E. F. A. **Análise termo estrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, Brasil, 2009.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de Federal de Minas Gerais, 2000.

MELHADO, S. B. **Edifícios de Estruturas de Aço: Segurança Contra Incêndio e Critérios de Proteção de Estruturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

NASCIMETO, K. O.; FERREIRA, W. G. **Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio: Abordagens conceitual e normativa (com exemplos numéricos)**. Vitória: LBF, 2021.

O que a humanidade perdeu no incêndio da Biblioteca de Alexandria. **HIPERCULTURA**. Disponível em: <https://www.hipercultura.com/biblioteca-de-alexandria-historia-incendio>. Acesso em: 27 set. 2023.

PASTORELLO, A. P. **Desempenho de estruturas de aço, em situação de incêndio, com diferentes proteções passivas**. Monografia em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, 2020.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. Ed. 6. Rio de Janeiro: LTC editora, 2009.

PYQT. **PyQt: Reference Guide**, 2020. Disponível em: <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5>.

RICARDO, A. S. **Confiabilidade de elementos e sistemas estruturais metálicos em situação de incêndio utilizando redes neurais artificiais adaptativas**. Tese (Doutorado) - Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2022.

ROCHA, H. V.; BARANAUSKAS, M. C. C. **Design e avaliação de interfaces humano-computador**. Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, cap. 1. Campinas, 2003.

RODRIGUES, J. P. C.; OLIVEIRA, R. L. G. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio**: segundo as Normas Brasileiras. Ed. 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

SANTOS, L. B. **Modelagem do Incêndio**. 5p. Maceió, 2022. Notas de Aula.

SANTOS, L. B. **Elementos Fletidos**. 30p. Maceió, 2020. Notas de Aula.

SILVA, V. P. *et al.* **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997. 170p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo – SP, 1997.

SILVA, V. P., FAKURY, R. H. Brazilian standards for steel structures fire design. **Fire Safety Journal**. n.37, p. 217–227, 2002.

SOUSA, D. A.; SILVA, G. P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. Monografia em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2015.

SOUZA JÚNIOR, V. **Análise de Pórticos de Aço sob Altas Temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 1998.

SOUTO, N. A. O. **Aplicação de confiabilidade ao estudo de elementos de aço comprimidos em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2015.

VIEIRA, L.L.; SANTOS, J. C.; MENDES, B. G.; BEZERRA, L. M.; SILVA, R. S. Y. R. C. Análise da resistência dos elementos de aço em situação de incêndio: Um estudo comparativo entre a norma ABNT NBR 14323:2013 e sua versão de 1999. **XLIII Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia**, 2016.

ANEXO A

Este anexo refere-se as informações necessárias para determinar o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) segundo a ABNT NBR 14432:2000 pelo método tabular. Para tal, utiliza-se as Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10: 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

Fonte: ABNT 14432:2000.

Tabela 11: Classificação das edificações quanto à sua ocupação (parte 01).

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	Amarinhos, 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	Educativa 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	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos 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 rododferroviárias, 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

Fonte: ABNT 14432:2000.

Tabela 12: Classificação das edificações quanto à sua ocupação (parte 02).

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, pronto-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

Fonte: ABNT 14432:2000.

ANEXO B

Este anexo refere-se metodologia de determinação do $TRRF_R$ via Método do Tempo Equivalente (MTE). Segundo Silva (2019), o MTE é um método que funciona como um redutor de TRRF, determinado previamente pelo método tabular (ver ANEXO A).

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo é obtido pelo MTE pela Equação (50).

$$TRRF_R = \begin{cases} TRRF - 30, & \text{se } t_e \leq TRRF - 30 \\ t_e, & \text{se } TRRF - 30 < t_e \leq TRRF \\ TRRF, & \text{se } t_e > TRRF \end{cases} \quad (50)$$

Ressalta-se que $TRRF_R$ deve ser maior do que 15 minutos. Por sua vez, o tempo equivalente t_e , presente na Equação (50), é obtido por

$$t_e = 0,07q_{fi}\gamma_s\gamma_nW, \quad (51)$$

na qual:

q_{fi} é o valor da carga de incêndio específica do compartimento analisado, em MJ/m², determinado conforme ABNT NBR 14432:2000;

γ_s é um fator de ponderação determinado por $\gamma_s = \gamma_{s,1}\gamma_{s,2}$, conforme equação apresentada a seguir e Tabela 13;

$$\gamma_{s,1} = 1 + \frac{A_f(h + 3)}{10^5} \quad (52)$$

$$1 \leq \gamma_{s,1} \leq 3$$

Tabela 13: Valores de $\gamma_{s,2}$ em função do risco de ativação do incêndio (r).

$\gamma_{s,2}$	r	Exemplos de ocupação
0,85	Pequena	Escola, galeria de arte, parque aquático, igreja, museu
1,00	Normal	Biblioteca, cinema, correio, consultório médico, escritório, farmácia, frigorífico, hotel, livraria, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, supermercado, teatro, depósitos (produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas, venda de acessórios de automóveis) e depósitos em geral
1,20	Média	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica
1,50	Alta	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis

Fonte: ABNT 14432:2000.

Na Equação (52), temos que A_f é a área de piso do compartimento, em metros quadrados, e h é a altura do piso habitável mais elevado da edificação, em metros;

γ_n é um fator de ponderação determinado por $\gamma_n = \gamma_{n,1}\gamma_{n,2}\gamma_{n,3}$, conforme Tabela 14.

Tabela 14: **Fatores de ponderação das medidas de segurança contra incêndio.**

Valores de $\gamma_{n,1}$, $\gamma_{n,2}$ e $\gamma_{n,3}$		
Exigências de chuveiros automáticos ($\gamma_{n,1}$)	Brigada contra incêndio ($\gamma_{n,2}$)	Exigência de detecção automática ($\gamma_{n,3}$)
0,60	0,90	0,90

Fonte: ABNT 14432:2000.

Na ausência de algum meio de proteção, indicado na Tabela 14, adotar $\gamma_{n,i}$ n igual a 1;

W é um fator que considera a influência da ventilação e da altura do compartimento, conforme a equação apresentada a seguir, em que A_v é a área de ventilação vertical para o ambiente externo do compartimento, admitindo-se que os vidros das janelas se quebrarão em incêndio, A_f é a área do piso do compartimento e H é a altura do compartimento (distância do piso ao teto), em metros.

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3} \left[0,62 + 90 \left(0,4 - \frac{A_v}{A_f}\right)^4\right] \geq 0,5, \text{ se } \frac{A_v}{A_f} \leq 0,30 \quad (53)$$

Para $A_v/A_f > 0,30$, deve ser adotado $A_v/A_f = 0,30$. Em qualquer caso, $A_v/A_f > 0,025$.

Além disso, deve ser observado que $q_{fi}\gamma_s\gamma_n$ deve ser maior ou igual que 300 MJ/m².