



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

PEDRO AUGUSTO OLIVEIRA DE CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURA METÁLICA EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO: Curva ISO 834 x Curvas Paramétricas**

**PALMAS – TO
2018/1**

PEDRO AUGUSTO OLIVEIRA DE CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURA METÁLICA EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO: Curva ISO 834 x Curvas Paramétricas**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no curso
superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Thiago D. de Araújo
Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos André Soares
Couto

**PALMAS – TO
2018/1**

Carvalho, Pedro Augusto Oliveira de

Análise comparativa de estrutura metálica em situação de incêndio:
curva iso 834 x curvas paramétricas /Pedro augusto Oliveira de
Carvalho. – Palmas, ano 2018.

49 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação
em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do
Tocantins, Campus Palmas, 2018.

Orientador(a): Prof. Thiago Dias de Araújo e Silva

1. Aço 2. Incêndio I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Augusto Oliveira de Carvalho

Análise comparativa de estrutura metálica em situação de incêndio: curva ISO
834 x curvas paramétricas

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Coordenação do curso de Engenharia Civil
do Instituto Federal do Tocantins, *Campus*
Palmas, como exigência à obtenção do grau
de Engenheiro Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva (Orientador)
IFTO – *Campus* Palmas

Prof. Dr. Moacyr Salles Neto
Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Gilson Marafiga Pedroso
IFTO – *Campus* Palmas

Prof. Esp. José Silvério de Oliveira Junior
IFTO – *Campus* Palmas

À minha família: meus pais João e Iolanda,
minha esposa Luana e meu filho Heitor.

AGRADECIMENTOS

A DEUS que iluminou o meu caminho durante toda esta caminhada, o que seria de mim sem a fé que tenho NELE.

Aos meus pais, João e Iolanda que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao meu irmão Luís Gustavo, por sempre estar ao meu lado, parceiro dos de muitos trabalhos, que com sua sabedoria também contribuiu para que esse sonho fosse realizado.

A minha esposa Luana, pessoa com quem amo partilhar a vida. Obrigada pelo amor, carinho, paciência, companheirismo, motivação e por sempre me apoiar nos momentos difíceis.

Ao meu filho Heitor, que chegou já no finzinho desta longa caminhada, porém dando ainda mais sentido e motivação à esta conquista.

Aos meus amigos Ricardo Allen, Rodrigo Chianca e Robson Sousa pelo apoio, companheirismo e incentivos constantes durante toda a caminhada.

Ao meu orientador, Thiago Dias de Araújo e Silva, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Obrigada pelo convívio, apoio, compreensão e amizade.

Ao meu co-orientador Carlos André Soares Couto, que mesmo distante fisicamente forneceu todo suporte em sua orientação, agradeço pelos ensinamentos passados.

Aos colegas do Hospital Geral de Palmas, Genivaldo e Joselma, pela colaboração, paciência e coleguismo em tantas situações. Na dupla jornada vivida até aqui vocês foram de fundamental importância por essa conquista.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”
(Aldo Novak)

RESUMO

Carvalho, P.A.O. Análise comparativa de estrutura metálica em situação de incêndio: curva ISO 834 x curvas paramétricas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2018.

O incêndio é um fenômeno preocupante, principalmente para estruturas metálicas, sendo necessária a análise da estabilidade frente sua ocorrência. As normas vigentes induzem a uma verificação prescritiva das estruturas em situação de incêndio e o mercado estimula o uso simplificado, por meio de tabelas pré-definidas, o que induz um dimensionamento conservador da proteção. Portanto, objetivou-se com este estudo, realizar uma análise comparativa entre diferentes métodos de cálculo em situação de incêndio. Diante do exposto, o presente estudo realizou a verificação do dimensionamento de uma edificação em estrutura metálica submetida a uma situação de incêndio, utilizando as formulações simplificadas da ABNT NBR 14323:2013 e com métodos avançados de engenharia MEF (Método dos Elementos Finitos), baseados nas curvas de incêndio padrão ISO 834 e incêndio natural. Além disso, realizou-se um dimensionamento da espessura de proteção passiva com auxílio de cartas de cobertura. Vencida estas etapas, pode-se realizar a comparação dos custos de proteção para cada método analisado.

Palavras-chave: Incêndio. Estrutura. Aço. Estabilidade. Proteção.

ABSTRACT

Carvalho, P.A.O. Comparative analysis of metallic structure in fire situation: ISO 834 curve x parametric curves. 2017. Course Completion Work - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2018.

The fire is a worrisome phenomenon, mainly for metallic structures, being necessary the analysis of the stability of its occurrence. The current regulations induce a prescriptive verification of structures in a fire situation and the market encourages simplified use, through pre-defined tables, which induces a conservative design of the protection. Therefore, the objective of this study was to perform a comparative analysis between the different calculation methods in a fire situation. Considering the above, the present study carried out the verification of the dimensioning of a structure in a metallic structure submitted to a fire situation, using the simplified formulations of ABNT NBR 14323: 2013 and with advanced MEF (Finite Element Method) engineering methods in standard fire curves ISO 834 and natural fire. In addition, a dimensioning of the passive protection thickness was carried out using cover letters. Once these steps have been completed, the protection costs can be compared for each method analyzed.

Keywords: Fire. Structure. Stability. Protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1– CURVA TEMPERATURA-TEMPO PARA INCÊNDIO PADRÃO (ISO 834)	16
FIGURA 2 – CURVA TEMPERATURA-TEMPO PARA INCÊNDIO PADRÃO NATURAL	16
FIGURA 3 – COMPRIMENTO DE FLAMBAGEM EM PILARES DE PÓRTICOS CONTRAVENTADOS .	22
FIGURA 4 – MODELO 3D ESTRUTURAL DA EDIFICAÇÃO.....	26
FIGURA 5 – PLANTA BAIXA PRIMEIRO PAVIMENTO	26
FIGURA 6 – PLANTA BAIXA COBERTURA.....	26
FIGURA 7– MODELO PÓRTICOS 01, 02 E 03.....	27
FIGURA 8 – MODELO PÓRTICOS 04 E 05.....	27
FIGURA 9 – FACHADA FRONTAL DA EDIFICAÇÃO	27
FIGURA 10 – DISCRETIZAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS ELEMENTOS FINITOS	29
FIGURA 11 – EXPOSIÇÃO DAS SEÇÕES AO INCÊNDIO	32
FIGURA 12 – GRÁFICOS DAS CURVAS DE INCÊNDIO PARA MÉTODO SIMPLIFICADO	36
FIGURA 13 – ESQUEMA DO MODELO DE INCÊNDIO LOCALIZADO DE HESKESTAD	39
FIGURA 14 – GRÁFICO DA CURVA DE INCÊNDIO LOCALIZADO CONFORME ELEFIR-EN.....	40
FIGURA 15 – CARTA DE COBERTURA PARA PLACAS DE GESSO (550°C).....	41
FIGURA 16 – MODELO DE PROTEÇÃO DO PERFIL.....	42
FIGURA 17 – COMPOSIÇÃO DE CUSTO BÁSICO UNITÁRIO PARA PLACA DE GESSO RESISTENTE AO FOGO (R\$/M).....	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FATORES DE REDUÇÃO PARA A RELAÇÃO TENSÕES-DEFORMAÇÕES DO AÇO CARBONO A TEMPERATURAS ELEVADAS.	19
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS PÓRTICOS.	27
TABELA 3 – AÇÕES NA ESTRUTURA.....	28
TABELA 4 – RESUMO DOS MODELOS ANALISADOS.	30
TABELA 5 - RESUMO DOS PERFIS DIMENSIONADOS.....	31
TABELA 6 – TEMPERATURA CRÍTICA E TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DOS PÓRTICOS/VIGAS PARA MÉTODO SIMPLIFICADO UTILIZANDO CURVA ISO-834.....	32
TABELA 7 – TEMPERATURA CRÍTICA E TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DOS PÓRTICOS/VIGAS PARA MÉTODO AVANÇADO UTILIZANDO CURVA ISO-834.	34
TABELA 8 – TEMPERATURA CRÍTICA (Θ_{CRI}), MÁXIMA ($\Theta_{MÁX}$) E TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (COLAPSO) MÉTODO SIMPLIFICADO UTILIZANDO CURVA DE INCÊNDIO NATURAL..	35
TABELA 9 – TEMPERATURA CRÍTICA, MÁXIMA E TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO PARA MÉTODO AVANÇADO UTILIZANDO CURVA DE INCÊNDIO NATURAL.....	38
TABELA 10 – ESPESSURA DA PROTEÇÃO CONFORME RECOMENDAÇÃO DO FABRICANTE.	41
TABELA 11 – ESPESSURA MÍNIMA DA PLACA DE GESSO RESISTENTE AO FOGO CALCULADA.	42
TABELA 12 – CUSTO DA PROTEÇÃO CONFORME MÉTODO DE CÁLCULO PARA PLACA DE GESSO RESISTENTE AO FOGO DE 15 MM.	44

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
3.	JUSTIFICATIVA.....	13
4.	OBJETIVOS.....	13
4.1.	Objetivo Geral	13
4.2.	Objetivos Específicos.....	13
5.	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
5.1.	Análise Térmica	14
5.1.1.	Curva Incêndio Padrão – ISO 834	15
5.1.2.	Curva Incêndio Natural	16
5.2.	Análise Mecânica.....	18
5.3.	Métodos de Cálculo	20
5.3.1.	Método Simplificado de Dimensionamento	20
5.3.2.	Métodos Avançados de Dimensionamento	25
6.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
8.	CONCLUSÕES.....	46
9.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
10.	REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O incêndio é um dos fenômenos mais preocupantes da humanidade e, quando não controlado em tempo hábil pode ser extremamente perigoso à vida e as estruturas. No campo da engenharia de estruturas, as medidas de combate e protetivas contra incêndio vêm evoluindo nos últimos anos. Contudo, os procedimentos consagrados e regulamentados em códigos normativos voltados à segurança baseiam-se em uma metodologia prescritiva.

Segundo Wang (2002, p. 1), a validade dos métodos prescritivos pode ser questionada e, um novo entendimento que busca projetos mais econômicos baseado no desempenho das estruturas metálicas, vem sendo introduzido nos últimos anos.

Importantes pesquisas experimentais, numéricas e analíticas realizadas nos últimos anos sobre comportamento de estruturas metálicas em situações de incêndio possibilitaram o desenvolvimento tanto nas avaliações de segurança estrutural quanto desempenho de edifícios sob a ação do fogo. Somam-se melhorias nos materiais, avanços nos métodos de cálculo e softwares para cálculo de métodos avançados. Para Vila Real (2003, p. 1), os edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que permita a evacuação dos seus ocupantes e a segurança das equipes de intervenção durante um período de tempo considerado adequado.

É factível afirmar que o aço para a construção civil apresenta melhores características em relação ao concreto armado, sendo destacada uma boa relação resistência/peso, melhor resistência aos sismos devido à sua maior ductilidade, uma construção mais rápida e mais precisa, ser um material quase cem por cento reciclável, ter fundações mais econômicas devido ao seu menor peso e permitir vencer maiores vãos. Em contrapartida, apresenta características de resistência a altas temperaturas muito inferiores a outros materiais (MESQUITA, 2013, p.5).

O aumento da temperatura nos elementos estruturais, seja concreto ou aço, causa modificações nas suas estruturas internas com consequente redução da resistência mecânica, redução da rigidez e o aparecimento de esforços solicitantes adicionais na estrutura (SILVA, 2001, p. 29).

No Estado do Tocantins, o Poder Executivo instituiu por meio do Decreto 3.950 de 25 de janeiro de 2010 as Normas Técnicas de Competência do Corpo de Bombeiros Militar Estadual (CBMTO). Entre estas, cito a Norma Técnica Número 6 (NT 6) e Norma Técnica Número 9 (NT 9), que tratam respectivamente, da segurança

estrutural das edificações e da carga de incêndio das edificações e áreas de risco. Ainda neste contexto, a ABNT NBR 14323:2013 estipula critérios gerais para o dimensionamento em situação de incêndio das estruturas de aço e das estruturas mistas aço-concreto de edifícios. Esta norma prevê que o dimensionamento de uma estrutura em situação de incêndio pode ser feito a partir de duas concepções: ensaios padronizados ou métodos analíticos, sendo este último simplificado ou avançado.

O método simplificado preconizado pela norma supracitada prevê uma verificação a partir de elementos individuais, aplicado às barras prismáticas de aço constituídas por perfis laminados soldados não híbridos, às vigas, pilares e lajes mistas. Os métodos avançados de dimensionamento, segundo ABNT NBR 14323:2013, são os que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio, podendo ser utilizado para qualquer tipo de estrutura. Além disso, baseiam-se no comportamento físico do material, levando a uma aproximação confiável do comportamento da estrutura em situação de incêndio.

Apesar dos avanços das regulamentações de segurança em situação de incêndio, ainda é possível encontrar algumas lacunas nos regulamentos nacionais e internacionais nomeadamente no que concerne ao cálculo estrutural ao fogo. As prescrições normativas nacionais induzem ao dimensionamento da estrutura em situação de incêndio de forma simplificada, por meio de tabelas genéricas. Logo, observa-se que os modelos utilizados por grande parte dos projetistas apresentam resultados não realísticos, o que pode levar a cálculos superdimensionados dos sistemas de proteção passiva e consequentemente elevação dos custos da obra.

Desta forma, propõe-se fazer um estudo que demonstre que o estudo baseado no desempenho da estrutura frente a situação de incêndio apresenta melhores resultados frente as normas prescritivas consagradas. Pretende-se, realizar uma análise numérica comparativa entre o incêndio padrão e o natural de uma edificação em estrutura metálica, utilizando duas metodologias diferentes, ou seja, analisando a estrutura com métodos de cálculo simplificados e avançados. Posteriormente, pretende-se definir custos da proteção, segundo cada metodologia de cálculo, buscando evidenciar que a análise baseada no desempenho apresenta maior viabilidade econômica.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

A maioria dos projetos de proteção passiva das estruturas metálicas é realizada de forma empírica, ou a partir de normas prescritivas, fazendo uso de tabelas calculadas com temperaturas críticas pré-definidas, ou seja, sem levar em conta os esforços em situação de incêndio dos elementos e também não levam em conta a situação real da edificação: carga de incêndio, aberturas, tipos de fechamentos, revestimentos e sistemas de proteção ativa. Essas análises simplificadas podem levar a um dimensionamento conservador, elevando o custo da proteção passiva das estruturas metálicas.

3. JUSTIFICATIVA

Considerando que as normas brasileiras se baseiam suas prescrições em modelos simplificados, que por vezes não representa de forma realística a situação de incêndio, que os modelos empíricos (tabelas, com temperaturas pré-definidas) adotados também não representam a melhor forma de dimensionamento, propõe-se, com este estudo, demonstrar que métodos mais realísticos baseados no desempenho podem ser mais eficazes para o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Realizar a verificação do dimensionamento de uma edificação em estrutura metálica em situação de incêndio, utilizando as formulações simplificadas da ABNT NBR 14323:2013 e com métodos avançados de engenharia MEF (Método dos Elementos Finitos). Em ambos os casos o estudo será realizado para curva de incêndio padrão e curva de incêndio natural.

4.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar a estrutura modelo a frio;

- Comparar o dimensionamento de uma estrutura metálica em situação de incêndio a partir da curva de incêndio padrão e a curva de incêndio natural;
- Comparar o dimensionamento de uma estrutura metálica em situação de incêndio a partir da metodologia de cálculo simplificado proposta pela ABNT NBR 14323:2013 e métodos avançados de cálculos baseados nos MEF (Método dos Elementos Finitos);
- Comparar os resultados encontrados com modelos empíricos (tabelas), disponibilizados no mercado brasileiro;
- Identificar para a estrutura metálica proposta, qual modelo apresenta melhor viabilidade financeira para implementação.

5. REVISÃO DE LITERATURA

O dimensionamento em situação de incêndio é a verificação da estrutura aos estados limites últimos aplicáveis em temperatura elevada. O projeto em situação de incêndio deve evitar o colapso estrutural em condições que prejudique a fuga dos usuários da edificação. De igual forma deve ser evitado a propagação do fogo ou transmissão de calor e o risco a vizinhança. Além disso, o dimensionamento deve proporcionar condições de aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo (ABNT NBR 14323:2013).

Neste capítulo são abordados os principais aspectos relacionados a análise e dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, sendo feita uma breve descrição sobre as curvas de incêndio padrão e curva de incêndio natural e métodos de cálculo simplificado e avançado, por meio do MEF (Método dos Elementos Finitos) a partir do software SAFIR (FRANSSEN, 2005).

5.1. Análise Térmica

A análise térmica engloba o cálculo das temperaturas, através das quantificações das ações na estrutura descrita por meio do fluxo de calor no componente estrutural, em virtude da ocorrência de um incêndio e na determinação da evolução da temperatura do aço.

Um modelo para que se considerem os efeitos das ações térmicas, consiste em caracterizar a evolução da temperatura do incêndio em função do tempo (curva

temperatura-tempo) que, em conjunto com as condições envolventes ao incêndio, torna possível a determinação do fluxo de calor transmitido às estruturas (SILVA, 2016, p. 29).

Neste estudo serão utilizadas duas curvas como ponto de partida para as comparações: curva de incêndio padrão ou ISO 834 e curva de incêndio baseada no incêndio natural.

5.1.1. Curva Incêndio Padrão – ISO 834

Incêndio padrão é o modelo no qual se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeite as curvas padronizadas. Tais curvas são caracterizadas por apresentar apenas ramo ascendente, ou seja, a temperatura sempre será crescente ao longo do tempo, independente da característica do ambiente e de suas possíveis cargas de incêndio (SILVA, 2001, p. 31).

Este modelo pode ser expresso pela curva de incêndio padrão ISO 834, onde a temperatura dos gases no ambiente em chamas é definida pela equação (5.1), sendo esta temperatura dependente do tempo (t) e da temperatura dos gases no instante inicial ($\theta_{g,0}$), geralmente admitida 20°C:

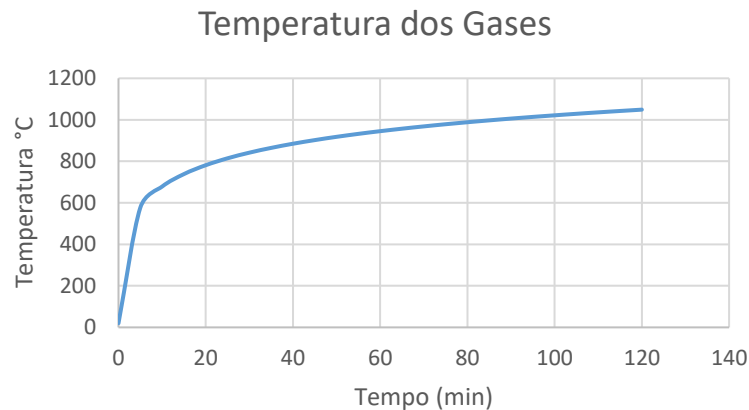
$$\theta_g = \theta_{g,0} + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (5.1)$$

Vila Real (2003, p. 22) destaca que embora a curva de incêndio padrão ISO 834 não represente um incêndio real, esta permite a comparação de resultados experimentais de resistência ao fogo obtida em ensaios diferentes.

Já Silva (2016, p. 30) cita o fato de esta curva desconsiderar a fase de pré-*flashover*, não incluir o decréscimo da temperatura (ramo descendente), não depender da carga de incêndio e das condições de ventilação e considerar todo compartimento de forma uniforme independente da área, como fatores limitantes para utilização deste modelo.

A figura 1 representa a curva de incêndio padrão ISO 834, onde é possível relacionar a temperatura em função do tempo. Fica evidente um acréscimo contínuo de temperatura com o decorrer do tempo, não sendo considerado o período de resfriamento dos gases.

Figura 1– Curva Temperatura-Tempo para Incêndio Padrão (ISO 834)



Fonte: Elaborado pelo autor

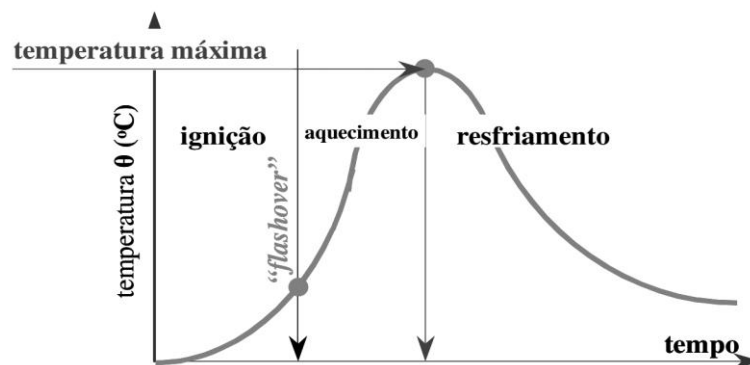
5.1.2. Curva Incêndio Natural

Silva (2001, p. 34) define incêndio natural àquele para qual se admite que a temperatura dos gases respeite as curvas temperatura-tempo naturais. Estas foram construídas a partir de ensaios de incêndios que simulam a real situação de um compartimento em chamas.

Tal modelo apresenta três fatores influenciadores principais, sendo a carga de incêndio, o grau de ventilação e as características térmicas do material componente.

A figura 2 exemplifica uma curva de incêndio natural, onde fica evidente o ramo ascendente, fase de ignição e aquecimento, e o ramo descendente, fase de resfriamento.

Figura 2 – Curva Temperatura-Tempo para Incêndio Padrão Natural



Fonte: COSTA e SILVA, 2006

Conforme a figura 2 o incêndio natural diferencia do incêndio padrão por apresentar além do ramo ascendente, que caracteriza a fase de aquecimento, um ramo descendente, introduzindo uma fase de resfriamento à curva. Admite-se, portanto, que os gases não possuem comportamento de aumento de temperatura crescente ao longo de todo tempo do incêndio.

Esta curva, portanto, apresenta um ponto de máximo, que representa o momento no qual a temperatura alcançada pelos gases durante a queima dos materiais atinge a sua maior temperatura, ou seja, temperatura crítica. A partir deste momento o material combustível, ou carga de incêndio, se extingue.

Um modelo de curva de incêndio natural é apresentado pela Norma Europeia EN1991-1-2 (2010), Anexo A, onde define a curva de incêndio paramétrica válida para compartimentos de incêndio com o máximo de 500 m² de área em planta, sem aberturas no teto e uma altura máxima de 4 m, admitindo ainda que a carga de incêndio será totalmente consumida. Desta forma, a fase de aquecimento da temperatura dos gases no compartimento de incêndio é obtida pela equação (5.2).

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t'} - 0,204e^{-1,7t'} - 0,472e^{-19t'}) \quad (5.2)$$

Na expressão acima o valor de (t') é obtido a partir da relação do tempo transcorrido do incêndio, em horas, com as características do material da envolvente (massa específica, calor específico e condutividade térmica) e a relação entre as aberturas verticais e a área da envolvente (paredes, teto e pavimentos), denominado fator de abertura.

A temperatura máxima (θ_{max}) na fase de aquecimento está relacionada a um tempo (t_{max}), e este pode ser definido pela equação (5.3), apresentada a seguir:

$$t_{max} = \max[(0,2 \times 10^{-3} \times q_{t,d}/O) ; t_{lim}] \quad (5.3)$$

Onde $q_{t,d}$ é uma relação entre o valor de cálculo da carga de incêndio e a área da superfície do pavimento, obtido conforme Anexo E da EN1991-1-2 (2010), e O é o fator de abertura. O valor de t_{lim} é a taxa de crescimento de incêndio, em horas, assumindo o valor de 25 minutos para uma taxa lenta, 20 minutos para taxa média e 15 minutos para uma taxa de crescimento de incêndio rápida, conforme velocidade de propagação do incêndio. Tal velocidade é definida conforme tipo da ocupação do compartimento, e é apresentada pelo Quadro E.5 do Anexo E da EN1993-1-2.

Na fase de arrefecimento, a curva de incêndio natural está condicionada ao valor do tempo onde ocorre a temperatura máxima (t'_{max}), conforme as equações (5.4), (5.5) e (5.6):

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t - t_{max} \cdot x), \text{ para } t_{max} \leq 0,5 \quad (5.4)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max})(t - t_{max} \cdot x), \text{ para } 0,5 < t_{max} < 2 \quad (5.5)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t - t_{max} \cdot x), \text{ para } t_{max} \geq 2 \quad (5.6)$$

5.2. Análise Mecânica

O princípio na análise mecânica se dá pela manutenção da estabilidade da estrutura, condicionada a um tempo mínimo.

A norma ABNT NBR 14432:2001 define Resistência ao Fogo como “propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável”.

São estabelecidos critérios baseados na resistência ao fogo dos elementos construtivos, a partir das condições de exposição ao Incêndio Padrão. Tais critérios consideram a severidade ou potencial destrutivo dos incêndios, devido a fatores como tipo de ocupação, área, profundidade do subsolo, altura da edificação e facilidade de acesso para combate ao incêndio e é definido como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) pela ABNT NBR 14432.

A Norma Técnica nº 6 do CBM-TO, em seu Adendo A, Tabela A, determina o tempo requerido de resistência ao fogo para as edificações conforme seu tipo de ocupação e dimensões, área e altura.

A norma EN1991-1-2 estabelece que a análise mecânica deve ser efetuada para a mesma duração utilizada na análise térmica e a verificação da resistência ao fogo deverá ser feita no domínio do tempo, resistência ou temperatura.

Segundo Silva (2016, p. 33), para o dimensionamento de um elemento metálico, ou de uma estrutura, a debilitação progressiva das propriedades mecânicas do aço deve ser considerada. Devido a geometria do elemento exposto ao fogo, o calor propagado à estrutura gera um aumento de temperatura, não uniforme, deste

elemento com uma consequente diminuição da resistência do material, ao mesmo tempo em que provoca solicitações devido ao alongamento dos elementos.

Observa-se na Tabela 1, os valores dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço em situação de incêndio, segundo a ABNT NBR 14323:2013, obtidos com base em ensaios experimentais.

Tabela 1 – Fatores de redução para a relação tensões-deformações do aço carbono a temperaturas elevadas.

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento a k_y, θ	Fator de redução do módulo de elasticidade a k_E, θ	Fator de redução a $k_{\sigma, \theta}$, para flambagem local
20	1,00	1,000	1,00
100	1,00	1,000	1,00
200	1,00	0,900	0,89
300	1,00	0,800	0,78
400	1,00	0,700	0,65
500	0,78	0,600	0,53
600	0,47	0,310	0,30
700	0,23	0,130	0,13
800	0,11	0,090	0,07
900	0,06	0,068	0,05
1000	0,04	0,045	0,03
1100	0,02	0,023	0,02
1200	0,00	0,000	0,00

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

Requisitos de segurança de uma estrutura em situação de incêndio são alcançados quando os esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio são menores ou iguais aos esforços resistentes de cálculo correspondente a cada elemento estrutural, para o estado limite último, em situação de incêndio.

Conforme ABNT NBR 14432:2001, para os esforços solicitantes de cálculo, são consideradas combinações últimas excepcionais, expressas por:

- Em locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,21 F_{Q,k} \quad (5.7)$$

- Em locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo ou de elevadas concentrações de pessoas:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,28 F_{Q,k} \quad (5.8)$$

- Em bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,42 F_{Q,k} \quad (5.9)$$

- As barras da estrutura em que o único esforço solicitante seja o decorrente da ação do vento, além do peso próprio delas mesmas e de eventuais ações térmicas:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,20 F_{W,k} \quad (5.10)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ – valor característico das ações permanentes diretas;

$F_{Q,exc}$ – valor característico das ações térmicas decorrentes do incêndio;

$F_{Q,k}$ – valor característico das ações variáveis decorrentes do uso e ocupação;

$F_{W,k}$ – valor característico das ações devidas ao vento, determinada conforme a ABNT NBR 6123;

γ_g – valor do coeficiente de ponderação para as ações permanentes diretas.

5.3. Métodos de Cálculo

5.3.1. Método Simplificado de Dimensionamento

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta um método simplificado de dimensionamento ponderando vários aspectos como considerar a temperatura do elemento constante, ou seja, a norma despreza o fato das temperaturas na seção do elemento estrutural ser variável e, para estruturas de pequena e média deslocabilidade, pode-se adotar como esforço solicitante de cálculo na situação de incêndio equivalente a 70% do valor do esforço verificado a temperatura ambiente,

em combinações que não incluem o vento. Na ocorrência de barras submetidas a ações de vento, deverão ser acrescidos 20% dessa ação aos esforços.

5.3.1.1. Barras Tracionadas

Para barras axialmente tracionadas, o valor de cálculo do esforço normal resistente para o estado limite último de escoamento da seção bruta, é definido como:

$$N_{fi,Rd} = \frac{k_{y\theta} A_g f_y}{\gamma_{a,fi}} \quad (5.11)$$

Onde A_g é área bruta da seção transversal (cm^2), $k_{y\theta}$ coeficiente redutor da resistência do material em decorrência da ação térmica (tabela 5.1), f_y é o valor característico da resistência dos aços e $\gamma_{a,fi}$ é coeficiente de ponderação da resistência, tomado com valor unitário.

5.3.1.2. Barras Comprimidas

A verificação do esforço resistente de compressão em barras em situação de incêndio em que não apresentem flambagem local é dada pela equação (5.12). As barras que não apresentam flambagem local são aquelas em que a esbeltez é inferior a 85% da esbeltez limite, dada em ABNT NBR 8800:2008, Anexo F.

$$N_{fi,Rd} = \frac{\chi_{fi} k_{y\theta} A_g f_y}{\gamma_{a,fi}} \quad (5.12)$$

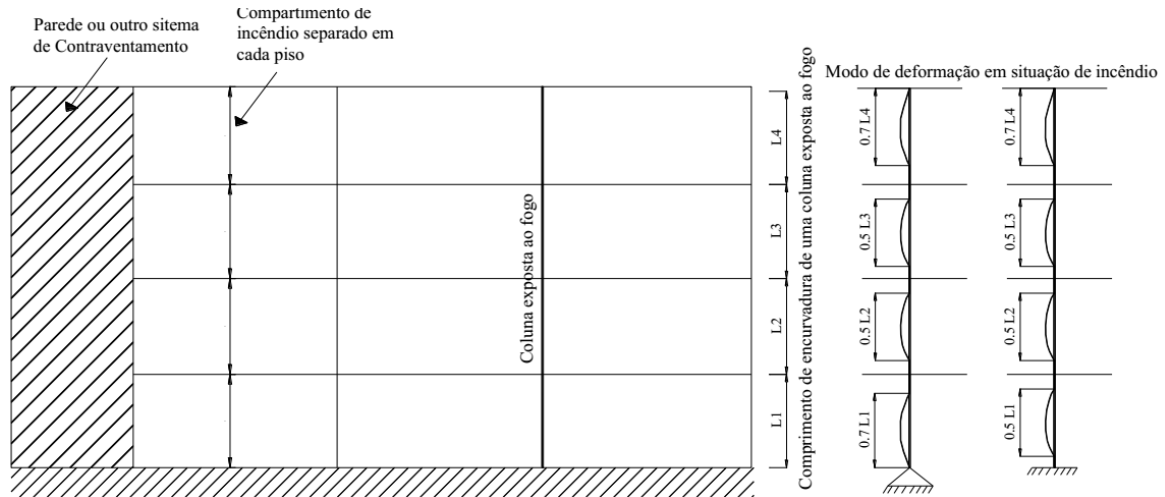
Nesta equação (χ_{fi}) é um fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, determinado a partir dos valores do índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio.

No dimensionamento em situação de incêndio, o comprimento de flambagem pode ser determinado conforme o modelo à temperatura normal. Contudo, para pilares contraventados pertencentes aos compartimentos incendiados são estabelecidos coeficientes de redução onde, para os pavimentos intermediários $l_{fi} = 0,5L$ e nos pilares de pavimentos superiores $l_{fi} = 0,7L$ (Figura 3).

Entretanto, em pórticos onde não há contraventamento, as normas referem-se apenas que o comprimento de flambagem deve ser determinado conforme

modelo de dimensionamento a frio. Contudo, não fica evidente que adotar os mesmos procedimentos para as duas situações (incêndio e temperatura ambiente) esteja correto, devendo ainda ser considerado a degradação das propriedades mecânicas do aço, em particular o módulo de elasticidade (SILVA, 2016, p. 38).

Figura 3 – Comprimento de flambagem em pilares de pórticos contraventados



Fonte: SILVA, 2016, p. 38

Desta forma, para este estudo serão adotados valores de comprimento de flambagem para pórticos não contraventados encontrados por Silva (2016. P. 138), onde se definiu: para coluna de pórticos com múltiplos pavimentos, adota-se $l_{fi} = 1,0L$ para pavimentos inferiores com apoios engastados e $l_{fi} = 2,0L$ para apoios rotulados; nos demais pavimentos adotam-se $l_{fi} = 1,0L$ para apoios rotulados e engastados.

Nas situações onde colunas externas estão à temperatura normal (20°C) e as colunas internas e vigas estão aquecidas em três ou quatro lados, adota-se valores descritos para pórticos contraventados.

Para barras axialmente comprimidas, sujeitas à flambagem local em situação de incêndio, considerando o estado-limite último de instabilidade da barra como todo é definido pela equação (5.13). Observa-se que neste caso é considerada a área efetiva da barra (A_{ef}) e o coeficiente de redução para esta situação ($k_{\sigma\theta}$).

$$N_{fi,Rd} = \frac{\chi_{fi} k_{\sigma\theta} A_{ef} f_y}{\gamma_{a,fi}} \quad (5.13)$$

5.3.1.3. Barras submetidas a momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio de uma barra submetida à flambagem local é dado pelas equações (5.14) a (5.16), considerando um fator redutor de 0,85 aos parâmetros de esbeltez de plastificação e esbeltez, definidos conforme procedimentos da ABNT NBR 8800:2008, Anexo G.

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad (5.14)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y, \text{ para } \lambda_{p,fi} \leq \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad (5.15)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{\sigma,\theta} M_y, \text{ para } \lambda > \lambda_{r,fi} \quad (5.16)$$

Onde M_{pl} é o momento de plastificação da seção transversal a temperatura ambiente, κ é um fator de correção cujo valor é de 1,00 para viga exposta ao fogo dos quatro lados; 1,15 viga com revestimento ou exposta ao fogo em 3 lados; 1,40 viga sem revestimento, exposta em 3 lados e, M_y é o momento fletor correspondente ao início do escoamento à temperatura ambiente, desprezando-se as tensões residuais, cujo valor é igual ao produto W_{fy} com W igual ao módulo resistente elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

O momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio de uma barra submetida à flambagem lateral com torção, quando aplicável, é dado pela equação seguinte:

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (5.17)$$

5.3.1.4. Barras submetidas a força cortante

A força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio é definida de mesma forma à determinada para temperatura normal, considerando coeficiente de ponderação unitário.

Observa-se que tanto para a verificação do momento resistente de cálculo quanto para o efeito cortante de cálculo, os valores do módulo de elasticidade e do escoamento devem ser multiplicados pelos seus respectivos fatores de correção (Tabela 1) e, os parâmetros de esbeltez em situação de incêndio serão determinados usando os procedimentos para temperatura normal, multiplicando-os por 0,85.

5.3.1.5. Elevação da temperatura do aço

A elevação da temperatura em elementos estruturais sem revestimento contra o fogo, situados no interior de uma edificação, é determinado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{\left(u/A_g\right)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (5.18)$$

Onde k_{sh} é um fator de correção para efeito de sombreamento, u/A_g é o fator de massividade do elemento; ρ_a é a massa específica do aço, c_a é o calor específico do aço, φ refere-se ao valor do fluxo de calor por unidade de área e, Δt é o intervalo de tempo, não podendo ser superior a 5 s.

Fator de massividade é a razão entre a área do elemento submetido ao fogo e seu volume: Área/Volume. No caso de elementos prismáticos, esta relação se dá pela razão entre o perímetro do elemento exposto ao fogo e a área da seção transversal.

A elevação da temperatura em elementos estruturais com revestimento contra fogo, situados no interior de uma edificação, é determinado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m \left(U_m/A_g\right)}{t_m \rho_a c_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \left(\xi/4\right)} \Delta t - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{\left(4/\xi\right) + 1} \quad (5.19)$$

Onde:

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m \left(U_m/A_g\right) \quad (5.20)$$

Neste caso, U_m/A_g refere-se ao fator de massividade dos elementos revestidos, o índice “m” indicado refere-se às propriedades físicas do material de revestimento (espessura, massa específica e calor específico), $\theta_{g,t}$ indica a temperatura dos gases no tempo t e $\theta_{a,t}$ a temperatura do aço no tempo t.

A temperatura crítica dos elementos pode ser definida por:

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 k_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (5.21)$$

Onde $k_{y,\theta}$ é um fator de redução definido pela razão entre o esforço solicitante de cálculo ($E_{sd,fi}$) e o esforço resistente de cálculo ($R_{sd,fi}$).

5.3.2. Métodos Avançados de Dimensionamento

Para dimensionamento da estrutura por meio de técnicas de cálculos avançados, optou-se pela utilização do programa SAFIR (FRANSSEN, 2005). Este se baseia nos Métodos dos Elementos Finitos (MEF), sendo muito comum sua aplicação na análise de estruturas em caso de incêndio (SILVA, 2016, p. 31). Foi desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica, por Jean-Marc Franssen e Thomas Gernay e por ser um programa de elementos finitos, acomoda vários elementos para diferentes simulações, procedimentos de cálculo e vários modelos de materiais para incorporar no comportamento.

O SAFIR é um programa de computador que modela o comportamento das estruturas de construção submetidas ao fogo. A estrutura pode ser feita de um esqueleto 3D de elementos lineares, tais como vigas e colunas, em conjunto com elementos planares, tais como lajes e paredes. Elementos volumétricos podem ser usados para análise de detalhes na estrutura, como conexões.

A análise se dá a partir das temperaturas dos gases produzidas pelo fogo, introduzidas a partir das curvas de incêndio. Desta forma o SAFIR calcula a evolução das temperaturas na estrutura. Podem ser utilizados diferentes materiais, como aço, concreto, madeira, alumínio, gesso ou produtos termicamente isolantes, usados separadamente ou em combinações.

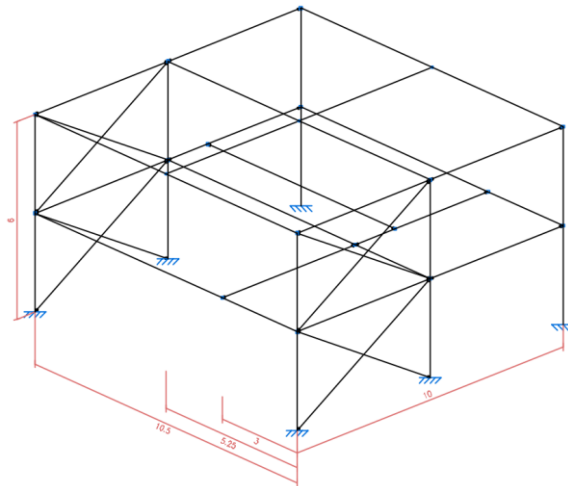
O comportamento mecânico, por sua vez, é calculado de acordo com a geometria da estrutura, condições de suporte, cargas solicitantes e resistência do material utilizado, considerando um aumento progressivo da temperatura simulando alterações físicas na estrutura, em decorrência do aumento da temperatura, com aumento dos deslocamentos até culminar no colapso.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo foi realizado utilizando como modelo estrutural um edifício comercial localizado na cidade de Palmas-TO. A definição desta edificação foi em

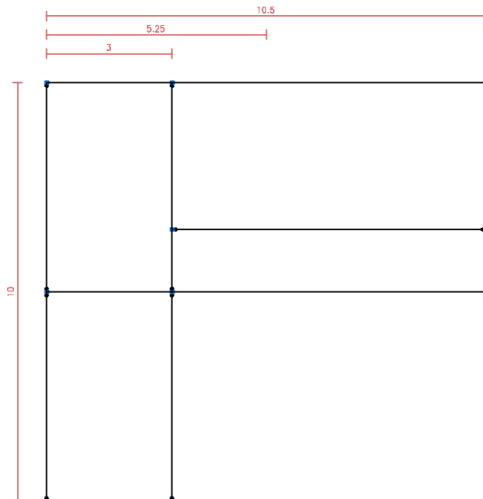
função das suas características arquitetônicas e de utilização: destinada a prática de atividades esportivas, possuindo dois pavimentos, sendo o térreo uma piscina e o pavimento superior destinado a atividades em grupo, salas administrativas e vestiários, com área construída total de aproximada de 210 m². Sua estrutura possui três pórticos principais e uma escada de acesso, podendo ser observados nas figuras 4 a 9.

Figura 4 – Modelo 3d estrutural da edificação



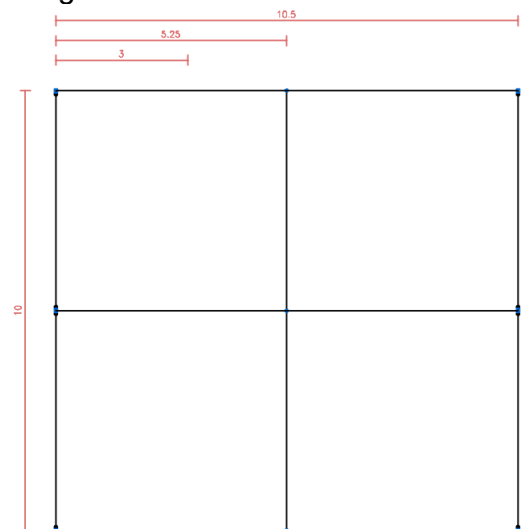
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 – Planta baixa primeiro pavimento



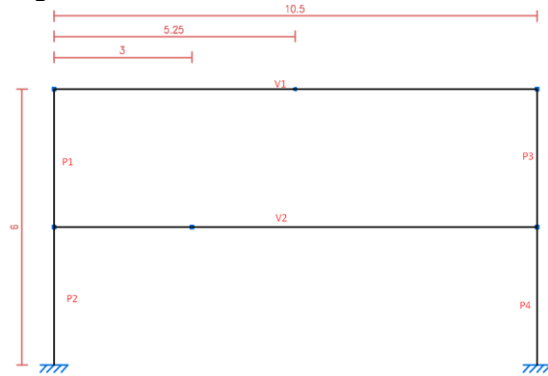
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 – Planta baixa cobertura



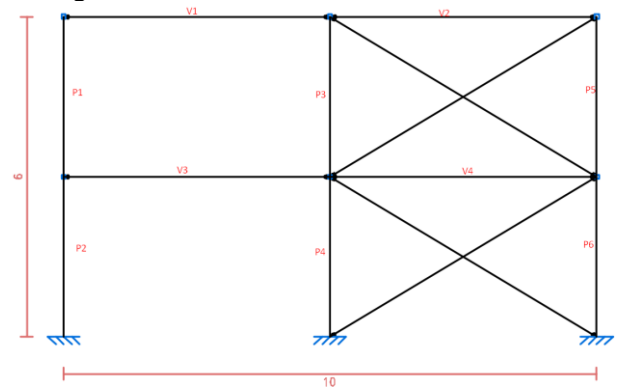
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7– Modelo Pórticos 01, 02 e 03



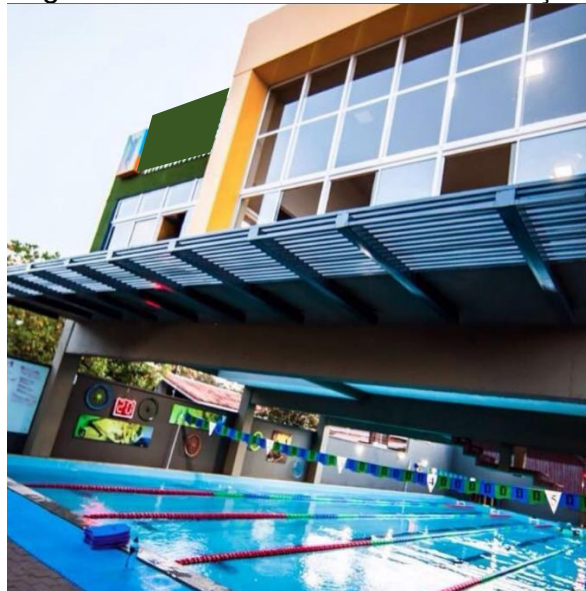
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – Modelo Pórticos 04 e 05



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Fachada frontal da edificação



Fonte: Google Imagens 2017

A tabela 2 apresenta um resumo das características geométricas dos pórticos analisados neste estudo.

Tabela 2 - Características geométricas dos pórticos.

Nomenclatura	Nº de Pavimentos	Nº de vãos	Altura pavimento	Distância dos vãos	Contraventado
Pórtico 1	2	1	3	10,5	Não
Pórtico 2	2	1	3	10,5	Não
Pórtico 3	2	1	3	10,5	Não
Pórtico 4	2	2	3	5	Sim
Pórtico 5	2	2	3	5	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente realizou-se o dimensionamento da estrutura em aço a frio, considerando as sobrecargas da laje de piso (1º pavimento) e cobertura conforme ABNT NBR 8800:2008. Considerou-se uma análise linear, com os efeitos de segunda ordem globais e as imperfeições globais. Para tal, foi utilizada a ferramenta de cálculo Metálica 3D (CYPE®).

O peso das estruturas secundárias (telha, divisórias, forro e alvenaria) foi definido conforme ABNT NBR 6120:1980. A tabela 3 apresenta um resumo das ações definidas para o dimensionamento.

Tabela 3 – Ações na estrutura.

AÇÕES	CARGA	UNIDADE
PP_telhas	0,12	kN/m ²
PP_alvenaria	2,00	kN/m ²
PP_laje piso	3,70	kN/m ²
PP_laje cobertura	3,50	kN/m ²
PP_escada	2,50	kN/m ²
SC_cobertura	0,25	kN/m ²
SC_piso esporte	5,00	kN/m ²
SC_piso escritório	2,00	kN/m ²
V_0º	0,45	kN/m ²
V_90º	0,45	kN/m ²
PP – peso próprio, SC – sobrecarga, V - vento		
Fonte: Elaborado pelo autor		

A estrutura foi dividida em 03 pórticos principais e não contraventados e engastados (figura 7), 02 pórticos laterais contraventados e engastados (figura 8), e duas vigas isoladas (laje do primeiro pavimento) consideradas bi-apoiadas. Foram consideradas para ambos pavimentos lajes maciças totalmente apoiadas.

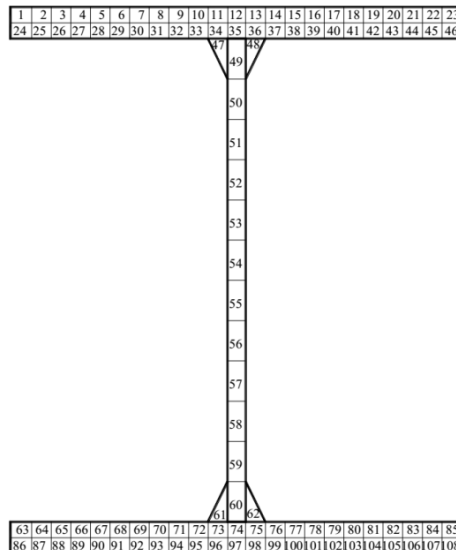
Após este dimensionamento utilizaram-se duas metodologias de cálculo diferentes na verificação das estruturas metálicas em situação de incêndio. Na primeira calculou-se o tempo de resistência ao fogo com métodos simplificados de cálculo, usando as formulações propostas pela EN1993-1-2. Nesta verificação utilizou-se o programa de cálculo Elefir-EN, desenvolvido na Universidade de Aveiro (VILA REAL E FRANSSSEN, 2011), e em seguida verificou-se a estrutura com métodos avançados de cálculo, com recurso ao método de elementos finitos (M.E.F) utilizando o programa de cálculo SAFIR, desenvolvido pela Universidade de Liège na Bélgica (FRANSSSEN, 2005). Para os dois métodos de cálculo, foram utilizadas as curvas de

Incêndio Nominal ISO-834 e Curvas paramétricas de Incêndio Natural. Para todos os modelos foi considerada a análise por pórticos planos.

O tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) foi definido conforme a Nota Técnica N°6 do Corpo de Bombeiro Militar do Estado do Tocantins, sendo classificado no Grupo E, Ocupação/Use Educacional e Cultura Física, Divisão E, para edificação baixa, sendo equivalente a 30 minutos. O tempo de colapso foi definido como o tempo em que o segmento estrutural atinge sua temperatura crítica de colapso.

Assim como Silva (2016), no cálculo utilizando métodos avançados, a determinação da evolução da temperatura no aço, a seção transversal foi discretizada em 108 elementos sendo os banzos superior e inferior da seção transversal discretizados em 46 elementos finitos, e a alma em 12 elementos finitos, de forma regular e um raio de concordância entre a alma e os banzos discretizado por um elemento finito triangular, conforme a figura 10.

Figura 10 – Discretização da seção transversal dos elementos finitos



Fonte: SILVA, 2016, p. 62

A verificação da resistência ao fogo utilizando a curva de incêndio nominal ISO 834, considerou-se a ocorrência do incêndio em cada pavimento isoladamente e em ambos pavimentos simultaneamente. Para a verificação da resistência ao fogo utilizando a curva de Incêndio Natural, considerou-se a ocorrência do incêndio no

pavimento superior e, em virtude da característica da edificação, considerou-se um incêndio localizado na base dos pilares do pavimento inferior.

Desta forma, define-se a resistência ao fogo de um elemento estrutural como o intervalo de tempo transcorrido desde o início do incêndio até o momento em que o elemento atinge a temperatura crítica.

Portanto, seguiu-se a sequência de cálculo:

- i. Definição da ação térmica, conforme curvas de incêndio definidas;
- ii. Definição das ações mecânicas a considerar em situação de incêndio, conforme combinações normativas;
- iii. Determinação do fator de massividade;
- iv. Determinação do valor de cálculo da temperatura crítica, θ_{cr} ;
- v. Cálculo da temperatura, θ_d , dos elementos no instante t ;
- vi. Determinação do valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio no instante t , $E_{sd,fi}$;
- vii. Determinação do valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t , $R_{sd,fi}$;
- viii. Determinação do valor de cálculo do fator de redução $k_{y\theta}$;
- ix. Definição da temperatura dos elementos θ_d a partir de tabelas;
- x. Verificação da resistência ao fogo a partir do domínio do tempo ($t_{fi,d} \leq t_{fi,req}$), da resistência ($E_{sd,fi} \leq R_{sd,fi}$, no instante $t_{fi,req}$), e da temperatura ($\theta_d \leq \theta_{cr}$, no instante $t_{fi,req}$).

Em seguida realizou-se a verificação da proteção conforme métodos empíricos, baseados no fator de massividade dos perfis dimensionados, conforme orientação de fabricantes nacionais. Por fim, realizou-se um levantamento do custo da proteção, conforme cada caso analisado. A tabela 4 apresenta um resumo das verificações que serão processadas.

Tabela 4 – Resumo dos modelos analisados.

Curva	Método	Custo Proteção R\$
ISO 834	Simplificado	R\$ -
	Avançado	R\$ -
Incêndio Natural	Simplificado	R\$ -
	Avançado	R\$ -
Tabela Comercial	Empírico	R\$ -

Fonte: Elaborado pelo autor

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Dimensionamento a frio

Os perfis estruturais dimensionados a frio são apresentados na Tabela 5. Observou-se a necessidade de vigas robustas no pavimento inferior dos Pórticos 01 a 03. Tais pórticos possuem suas vigas submetidas a carregamentos distribuídos das paredes, sendo o fator preponderante a verificação do Estado Limite de Serviço (ELS), onde foi limitado a flecha à 15 mm, conforme estipula a ABNT NBR 8800:2008. As vigas 01 e 02 dos Pórticos 04 e 05, não recebem carregamentos das lajes, logo possui menores solicitações, portanto foi possível dimensionar perfis mais esbeltos.

Tabela 5 - Resumo dos perfis dimensionados.

Pórtico 01	Segmento	Viga 01	Viga 02	Pilar 01/02/03/04	-
	Perfil	W530X74	W610X101	CS250X76	-
Pórtico 02	Segmento	Viga 01	Viga 02	Pilar 01/02/03/04	-
	Perfil	W530X72	W530X82	CS300x76	-
Pórtico 03	Segmento	Viga 01	Viga 02	Pilar 01/02/03/04	-
	Perfil	W530X74	W610X101	CS250X76	-
Pórtico 04	Segmento	Viga 01/02	Viga 03/04	Pilar 01/02/05/06	Pilar 03/04
	Perfil	W250X32	W310X38	CS250X76	CS300x76
Pórtico 05	Segmento	Viga 01/02	Viga 03/04	Pilar 01/02/05/06	Pilar 03/04
	Perfil	W250X32	W310X38	CS250X76	CS250X77
Viga Isolada	Segmento	Viga 01	Viga 02	-	-
	Perfil	W360X64	W310X38	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2. Curva ISO-834: método simplificado

Para o dimensionamento à situação de incêndio utilizando a Curva de Incêndio Nominal ISO 834, considerou-se a ocorrência do evento em 3 situações: somente no pavimento inferior, em seguida somente no pavimento superior e por fim, foi considerado a ocorrência do incêndio nos dois pavimentos simultaneamente.

Para determinação das temperaturas nas seções transversais, considerou-se que os pilares estavam expostos ao incêndio nos seus quatro lados e as vigas estavam expostas em três lados (figura 11). A verificação foi realizada com auxílio do software Elefir-EN.

Figura 11 – Exposição das seções ao incêndio



As temperaturas críticas observadas variaram de 695°C para o perfil W530x62 utilizado na vida 1 do pórtico 2, à 798,4°C para o perfil W360x64, utilizado na viga isolada 2.

Para o TRRF definido pelo CBM-TO, observou-se que tanto o Pórtico 01 quanto o Pórtico 02 não alcançam o requisito mínimo de segurança (tempo mínimo equivalente a 30 minutos) em seus pavimentos. Já o Pórtico 03, o pavimento inferior possui tempo de 31,08 minutos, acima do mínimo estabelecido, porém, a análise do pavimento superior verifica-se que a instabilidade do pórtico ocorre em um tempo inferior ao tempo de segurança. O Pórtico 4 tem sua estabilidade garantida no pavimento superior, porém é esperado o colapso do pavimento inferior com 25,28 minutos a partir do início do incêndio. O Pórtico 5 foi o único em que a estabilidade foi assegurada aos 30 minutos. Ambas vigas isoladas não passaram no requisito de segurança, pois apresentaram instabilidade no instante de tempo igual a 29,78 min e 28,85 min, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6 – Temperatura crítica e tempo de resistência ao fogo dos pórticos/vigas para método simplificado utilizando curva ISO-834.

Estrutura	Pavimento	θ_{cri} (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 1	Inferior	764,30	29,35	Sim
	Superior		28,15	Sim
	Ambos		28,15	Sim
Pórtico 2	Inferior	695,00	29,50	Sim
	Superior		19,57	Sim
	Ambos		19,57	Sim
Pórtico 3	Inferior	765,60	31,08	Não
	Superior		28,25	Sim
	Ambos		28,25	Sim

Estrutura	Pavimento	Θ_{cri} (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 4	Inferior	753,80	25,28	Sim
	Superior		45,35	Não
	Ambos		25,28	Sim
Pórtico 5	Inferior	791,00	30,63	Não
	Superior		45,18	Não
	Ambos		30,63	Não
Viga 1	Inferior	763,9	29,78	Sim
Viga 2	Inferior	798,4	28,85	Sim

Θ_{cri} = temperatura crítica de colapso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se, portanto, que para uma análise simplificada, utilizando a curva de Incêndio Padrão ISO – 834, há a necessidade de proteção da estrutura nos pórticos 1,2,3 e 4, e nas vigas isoladas, para que seja assegurada a estabilidade à um tempo requerido de 30 minutos.

7.3. Curva ISO-834: método avançado

A verificação da situação de incêndio utilizando a curva ISO-834 a partir do método avançado, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), se processou com auxílio do software SAFIR.

Foram analisados em cada pórtico os pavimentos inferior e superior separadamente, e o incêndio ocorrendo em ambos pavimentos simultaneamente. A situação de exposição dos elementos foram as mesmas adotadas para o método simplificado: pilar expostos em 4 lados e vigas expostas em 3 lados.

Para esta situação, observou-se uma variação na temperatura crítica dos elementos de 636,35°C no pórtico 01 à 930,8°C no pórtico 05. Verificou-se também que para os pórticos 01, 02 e 03, o tempo no qual ocorre o colapso do pavimento inferior foi acima do TRRF, porém nos pavimentos superiores o tempo foi de 22,75 minutos e 16,36 minutos, respectivamente. Os pórticos 04 e 05 alcançaram as temperaturas críticas aos 32,61 e 54,30 minutos, respectivamente.

As temperaturas críticas das vigas isoladas ocorreram no instante igual a 28,10 min para viga 01 e 35,54 min para viga 2. Neste caso somente a viga 1 não possui requisitos mínimos de instabilidade para o TRRF de 30 min.

A tabela 7 apresenta os valores das temperaturas críticas e tempos de resistência ao fogo para os elementos do estudo.

Tabela 7 – Temperatura crítica e tempo de resistência ao fogo dos pórticos/vigas para método avançado utilizando curva ISO-834.

Estrutura	Pavimento	Θ_{cri} (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 1	Inferior	726,30	31,53	Não
	Superior		22,75	Sim
	Ambos		22,52	Sim
Pórtico 2	Inferior	636,35	33,55	Não
	Superior		16,36	Sim
	Ambos		16,37	Sim
Pórtico 3	Inferior	740,21	36,46	Não
	Superior		22,74	Sim
	Ambos		22,58	Sim
Pórtico 4	Inferior	831,01	33,25	Não
	Superior		>60	Não
	Ambos		32,61	Não
Pórtico 5	Inferior	930,80	54,30	Não
	Superior		>60	Não
	Ambos		56,59	Não
Viga 1	Inferior	702,9	28,10	Sim
Viga 2	Inferior	818,1	35,54	Não

Θ_{cri} = temperatura crítica de colapso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se, portanto, que para uma análise avançada, utilizando a curva de Incêndio Padrão ISO – 834, há a necessidade de proteção da estrutura nos pavimentos inferiores dos pórticos 1, 2 e 3, e na viga isolada 1, para que seja assegurada a estabilidade à um tempo requerido de 30 minutos.

Observou-se que o tempo de resistência ao fogo nos pórticos inferiores foram maiores no método avançado do que no método simplificado de cálculo. Contudo, para o pavimento inferior dos pórticos 1, 2 e 3 e para viga 1, os tempos de resistência foram inferiores aos encontrados no método simplificado.

Assim, a partir da análise dos dados, julga-se necessário a implementação de proteção passiva nos pavimentos superiores dos pórticos 1, 2 e 3, e na viga 1.

7.4. Incêndio Natural: método simplificado

A verificação da situação de incêndio utilizando a curva de Incêndio Natural, equações paramétricas, a partir de método simplificado de cálculo realizou-se com auxílio do software Elefir-EN.

Para este estudo, considerou-se no pavimento superior dois compartimentos de 3 m de altura com área de 52,5 m², sendo a envolvente em alvenaria cerâmica de 15 cm de espessura com condutibilidade térmica de 0,7 W/mK e calor específico de 840 J/KgK. As aberturas consideradas foram de 21,25 m² (esquadrias) e 3,15 m² (porta) para a primeira região compreendida entre os pórticos 1 e 2, e 1,26 m² (esquadrias) e 4,83m² (portas) para a segunda região, compreendida entre os pórticos 2 e 3. O tipo de ocupação pertencente ao Grupo E (NT nº 6 CBM-TO), com taxa de crescimento do incêndio de 20 min e densidade de carga de incêndio específica de 300 MJ/m².

Para o pavimento inferior foi considerada a existência de uma piscina em toda área térrea e sem fechamentos. Portanto, não é factível que se faça análise similar ao do pavimento superior. Desta forma, optou-se por fazer uma análise de incêndio localizado, conforme discutido no item 7.6.

A tabela 8 apresenta as temperaturas críticas e máximas do aço e o tempo de resistência ao fogo da estrutura. As temperaturas críticas variaram de 692,90 °C para o pórtico 2 à 886,5 °C para os pórticos 3 e 4. As temperaturas máximas alcançadas variaram de 592,00 °C para o pórtico 1 à 787,00 °C para o pórtico 3.

Foi possível verificar que somente o pórtico 3, em seu pavimento superior, a temperatura do aço ultrapassa a temperatura crítica, no instante equivalente a 29,90 min, o que leva a estrutura ao colapso em um tempo inferior ao TRRF recomendado pelo CBM-TO. Nos demais pórticos e nas vigas isoladas, a temperatura máxima do aço limitou-se a valores inferiores à temperatura crítica.

Tabela 8 – Temperatura crítica (Θ_{cri}), máxima ($\Theta_{máx}$) e tempo de resistência ao fogo (colapso) método simplificado utilizando curva de Incêndio Natural.

Estrutura	Pavimento	Θ_{cri} (°C)	$\Theta_{máx}$ (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 1	Inferior	764,30	592,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 2	Inferior	692,90	597,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 3	Inferior	765,60	787,00	Não colapsa	Não
	Superior			29,90	Sim
	Ambos			Não colapsa	Não

Estrutura	Pavimento	Θ_{cri} (°C)	$\Theta_{m\acute{a}x}$ (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 4	Inferior	886,50	771,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 5	Inferior	886,50	771,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Viga 1	Inferior	763,90	492,00*	Não colapsa	Não
Viga 2	Inferior	798,40	492,00*	Não colapsa	Não

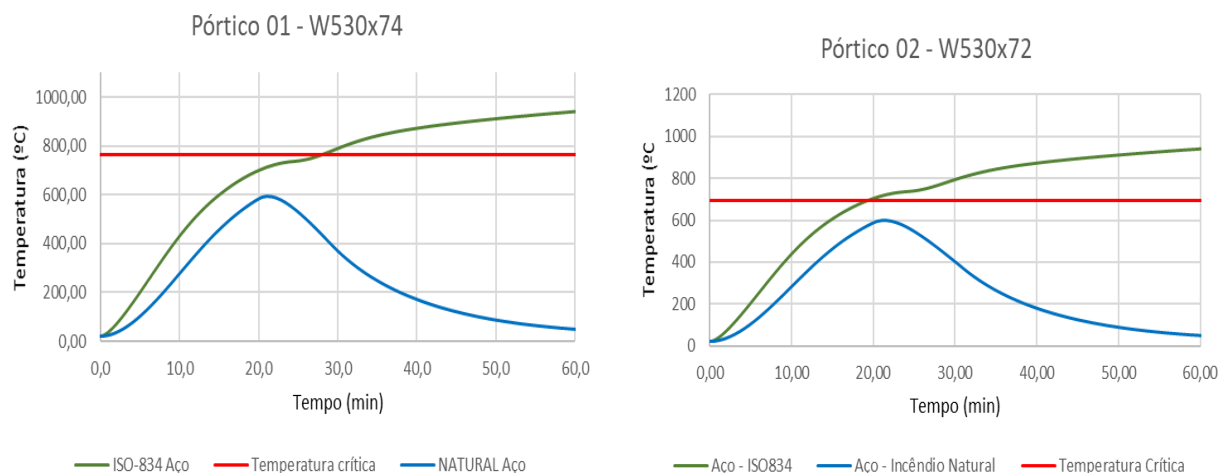
* temperatura máxima definida a partir do incêndio localizado

Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, utilizando-se da curva de Incêndio Natural por meio do método simplificado de cálculo e, considerando as características da edificação, somente o pavimento superior do pórtico 3 é passível de proteção passiva contra incêndio, para assegurar sua estabilidade dentro do tempo requerido de resistência ao fogo.

Na figura 12 são apresentados gráficos comparativos para a temperatura do aço a partir da curva de incêndio padrão ISO-834 e a curva de incêndio natural, para uma análise simplificada. Considerou-se apenas os segmentos que apresentaram tempo de resistência ao fogo inferior a 30 minutos. Destaca-se ainda o comparativo da cura de incêndio padrão ISO-834 e curva de incêndio localizado para o pórtico 4 e vigas isoladas (1 e 2).

Figura 12 – Gráficos das curvas de incêndio para método simplificado





Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de incêndio natural para os pórticos 1 e 2 são aproximadas, pois encontram-se na mesma região, logo possuem mesmo fator de abertura. A temperatura máxima ocorrida no incêndio natural, para ambos os casos, mostrou-se consideravelmente inferior a temperatura crítica do aço.

Já o pórtico 3 possuem fator de abertura diferente dos anteriores, o que levou a um incêndio mais agressivo, próximo ao incêndio relativo a curva de incêndio padrão ISO-834. Destaca-se o fato de o pórtico 3 ter sido o único que em um incêndio natural, o perfil metálico alcança uma temperatura acima do valor crítico, ou seja, a estrutura é instável para um tempo requerido de 30 minutos.

O pórtico 4 e as vigas isoladas foi considerado um incêndio localizado. As temperaturas máximas alcançadas foram de 445°C aos 16 min para o pórtico 4, 399°C aos 17 min para viga 1 e 445°C para viga 2. Assim, fica evidente que para estas estruturas a análise por meio do incêndio padrão é mais conservador do que o incêndio natural.

7.5. Incêndio Natural: método avançado

A análise utilizando a curva de Incêndio Natural, a partir do método avançado de cálculo, realizou-se com auxílio do software SAFIR. Os parâmetros relativos às propriedades foram os mesmos tomados na análise com método simplificado.

Foram verificados os tempos de resistência ao fogo para o pavimento superior. Para o pavimento inferior foi considerado um incêndio localizado na base dos pilares. A tabela 9 apresenta os dados obtidos relativos à temperatura crítica, temperatura máxima alcançada e tempo de resistência ao fogo (colapso).

Tabela 9 – Temperatura crítica, máxima e tempo de resistência ao fogo para método avançado utilizando curva de Incêndio Natural.

Estrutura	Pavimento	Θ_{cri} (°C)	$\Theta_{máx}$ (°C)	Tempo de colapso (min)	Necessidade de Proteção
Pórtico 1	Inferior	726,30	488,50	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 2	Inferior	636,35	496,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 3	Inferior	740,21	675,40	Não colapsa	Não
	Superior			32,51	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 4	Inferior	831,01	527,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Pórtico 5	Inferior	930,80	527,00	Não colapsa	Não
	Superior			Não colapsa	Não
	Ambos			Não colapsa	Não
Viga 1	Inferior	702,9	492,00	Não colapsa	Não
Viga 2	Inferior	818,1	492,00	Não colapsa	Não

Θ_{cri} = temperatura crítica de colapso; $\Theta_{máx}$ = temperatura máxima alcançada pelo segmento.

* temperatura máxima definida a partir do incêndio localizado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

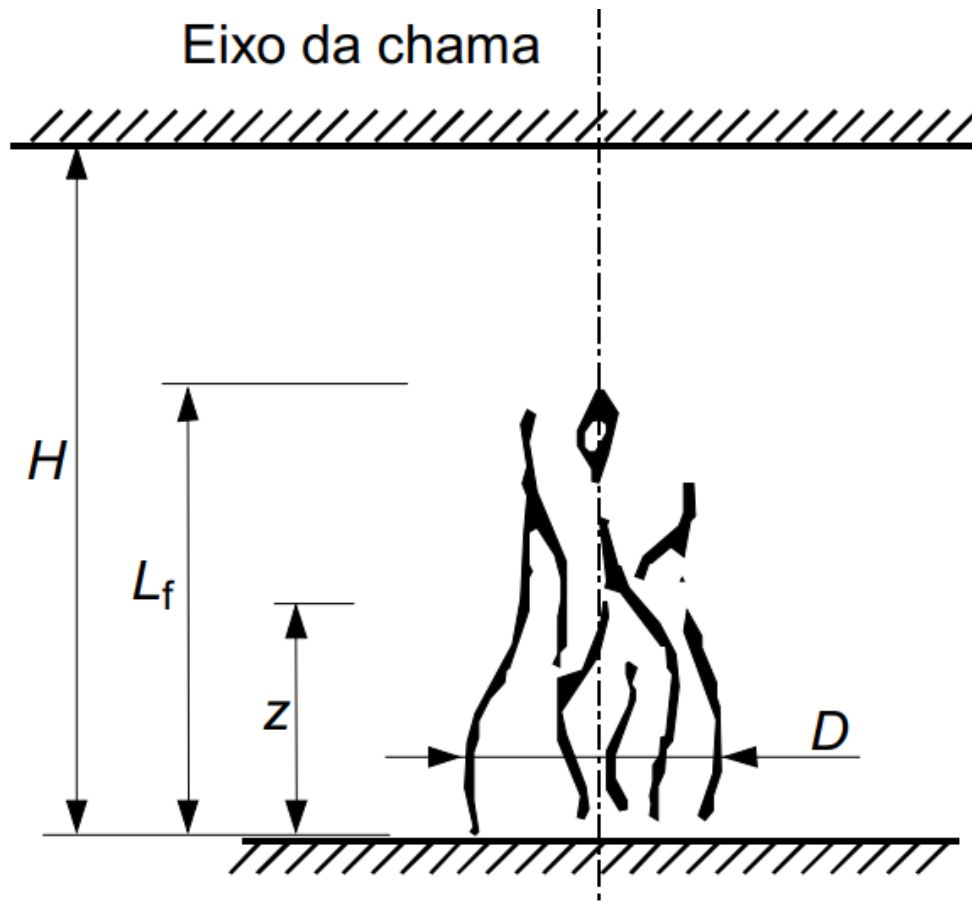
Nesta situação, apenas o pórtico 3, em seu pavimento superior, a temperatura do aço ultrapassa a temperatura crítica, no instante equivalente a 32,51 min. Porém este tempo foi suficiente para garantir a segurança da edificação para o TRRF estipulado. Para esta análise nenhum pórtico ou viga isolada necessita de proteção para garantir sua estabilidade.

7.6. Incêndio Localizado

Neste estudo, para uma análise utilizando a curva de Incêndio Natural nos pavimentos inferiores e nas vigas isoladas, foi utilizada as recomendações de Incêndio Localizado descrito no Eurocódigo EN-1991-1-2:2010.

O modelo utilizado foi o de Heskestad, onde a chama não atinge o teto do compartimento (REIS, 2011). A área total de aberturas verticais considerada foi de 30 m², a altura média das aberturas de 2,7 m, a área máxima de incêndio equivalente a 4 m², a distância entre a origem do incêndio (H) e o teto de 3 m, a densidade da carga de incêndio de 2,44 MJ/m², altura ao longo do eixo da chama (z) de 1,5 m (Figura 13).

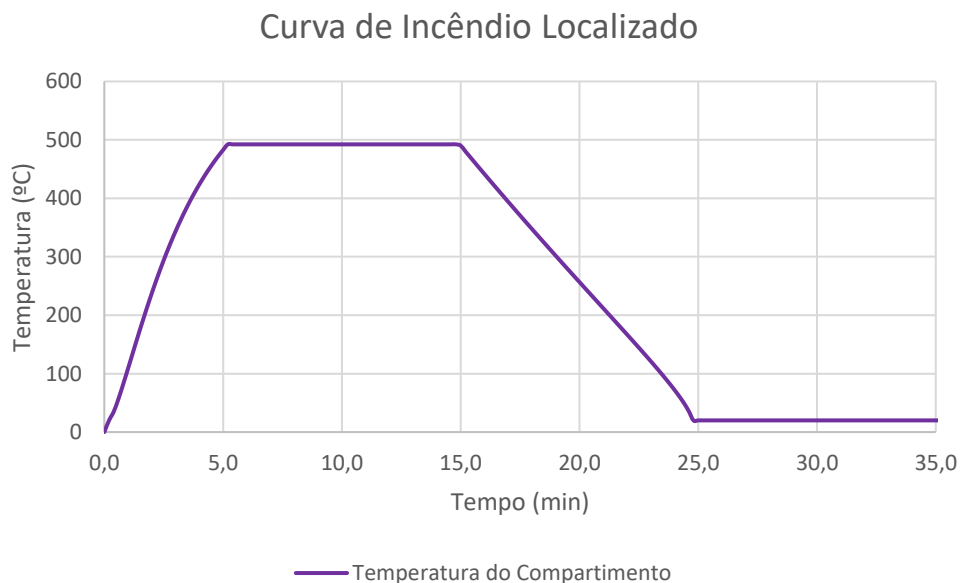
Figura 13 – Esquema do modelo de incêndio localizado de Heskestad



Fonte: EN-1991-1-2:2010.

A figura 14 apresenta a curva de incêndio localizado obtida a partir do programa Elefir-EN (Vila Real e Franssen, 2011), considerando os valores anteriormente citados.

Figura 14 – Gráfico da curva de Incêndio Localizado conforme Elefir-EN



Fonte: Elaborado pelo autor.

A temperatura máxima atingida no compartimento foi de 492,3°C, aos 5 minutos, permanecendo até aproximadamente 15 min do início do incêndio, onde inicia a fase de resfriamento até aproximadamente os 25 min, retornando a temperatura ambiente inicial. A altura máxima da chama (L_f) atingiu 1,42 m e o diâmetro de propagação (D) foi de 2,26m.

Esta curva foi utilizada para as verificações dos tempos de resistência ao fogo dos pavimentos inferiores e vigas isoladas dos itens 7.5 e 7.6.

7.7. Método Empírico

O método empírico baseia-se em cartas de cobertura (Figura 15) pré-dimensionadas onde é relacionado o fator de massividade da seção do elemento e o TRRF, localizando a espessura do material de proteção térmica, considerando uma temperatura preestabelecida (VARGAS e SILVA, 2003):

“Os ensaios realizados no Brasil, para caracterizar um material de proteção térmica de estruturas de aço, têm por base a NBR 5628 “Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo”, os princípios da ASTM E-119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials e da norma Loss Prevention Standard LPS1107.”

Figura 15 – Carta de cobertura para placas de gesso (550°C)

u/A (m ⁻¹)	TRRF (minutos)			
	30	60	90	120
< 55	12,5	12,5	12,5	15
55	12,5	12,5	12,5	2 x 12,5
70	12,5	12,5	12,5	2 x 12,5
98	12,5	12,5	15	2 x 12,5
138	12,5	12,5	2 x 12,5	2 x 12,5
152	12,5	12,5	2 x 12,5	2 x 15
203	12,5	15	2 x 12,5	2 x 15
240	12,5	15	2 x 12,5	3 x 12,5
334	12,5	2 x 12,5	3 x 12,5	3 x 12,5
400	12,5	2 x 12,5	3 x 12,5	3 x 12,5

Fonte: Vargas e Silva (2003)

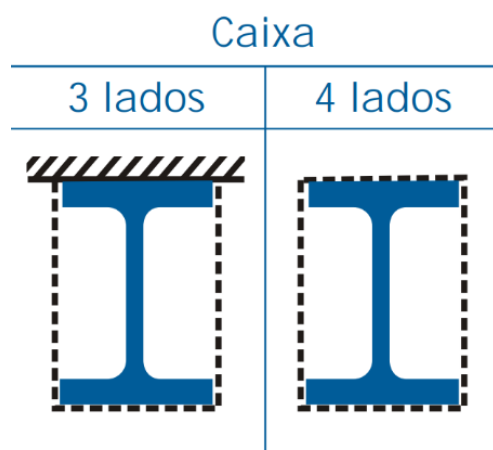
A tabela 10 relaciona a espessura da placa de gesso para os perfis analisados neste estudo, conforme seus respectivos fatores de massividade. O fator de forma foi definido considerando a proteção em caixa (3 lados para vigas e 4 lados para pilares), conforme figura 16.

Tabela 10 – Espessura da proteção conforme recomendação do fabricante.

Estrutura	PERFIL	EXPOSIÇÃO	MASSIVIDADE (m-1)	Placa Gesso (mm)
Pórtico 1	W530X74	3 LADOS	129	12,5
	W610X101	3 LADOS	110	12,5
	CS250X76	4 LADOS	103	12,5
Pórtico 2	W530X72	3 LADOS	137	12,5
	W530X82	3 LADOS	121	12,5
	CS300x76	4 LADOS	123	12,5
Pórtico 3	W530X74	3 LADOS	129	12,5
	W610X101	3 LADOS	110	12,5
	CS250X76	4 LADOS	103	12,5
Pórtico 4	W250X32	3 LADOS	157	12,5
	W310X38	3 LADOS	158	12,5
	CS250X76	4 LADOS	103	12,5
	CS300x76	4 LADOS	123	12,5
Pórtico 5	W250X32	3 LADOS	157	12,5
	W310X38	3 LADOS	158	12,5
	CS250X76	4 LADOS	103	12,5
	CS300x76	4 LADOS	123	12,5
Viga 1	W360X64	3 LADOS	110	12,5
Viga 2	W310X38	3 LADOS	158	12,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Modelo de proteção do perfil.



Fonte: Panonni 2004

Considerando a ocorrência de um incêndio, a luz do modelo de cálculo simplificado e curva de Incêndio Padrão ISO-834, conclui-se que toda a estrutura necessita de proteção para garantir a estabilidade (tempo requerido de resistência ao fogo). A espessura mínima da placa de gesso foi de 12,5 mm para todos os perfis.

7.8. Cálculo da proteção passiva

O dimensionamento da proteção passiva foi realizado considerando as 4 situações de cálculo: incêndio padrão método simplificado, incêndio padrão método avançado, incêndio natural método simplificado, incêndio natural método avançado. A espessura foi encontrada com auxílio dos softwares SAFIR e Elefir-EN (Tabela 11).

Como material de proteção optou-se pela placa de gesso com resistência ao fogo, cujas características físicas são: condutividade térmica = 0,2 W/mK; massa específica = 00 kg/m³; calor específico = 1700 J/KgK; teor de umidade = 20%.

Tabela 11 – Espessura mínima da placa de gesso resistente ao fogo calculada.

Estrutura	Pavimento	ISO-MS	ISO-MA	IN-MS	IN-MA
Pórtico 1	Inferior	2 mm	-	-	-
	Superior	3 mm	3 mm	-	-
	Ambos	3 mm	3 mm	-	-
Pórtico 2	Inferior	2 mm	-	-	-
	Superior	5 mm	3 mm	-	-
	Ambos	5 mm	3 mm	-	-
Pórtico 3	Inferior	-	-	-	-
	Superior	3 mm	3 mm	2 mm	-
	Ambos	3 mm	3 mm	-	-

Estrutura	Pavimento	ISO-MS	ISO-MA	IN-MS	IN-MA
Pórtico 4	Inferior	2 mm	-	-	-
	Superior	-	-	-	-
	Ambos	3 mm	-	-	-
Pórtico 5	Inferior	-	-	-	-
	Superior	-	-	-	-
	Ambos	-	-	-	-
Viga 1	Inferior	2mm	2 mm	-	-
Viga 2	Inferior	3 mm	-	-	-

ISO = curva ISO 834; IN = Incêndio Natural; MS = método simplificado; MA = método avançado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que as espessuras variaram de 2 a 5 mm. Os pavimentos superiores exigiram uma espessura de 3 mm, quando utilizada a curva padrão. Já o pavimento inferior exigiu 2 mm de espessura da proteção. O pórtico 2 apresentou maior exigência de proteção (5 mm de placa de gesso). Cabe ressaltar que estes valores são teóricos, visto que a placa mínima com características de resistência ao fogo possui 12,5 mm de espessura, logo, muito acima do necessário.

7.9. Análise de custos de proteção

A análise de custos da proteção passiva se deu a partir da composição de preços da figura 17. Foram verificados os comprimentos dos perfis que necessitam de proteção, conforme cada situação de cálculo, multiplicando-os ao valor do metro linear da composição.

O custo unitário utilizado foi o menor disponível no dia da consulta, podendo variar conforme fabricante e tipo de composição da placa de gesso com resistência ao fogo (inserção de vermiculita e fibra de vidro na composição do material).

Os resultados são delineados na tabela 12, dividido por método de cálculo e curva de incêndio utilizadas. Para cada pórtico analisado, os valores são apresentados para os pavimentos inferior e superior separadamente, seguindo do valor da proteção para ambos pavimentos. O custo total por método de análise da estrutura é o somatório dos custos individuais de cada pórtico (pavimento inferior mais pavimento superior) acrescido dos custos das vigas isoladas.

Figura 17 – Composição de custo básico unitário para placa de gesso resistente ao fogo (R\$/m)

Insumo	Un	Descrição	Rend.	Preço unitário	Preço Insumo
mt12pmk010a	m²	Placa de gesso acartonado reforçada com tecido de fibra GM-F / 1200 / 2600 / 15 / com as bordas longitudinais quadrados, especial Fireboard GM-F "KNAUF" com alma de gesso e faces revestidas com uma lâmina de fibra de vidro.	1,428	58,21	83,12
mt12psg115	Un	Grampo para fixação de placas, segundo DIN 18182.	37,000	0,58	21,46
mt12pmk012a	kg	Massa de juntas Fireboard Spachtel "KNAUF", de pega normal (45 minutos), intervalo de temperatura de trabalho de 10 a 35°C, Euroclasse A1 de reação ao fogo, para aplicação manual com fita de juntas.	2,550	3,74	9,54
mt12pmk013	m	Fita de juntas Fireboard "KNAUF".	2,000	0,17	0,34
mo053	h	Montador de pré-fabricados interiores.	0,541	30,04	16,25
mo100	h	Ajudante de montador de pré-fabricados interiores.	0,541	20,69	11,19
	%	Custos diretos complementares	2,000	141,90	2,84
Custo de manutenção decenal: R\$ 108,66 nos primeiros 10 anos.				Total:	144,74

Fonte: <http://geradordeprecos.cype.pt/> (acesso em 02/03/2018).

Tabela 12 – Custo da proteção conforme método de cálculo para placa de gesso resistente ao fogo de 15 mm.

Estrutura	Pavimento	ME	ISO-MS	ISO-MA	IN-MS	IN-MA
Pórtico 1	Inferior	R\$ 4.776,42	R\$ 1.519,77	-	-	-
	Superior	R\$ 4.776,42	R\$ 1.519,77	R\$ 1.519,77	-	-
	Ambos	R\$ 9.552,84	R\$ 3.039,54	R\$ 1.519,77	-	-
Pórtico 2	Inferior	R\$ 4.776,42	R\$ 1.519,77	-	-	-
	Superior	R\$ 4.776,42	R\$ 1.953,99	R\$ 1.953,99	-	-
	Ambos	R\$ 9.552,84	R\$ 3.473,76	R\$ 1.953,99	-	-
Pórtico 3	Inferior	R\$ 4.776,42	-	-	-	-
	Superior	R\$ 4.776,42	R\$ 1.519,77	R\$ 1.519,77	R\$ 1.519,77	-
	Ambos	R\$ 9.552,84	R\$ 1.519,77	R\$ 1.519,77	-	-
Pórtico 4	Inferior	R\$ 2.894,80	R\$ 1.157,92	-	-	-
	Superior	R\$ 2.894,80	-	-	-	-
	Ambos	R\$ 5.789,60	R\$ 1.157,92	-	-	-
Pórtico 5	Inferior	R\$ 2.894,80	-	-	-	-
	Superior	R\$ 2.894,80	-	-	-	-
	Ambos	R\$ 5.789,60	-	-	-	-
Viga 1	Inferior	R\$ 1.013,18	R\$ 1.013,18	R\$ 1.013,18	-	-
Viga 2	Inferior	R\$ 723,70	R\$ 723,70		-	-
Custo Total:		R\$ 41.974,60	R\$ 10.927,87	R\$ 6.006,71	R\$ 1.519,77	R\$ 0,00

ME = Método Empírico; ISO = curva ISO 834; IN = curva de Incêndio Natural;

MS = método simplificado; MA = método avançado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos encontrados variaram de R\$ 41.974,60 o dimensionamento da proteção utilizando métodos empíricos (tabelados), a custo zero para método avançado de cálculo utilizando curva de incêndio natural.

A estrutura metálica dimensionada possui peso equivalente a 12.654,51 kg. Considerando o valor estimado do kg do aço de R\$ 4,08, o preço estimado para a estrutura metálica é de R\$ 51.630,40. Em termos percentuais, a proteção passiva dimensionada por métodos empíricos, equivale a 81% do valor da obra. Para o modelo ISO-MS o custo equivale a aproximadamente 21%, enquanto que para os modelos ISO-MA e IN-MS assume os valores percentuais de 11% e 3%, respectivamente. Para o caso IN-MA não há custo.

Entre os métodos de cálculo que utilizaram a curva ISO-834, houve uma variação de 55% do custo de proteção. Para o incêndio natural, apenas o pórtico 3 apresentou custo (este foi devido a proteção de uma viga no pavimento superior). Para o incêndio natural com método avançado de cálculo, não houve necessidade de proteção, logo, custo zero.

8. CONCLUSÕES

Em uma situação de incêndio, uma estrutura deve assegurar um tempo mínimo de resistência ao fogo, que possibilite evacuação dos ocupantes de forma segura. Com este estudo foi possível verificar uma variabilidade de resultados para o dimensionamento de uma estrutura em aço em situação de incêndio.

Inicialmente, no dimensionamento a frio, as vigas principais dos pórticos 1, 2 e 3 dos pavimentos superiores apresentaram limitação quanto a esbeltez, mesmo para perfis mais robustos. Logo, foi necessário a implementação de vigas de travamento nestes elementos, sendo possível utilizar perfis mais leves.

A análise do tempo requerido de resistência ao fogo, para a edificação em estudo, mostrou-se mais conservadora para uma verificação utilizando a curva de incêndio padrão ISO-834. Verificou-se que para esta situação quatro dos cinco pórticos analisados apresentaram tempo de resistência ao fogo menor do que o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) recomendado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Tocantins.

Para uma verificação por método avançado de cálculo utilizando a curva ISO-834, os pavimentos inferiores apresentaram um aumento do tempo requerido de resistência ao fogo, o que vem a favor da segurança. Contudo nos pórticos superiores ocorreram redução do tempo, levando a estrutura ao colapso mais precocemente.

Comparando os resultados entre a curva de incêndio padrão e curva de incêndio natural, verificou-se evolução significativa quanto a segurança, em favor da curva de incêndio natural. Percebe-se que para ambos métodos de cálculo (simplificado e avançado), a temperatura máxima dos perfis manteve-se abaixo da temperatura crítica de colapso. Excetua-se somente o pavimento superior do pórtico 3, que para o método simplificado utilizando a curva de incêndio natural, teve seu tempo de resistência ao fogo menor do que o TRRF preconizado.

Para a análise baseada em valores empíricos tabelados, cuja única variável é o fator de massividade, verificou-se que em todas as situações há necessidade de proceder um revestimento para assegurar a estabilidade dimensional frente uma situação de incêndio.

Diante do exposto, foi possível verificar que do ponto de vista do custo de implantação de proteção passiva, o método tabelado mostrou-se ser o mais oneroso, seguido do método simplificado com curva ISO-834, método avançado com curva

ISO-834, método simplificado com curva parametrizada (incêndio natural) e método avançado com curva parametrizada.

Portanto, para este estudo, a utilização da curva de incêndio natural mostrou ser mais economicamente viável, em relação a curva de incêndio padrão ISO-834 e que a utilização de método de cálculo avançado demonstra ser mais conservadores em algumas situações analisadas.

Ressalta-se que este estudo contempla apenas um modelo específico de edificação, recomendando-se que estudos posteriores baseados em outras edificações sejam realizados para confirmação dos resultados obtidos.

Por fim, pode-se concluir que, quando se faz um estudo real do cenário de incêndio e análise avançada, há uma economia muito grande na proteção das estruturas metálicas contra incêndio, viabilizando uso do aço em edificações.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo abordou um modelo específico de edificação, permitindo preceder a análise comparativa para a estrutura em questão. Contudo, para uma melhor compreensão do tema abordado, recomendando-se que estudos posteriores baseados em outras edificações sejam realizados para confirmação dos resultados obtidos.

Desta forma sugere-se que sejam realizados outros estudos comparativos variando o modelo e utilização da edificação: edifícios industriais, com dimensões variadas; edifícios residenciais com múltiplos pavimentos e galpões com dimensões variadas.

10. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio. **NBR 14323**. Rio de Janeiro. 2013.

_____. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. **NBR 6120**. Rio de Janeiro. 1980.

_____. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. **NBR 14432**. Rio de Janeiro. 2001.

_____. Projeto de Estruturas de Aço e de estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. **NBR 8800**. Rio de Janeiro. 2008.

CEN, European Committee for Standardisation. **EN 1991–1–2:2010**, Eurocode 3, Actions on structures – Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire". ICS: 13.220.50; 91.010.30; 91.808.40.

_____. **EN 1993–1–2:2010**, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules - Structural fire design". ICS: 13.220.50; 91.010.30; 91.808.40.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. **Revisão história das curvas padronizadas de incêndio**. NUTAU, 2006. Disponível em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/nutau/costa.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

FRANSSEN, Jean Marc. SAFIR: A thermal/structural program modelling structures under fire. **Engineering Journal**, A.I.S.C., vol. 42.

LANDESMANN, Alexandre. **Modelo não-linear inelástico para análise de estruturas metálicas aporricadas em condições de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

MESQUITA, Alex. **Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Lisboa. Portugal. 2013.

PANONNI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5. ed. São Paulo: Gerdau Açominas, 2011. Coletânea do uso do aço. 2ª. ed. vol. 2. 75p.

REIS, André da Silva. **Determinação de cenários de incêndio em edifícios**. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Portugal. 2011.

SILVA, Thiago Dias de Araújo e. **Buckling lengths of columns in unbraced steel frames exposed to fire**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Portugal. 2016.

SILVA, Valdir Pignatta. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Editora Zigurat, 2001. 249p. ISBN: 85-85570-04-0.

TOCANTINS. Decreto nº 3.950, de 25 de janeiro de 2010. Institui normas técnicas de competência do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Tocantins – CBMTO. **Diário Oficial do Estado**, Palmas, TO, 29 jan. 2010. Anexo VI, p. 30.

_____. Decreto nº 3.950, de 25 de janeiro de 2010. Institui normas técnicas de competência do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Tocantins – CBMTO. **Diário Oficial do Estado**, Palmas, TO, 29 jan. 2010. Anexo IX, p. 48.

VILA REAL, Paulo. **Incêndio em estruturas metálicas – cálculo estrutural**. 4. ed. Lisboa: Editora Orion, 2003. 374p. ISBN: 972-8620-04-7.

Vila Real, Paulo, Franssen, Jean Marc (2011). "Elefir-EN V1.4.3 (2011), Software for fire design of steel structural members according the Eurocode 3". Disponível em: <<http://elefired.web.ua.pt>>. Acesso em 05 de janeiro de 2018.

WANG, Yong Chang. **Steel and Composite Structures – Behavior and Design for fire Safety**. London: Spon Press, 2002. 352p. ISBN 0-415-24436-6.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS / Centro Brasileiro de Construção em Aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2003. 76p.