

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA

ANA PAULA PASTORELLO

**DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE AÇO, EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, COM
DIFERENTES PROTEÇÕES PASSIVAS**

BENTO GONÇALVES
2020

ANA PAULA PASTORELLO

**DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE AÇO, EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, COM
DIFERENTES PROTEÇÕES PASSIVAS**

Trabalho de conclusão de curso, voltado para a área estrutural, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul - UCS, como requisito parcial à obtenção de título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva

BENTO GONÇALVES

2020

ANA PAULA PASTORELLO

**DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE AÇO, EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, COM
DIFERENTES PROTEÇÕES PASSIVAS**

Trabalho de conclusão de curso, voltado para a área estrutural, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul - UCS, como requisito parcial à obtenção de título de Engenheiro Civil.

Aprovado em: ____/____/____

Banca examinadora

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Luciano Zatti
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Esp. Sergio Paulo da Silva Pacheco
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

O incêndio é um fator crítico para qualquer tipo de edificação, porém quando analisado seu efeito no aço estrutural, ocorrem grandes impactos nas propriedades físicas e mecânicas, sofrendo reduções consideráveis de suas capacidades portante, devido ao aumento rápido de temperatura. A fim de mitigar efeitos drásticos e perdas catastróficas em virtude do incêndio, utilizam-se proteções passivas na estrutura de aço para que possam retardar a queda de suas propriedades. Diante disso, este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo dimensionar uma edificação residencial multifamiliar de aço, em situação de incêndio, com a aplicação de três proteções térmicas: argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha. Além de comparar as eficiências técnicas e o comportamento entre os materiais de proteção aplicados na viga de aço onde ocorre a situação com a maior flexão. Nessa situação, todas as proteções utilizadas no dimensionamento cumpriram o papel de retardar a queda de resistência e rigidez para o tempo requerido à resistência contra o fogo, todavia a proteção que apresentou o melhor comportamento técnico foi a argamassa projetada de vermiculita, reduzindo 89,67% da temperatura que atinge a seção transversal do elemento estrutural.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Desempenho estrutural. Proteção passiva. Viabilidades. Situação de incêndio.

ABSTRACT

Fire is a critical factor for any type of building, but when its effect on structural steel is analyzed, there are major impacts on physical and mechanical properties, suffering considerable reductions in its bearing capacity, due to the rapid increase in temperature. To mitigate drastic effects and catastrophic losses due to the fire, passive protections are used in the steel structure so that they can delay the fall of its properties. Therefore, this study aims to analyze a steel structure in a fire situation with the application of three thermal protections: among projected vermiculite mortar, plasterboard and rock wool blanket. In addition to comparing technical efficiencies and behavior between the protective materials applied to the steel beam where the situation with the greatest flexion occurs. In this situation, all the protections used in the design fulfilled the role of delaying the drop in strength and stiffness for the time required to resist fire, however the protection that showed the best technical behavior was the mortar designed with vermiculite, reducing 89.67 % of the temperature that reaches the cross section of the structural element.

Keywords: Steel structures. Structural performance. Passive protection. Viabilities. Fire Situation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da temperatura do gases no incêndio	19
Figura 2 - Curva de incêndio-padrão	21
Figura 3 - Ilustração representativa do incêndio de Roma	21
Figura 4 - Foto após o incêndio em Cleveland (Ohio)	22
Figura 5 - Foto do incêndio no Edifício Andraus (SP)	22
Figura 6 - Foto após desabamento parcial do Edifício CESP (SP)	23
Figura 7 - Boate Kiss em Santa Maria (RS) após o incêndio	23
Figura 8 - Curva de incêndio-padrão com/sem material de proteção	27
Figura 9 - Proteção tipo contorno	29
Figura 10 - Proteção tipo caixa	30
Figura 11 - Proteção tipo tinta intumescente	30
Figura 12 - Aplicação de argamassa projetada	31
Figura 13 - Aparência da argamassa projetada após sua aplicação	31
Figura 14 - Plataforma P-19 Petrobrás com argamassa de vermiculita	32
Figura 15 - Placa de gesso acartonado revestindo o perfil metálico	33
Figura 16 - Detalhe da placa de gesso acartonado	33
Figura 17 - Edifício Palácio do Comércio (SP) com placas de gesso acartonado	34
Figura 18 - Colocação da manta de lã de rocha	35
Figura 19 - Detalhe da manta de lã de rocha	35
Figura 20 - Centro Empresarial do Aço (SP) com manta de lã de rocha	36
Figura 21 - Redução de resistência e rigidez com a elevação da temperatura	39
Figura 22 - Alongamento térmico do aço em função da temperatura	40
Figura 23 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura	40
Figura 24 - Calor específico do aço em função da temperatura	41
Figura 25 - Facha leste do edifício residencial multifamiliar em análise	53
Figura 26 - Pré-dimensionamento de elementos	55
Figura 27 - Modelagem estrutural	57
Figura 28 - Diagrama de momento fletor da V15	62
Figura 29 - Localização da V15 na edificação	63
Figura 30 - Evolução da temp. das vigas sem proteção para TRRF 30 min	64
Figura 31 - Diagrama de momento fletor da V10	64

Figura 32 - Localização da V10 na edificação.....	65
Figura 33 - Evolução da temp. das vigas com as proteções para TRRF 30 min.....	67
Figura 34 - Tempo x Início da redução de resistência com as proteções	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos aços estruturais	26
Tabela 2 - Propriedades da argamassa de vermiculita	32
Tabela 3 - Propriedades da placa de gesso acartonado	34
Tabela 4 - Propriedades da manta de lã de rocha	36
Tabela 5 - Fatores de redução do aço em função da temperatura.....	38
Tabela 6 - Resumo do TRRF pela ABNT NBR 14432 (2000)	43
Tabela 7 - Fatores de correção K1 e K2	47
Tabela 8 - Cargas e parâmetros a serem utilizados no <i>software SCIA Engineer</i>	54
Tabela 9 - Parâmetros para o pré-dimensionamento de pilares e vigas	55
Tabela 10 - Combinações de ações para ELU e ELS sem carga térmica.....	58
Tabela 11 - Parâmetros para o TRRF	59
Tabela 12 - Parâmetros para temp. das vigas sem proteção no tempo 30 min	59
Tabela 13 - Combinação de ações para ELU e ELS com carga térmica	60
Tabela 14 - Parâmetros para temp. das vigas com proteções no tempo 30 min.....	61
Tabela 15 - Fator de redução do aço para a V10 sem proteção térmica	66
Tabela 16 - Resumo de parâmetros e temp. do aço com proteções passivas	67
Tabela 17 - Fator de redução do aço para as vigas com as proteções passivas	68
Tabela 18 - Tempo início da redução de resistência das vigas com proteções	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades dos materiais de proteção.....	28
Quadro 2 - Resumo dos fatores de massividade para elementos com proteção	50

LISTA DE SIGLAS

H	ALTURA
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
CESP	COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO
CO ₂	DIÓXIDO DE CARBONO
SO ₂	DIÓXIDO DE ENXOFRE
ELS	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO
ELU	ESTADO LIMITE ÚLTIMO
EUA	ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA
FLT	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO
FLM	FLAMBAGEM LOCAL DE MESA
°C	GRAUS CÉLSIUS
DIN	INSTITUTO ALEMÃO PARA NORMATIZAÇÃO
J	JAULE
kN	KILONEWTON
MPa	MEGAPASCAL
m	METRO
m ³	METRO CÚBICO
m ²	METROS QUADRADO
mm	MILÍMETROS
NBR	NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA
O ₂	OXIGÊNIO
RS	RIO GRANDE DO SUL
kg	QUILOGRAMA
UK	REINO UNIDO
SP	SÃO PAULO
s	SEGUNDOS
ASTM	SOCIEDADE AMERICANA DE ENSAIOS DE MATERIAIS
H ₂ S	SULFETO DE HIDROGÊNIO
TRRF	TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO
W	WATT
min	MINUTOS

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

%	Por cento
ρa	Massa específica
ϵ	Módulo de elasticidade
νa	Coeficiente de Poisson regime elástico
ν	Coeficiente de Poisson regime plástico
G_a	Módulo transversal de elasticidade
βa	Coeficiente de dilatação térmica
Δl	Alongamento
θ_a	Temperatura
λa	Condutividade térmica
ca	Calor específico
$K_{y,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento à temperatura
$K_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade à temperatura
$S_{fi,d}$	Solicitação de cálculo
$R_{fi,d}$	Resistência de cálculo do elemento estrutural
γ_{gi}	Coeficiente de ponderação para as ações permanentes diretas
$F_{Gi,k}$	Valor nominal da ação permanente direta
$F_{Q,exc}$	Valor nominal das ações térmicas decorrentes do incêndio
F_{Qk}	Valor nominal das ações variáveis devidas às cargas acidentais
A_g	Área bruta da seção transversal
f_y	Resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente
χ_{fi}	Fator de redução à resistência à compressão em situação de incêndio
Q_{fi}	Coeficiente de redução à flambagem local em situação de incêndio
λ_o	Índice de esbeltez reduzido para compressão à temperatura ambiente
K_1	Fator de correção para a seção transversal da barra
K_2	Fator de correção para o comprimento da barra
λ	Parâmetro de esbeltez para o ELU
λ_p	Parâmetro de esbeltez para o ELU à plastificação
λ_r	Parâmetro de esbeltez para o ELU ao início do escoamento
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente

M_{pl}	Momento de plastificação da seção transversal à temperatura ambiente
M_r	Momento fletor ao início do escoamento da seção transversal
C_b	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
V_{pl}	Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
U_m	Perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio
A	Área da seção transversal do elemento estrutural
Φ	Valor do fluxo de calor por unidade de área
Δt	Intervalo de tempo
φ_c	Componente do fluxo de calor devido à convecção
φ_r	Componente do fluxo de calor devido à radiação
α_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
θ_g	Temperatura dos gases
ε_{res}	Emissividade resultante
cm	Calor específico do material de proteção contra o incêndio
t_m	Espessura do material de proteção contra incêndio
$\theta_{a,t}$	Temperatura do aço no tempo t
$\theta_{g,t}$	Temperatura dos gases no tempo t
λ_m	Condutividade térmica do material de proteção contra incêndio
ρm	Massa específica do material de proteção contra incêndio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	TEMA DA PESQUISA	166
1.2	QUESTÃO DA PESQUISA.....	16
1.3	OBJETIVO.....	16
1.3.1	Objetivos Específicos	16
1.4	HIPÓTESE	16
1.5	PRESSUPOSTOS.....	17
1.6	PREMISSAS E DELIMITAÇÕES.....	17
1.7	LIMITAÇÕES.....	17
2	O INCÊNDIO E A CIÊNCIA DO FOGO.....	18
2.1	OS ESTÁGIOS DO INCÊNDIO E A TEMPERATURA DOS GASES	18
2.2	OS PRINCIPAIS INCÊNDIOS NO BRASIL E NO MUNDO	21
3	APLICAÇÃO DO AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL.....	25
3.1	CARACTERÍSTICAS DO AÇO ESTRUTURAL	25
3.1.1	Principais Tipos de Aços Estruturais	25
3.1.2	Propriedades dos Aços Estruturais.....	26
3.2	MATERIAIS DE PROTEÇÃO CONTRA O FOGO	27
3.2.1	Propriedades dos Materiais de Proteção	28
3.2.2	Principais Tipos de Materiais de Proteção.....	29
3.2.2.1	Proteções tipo Contorno	30
3.2.2.1.1	<i>Argamassa Projetada de Vermiculita</i>	<i>31</i>
3.2.2.2	Proteções tipo Caixa	32
3.2.2.2.1	<i>Placa de Gesso Acartonado.....</i>	<i>33</i>
3.2.2.2.2	<i>Manta de Lã de Rocha</i>	<i>35</i>
4	COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	37
4.1	IMPACTO DO INCÊNDIO E DESEMPENHO ESTRUTURAL	37
4.2	DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL	41
4.2.1	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo	42
4.2.2	Dimensionamento Estrutural Método Simplificado de Cálculo.....	44
4.2.2.1	Segurança e Ações	44
4.2.2.2	Resistência Nominal de Elementos Estruturais de Aço.....	45
4.2.2.2.1	<i>Barra Tracionada.....</i>	<i>45</i>
4.2.2.2.2	<i>Barra Comprimida</i>	<i>46</i>
4.2.2.2.3	<i>Barra Fletida.....</i>	<i>47</i>
4.2.2.2.4	<i>Barra Cisalhada.....</i>	<i>48</i>
4.2.2.3	Análise Termo Estrutural de Elementos	49
4.2.2.3.1	<i>Elementos Estruturais sem Proteção Contra Incêndio</i>	<i>50</i>
4.2.2.3.2	<i>Elementos Estruturais com Proteção Contra Incêndio</i>	<i>51</i>

5	METODOLOGIA	53
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO	53
5.2	DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA	54
5.3	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL.....	56
5.3.1	Parâmetros da Edificação.....	56
5.3.2	Cenário do Incêndio	58
5.3.2.1	Elemento Estrutural sem Proteções Passivas	59
5.3.2.2	Elemento Estrutural com Proteções Passivas	60
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
6.1	ELEMENTO ESTRUTURAL SEM PROTEÇÕES PASSIVAS	62
6.1.1	Elemento Estrutural sem Carga Térmica	62
6.1.2	Elemento Estrutural com Carga Térmica	63
6.2	ELEMENTO ESTRUTURAL COM PROTEÇÕES PASSIVAS	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	APÊNDICE A	75

1 INTRODUÇÃO

A utilização do aço torna-se uma das melhores alternativas construtivas, possuindo um papel importante para a economia e sustentabilidade do mundo e está cada vez mais presente na construção civil por permitir fundações reduzidas, grandes vãos livres, execução de obras limpas, racionalizadas e pilares esbeltos, em função da sua resistência e ductilidade. Além de ser consideravelmente leve, apesar de ter alto peso específico, é utilizado em perfis de dimensões reduzidas, tornando o seu peso próprio reduzido.

Uma vez que muitos edifícios têm sido construídos com elementos estruturais de aço, estes também necessitam apresentar segurança contra o incêndio. Pois, como em outros materiais estruturais, quando submetidos à altas temperaturas, o aço perde resistência e rigidez.

Os acabamentos de proteção térmica vêm ao encontro a evitar o aumento excessivo da temperatura das estruturas e a retardar a queda de resistência e rigidez, e assim minimizar o risco à vida e perda patrimonial. Diante disso, as estruturas de aço requerem uma proteção passiva contra o incêndio, visando manter a integridade do elemento estrutural, sem apresentar fissuras por um determinado período e evitar um possível colapso na edificação. Entre as soluções mais utilizadas para a proteção passiva de uma estrutura de aço, em situação de incêndio, com a função de mitigar a evolução da temperatura dentro do seu perfil, são os tipos, contorno (possuindo a forma de argamassa), caixa (placas rígidas) e tinta intumescente.

Tendo em vista as alternativas de proteção contra o incêndio, este trabalho de conclusão de curso abordou o dimensionamento de uma edificação residencial multifamiliar de aço, em situação de incêndio, com três alternativas diferentes de proteções térmicas (argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha) e comparou as eficiências técnicas e o comportamento entre os materiais de proteção aplicados na viga de aço onde ocorre a situação com a maior flexão para um tempo requerido à resistência contra o fogo.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Análise de estruturas de aço em situação de incêndio.

1.2 QUESTÃO DA PESQUISA

Utilizando três alternativas diferentes de proteções passivas (argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha), como realiza-se o dimensionamento de uma edificação de aço em situação de incêndio?

1.3 OBJETIVO

Dimensionar uma edificação residencial multifamiliar de aço, em situação de incêndio, utilizando três proteções térmicas: argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha.

1.3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) estipular a estrutura para um determinado tempo requerido à resistência contra o fogo (TRRF) pela ABNT NBR 14432 (2000);
- b) realizar o dimensionamento de estruturas de aço, em situação de incêndio, através do método simplificado da ABNT NBR 14323 (2013);
- c) comparar as eficiências técnicas e o comportamento entre os materiais de proteção na viga de aço onde ocorre a situação com a maior flexão, utilizando argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado, e manta de lã de rocha.

1.4 HIPÓTESE

Seguindo as recomendações normativas, prescrições de órgãos e hipóteses do cenário de incêndio, realiza-se o dimensionamento de uma edificação de aço em situação de incêndio com a utilização de proteções térmicas.

1.5 PRESSUPOSTOS

O método simplificado da NBR 14323 (2000) é coerente e suficiente para a avaliação do tempo requerido à resistência de estruturas de aço, em situação de incêndio.

1.6 PREMISSAS E DELIMITAÇÕES

Este projeto delimitou-se em analisar o comportamento das vigas de aço aparentes, em situação de incêndio, de uma edificação residencial multifamiliar.

1.7 LIMITAÇÕES

Os elementos são analisados de forma isolada, a partir de um cenário de incêndio, não levando em consideração a estrutura como um todo e não realizando uma simulação real do incêndio.

2 O INCÊNDIO E A CIÊNCIA DO FOGO

O fogo é uma reação exotérmica que libera grande quantidade de energia e de luz. Cesarino (2018) explica que a sua existência se dá em função do tetraedro do fogo: quatro componentes básicos (comburente, combustível, calor e reação química em cadeia), que estão diretamente relacionados com o desenvolvimento das chamas.

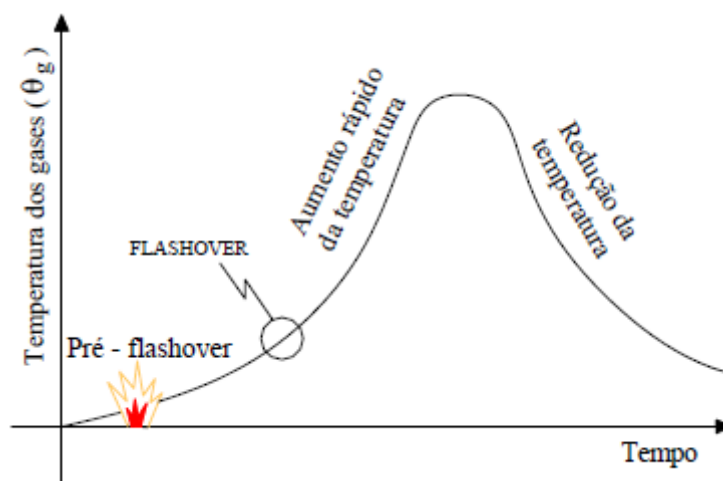
Segundo o Corpo de Bombeiros do Paraná (2004), o comburente é o elemento que ativa a combustão, sendo o O_2 o mais comum, o combustível é a substância capaz de queimar e alimentar a combustão, o calor é a forma de energia responsável por elevar a temperatura e possui um caráter intrínseco, pois tanto se origina quanto é liberado. Por fim, gera-se a reação química em cadeia, a qual torna a queima autossustentável. Nos tópicos a seguir, abordam-se os estágios do incêndio, a temperatura dos gases e alguns dos principais incêndios no Brasil e no mundo.

2.1 OS ESTÁGIOS DO INCÊNDIO E A TEMPERATURA DOS GASES

A principal característica de um incêndio, quando relacionado a elementos estruturais, é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, conforme Figura 1. Para Martins (2000), a partir dessa curva é possível calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais, e com isso, a sua correspondente resistência.

Souza (2004) afirma que os incêndios em locais abertos se comportam de forma diferente dos incêndios em locais fechados, isso porque as paredes e o teto, principalmente, têm o efeito de aumentar o calor radiante retornado para a superfície do material combustível. Além disso, Martins (2000) indica que a elevação da temperatura dos gases depende da geometria do compartimento incendiado, das características térmicas dos materiais de vedação, da quantidade de material combustível e do grau de ventilação do ambiente.

Figura 1 - Evolução da temperatura do gases no incêndio



Fonte: Martins (2000).

O incêndio de um modo geral possui quatro estágios, segundo Cesarino (2018): ignição, responsável por dar energia o suficiente para iniciar a reação em cadeia, seguido pelas fases de aquecimento, resfriamento, até a extinção do incêndio.

Na fase inicial, ignição, há a abundância de O_2 e é necessária uma energia externa para que haja o desenvolvimento do calor inicial. Conforme aponta Cesarino (2018), os gases tóxicos são suficientes para preencher o compartimento, ocasionados pela inflamação sucessiva dos objetos existentes no recinto, de acordo com a alimentação do ar, mas como as temperaturas ainda são bem baixas, não causam danos à estrutura.

Os focos de incêndio, deste modo, originam-se em locais onde fontes de calor e materiais combustíveis são encontrados juntos, de tal forma que ocorrendo a decomposição do material pelo calor são desprendidos gases que podem se inflamar (CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO, 2018, p.9).

Cesarino (2018) afirma que, após a iniciação da reação em cadeia, a chama pode começar a se propagar, dando início a fase de aquecimento, onde os materiais próximos às chamas podem começar a entrar em combustão, elevando a temperatura rapidamente de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. A taxa de O_2 despenca para 20% e nesse momento ocorre a pirolise, que é a quebra das moléculas da superfície dos materiais liberando um gás que é inflamável, e a reação em cadeia se torna contínua.

Como descrito por Souza (2004), a partir disso, tem-se a inflamação generalizada, onde a estrutura já começa a ser impactada, as chamas podem atingir os compartimentos superiores e o incêndio deverá ser contido pelas medidas de proteção passiva. A evacuação deverá ser imediata, já se tornando complexo o combate do fogo pelas equipes do corpo de bombeiro, diminuindo ainda mais as chances de sobrevivência, por isso os elementos estruturais deverão ser projetados para que resistam por um determinado tempo.

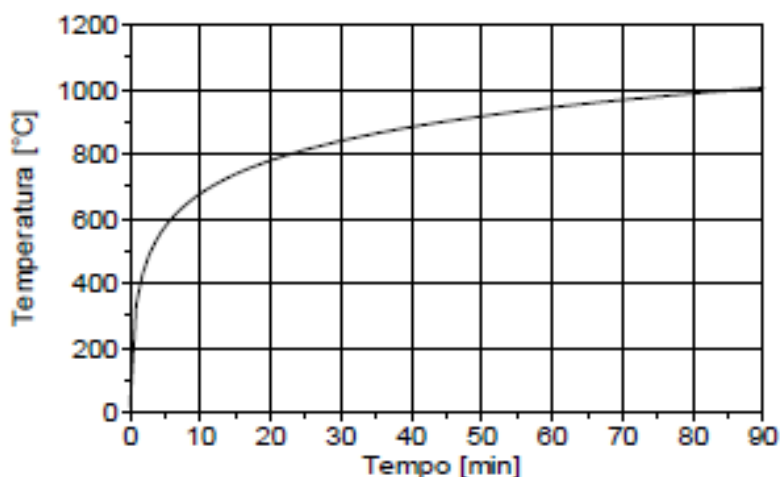
A partir da fase de desenvolvimento das chamas, denominado *flash over*, segundo Souza (2004), ocorre uma aceleração no crescimento do incêndio e ele se instala em outros compartimentos da edificação, podendo impactar também as estruturas vizinhas. “Nesta fase, pode haver comprometimento da estabilidade da edificação devido à elevação da temperatura nos elementos estruturais.” (CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO, 2018, p.9).

Ainda para o Corpo de Bombeiro de São Paulo (2018), o tempo para o incêndio chegar na inflamação generalizada é relativamente curto e depende, essencialmente, dos acabamentos utilizados no ambiente. Nesse momento a edificação pode entrar em colapso, as temperaturas podem atingir 1000 °C, a taxa de O₂ reduzir para menos de 20% e a concentração de gases tóxicos é abundante.

Por fim, ocorre a fase de resfriamento, Cesarino (2018), explica que, se o edifício ainda não colapsou, todas as partições daquele compartimento já devem ter sido totalmente consumidas. Com o consumo dos combustíveis existentes no local ou pela falta de O₂, não há mais a reação em cadeia e nesse momento a chama e a temperatura começam a decair, porém, ainda há muita presença de gases tóxicos. Após esta fase, as equipes de combate já conseguem extinguir o incêndio, e com a queda da temperatura ocorre o resfriamento e reconstituição das propriedades dos materiais e as estruturas começam a ter a recomposição total ou parcial das propriedades dos seus materiais.

Segundo Ruschel (2011), com a finalidade de facilitar os procedimentos de ensaios e projetos de estruturas, padronizou-se o incêndio por curvas nominais, independente do cenário de incêndio. Essas curvas, denominadas incêndio-padrão, relacionam o aumento da temperatura com o tempo, conforme Figura 2. “A principal característica é a de possuir apenas um ramo ascendente, admitindo, portanto, que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo.” (RUSCHEL, 2011, p,28).

Figura 2 - Curva de incêndio-padrão



Fonte: Souza (2004).

2.2 OS PRINCIPAIS INCÊNDIOS NO BRASIL E NO MUNDO

O primeiro grande incêndio registrado, de acordo com Silva (2012) foi o de Roma, em 19 de julho do ano de 64 d.C., a qual foi a primeira cidade do mundo a adotar sistemas de alarmes anti-incêndio, após a tragédia. A propagação do incêndio pela cidade durou nove dias e os fatores principais pelo descontrole do fogo foram pelas residências serem contíguas e feitas de madeira, além da presença de ventos e das ruas serem estreitas, por isso, estima-se que três quartos da cidade foram destruídos e milhares de pessoas morreram, como ilustrado na Figura 3.

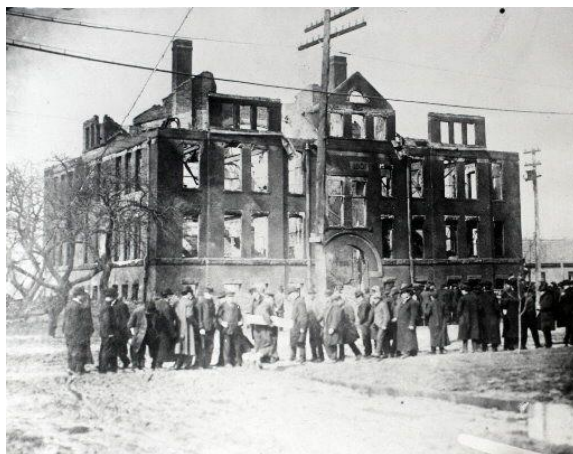
Figura 3 - Ilustração representativa do incêndio de Roma



Fonte: Maria Paola Macioci (2019).

Segundo Silva (2012), outro grande incêndio foi em Cleveland (Ohio), no *Lake View Elementary School*, o qual ocorreu em 4 de abril de 1908, 172 crianças e 2 professores morreram, conforme destruição observada na Figura 4. A partir dessa tragédia, os EUA melhoraram os códigos, normas e os exercícios de escape e de combate ao incêndio.

Figura 4 - Foto após o incêndio em Cleveland (Ohio)



Fonte: Cleveland (2016).

O primeiro grande incêndio no Brasil, em prédios elevados, ocorreu em 24 de fevereiro de 1972, em São Paulo (SP) e resultou em 16 mortos e 336 feridos, ainda para Silva (2012). Graças a existência de um heliponto na cobertura, as pessoas que se deslocaram para lá permaneceram protegidas pela laje e pelos beirais, o que possibilitou a redução do número de vítimas, visto na Figura 5.

Figura 5 - Foto do incêndio no Edifício Andraus (SP)



Fonte: Safety (2020).

O Corpo de Bombeiros de São Paulo (2018) cita também o incêndio no Edifício CESP (SP), em 21 de maio de 1987, atingindo dois blocos com 21 e 27 pavimentos cada. O principal motivador do incêndio foram as lajes nervuradas com as formas de madeira, as quais não foram retiradas do local. Em função da propagação de incêndio entre blocos, ocorreu o colapso da estrutura com desabamento parcial, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Foto após desabamento parcial do Edifício CESP (SP)



Fonte: Safety (2020).

Por fim, um dos incêndios com maior repercussão e número de mortes no Brasil é o da Boate Kiss, ocorrido em Santa Maria (RS), no dia 27 de janeiro de 2013 (Figura 7). “[...] deixou 242 mortos e 680 feridos. O fogo começou com a utilização indevida de fogos de artifício durante a apresentação de uma banda, porém, uma série de fatores adversos contribuiu para a dimensão da tragédia.” (CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO, 2018, p.5).

Figura 7 - Boate Kiss em Santa Maria (RS) após o incêndio



Fonte: Corpo de Bombeiros de São Paulo (2018).

Ao longo dos anos, os grandes incêndios em edificações foram os principais responsáveis pelo aprimoramento nas legislações de prevenção contra o incêndio. Para Cesarino (2018), somente com a ocorrência de catástrofes que novas tecnologias foram implementadas, juntamente com a melhoria contínua dos processos de combate ao incêndio, tanto em escala urbana, quanto florestal.

3 APLICAÇÃO DO AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

Conforme Bellei (2010), a alta resistência, homogeneidade das propriedades mecânicas, impermeabilidade, facilidade na substituição ou desmontagem das estruturas pelas conexões aparafusadas ou soldadas, e reciclagem sem perder as suas qualidades, são algumas características que viabilizam a utilização do aço. Além disso, dentre os tipos de aço, utilizam-se os aços estruturais para a estruturação de edifícios, viadutos, pontes e estruturas metálicas.

Nos tópicos abaixo, descrevem-se as características do aço estrutural, bem como os principais tipos e suas propriedades físicas e mecânicas, além das alternativas de proteção contra o incêndio tratadas neste trabalho: argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO AÇO ESTRUTURAL

Segundo Bellei (2010), deve-se conhecer o comportamento do aço em uma determinada situação, pois é essencial obter uma estrutura de qualidade e de dimensionamento correto. Além disso, entre as diversas aplicações do aço, são empregados de forma estrutural, na composição de treliças, pilares, vigas, contraventamento, e como barras de pórticos, de acordo com Fakury, Castro e Caldas (2016).

3.1.1 Principais Tipos de Aços Estruturais

Os aços estruturais “[...] são encontrados na forma de chapas, barras e perfis, os quais são agrupados em aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga, aços carbono tratados a quente e aços liga tratados a quente.” (INOVAE, 2005, p.95). Tanto os aços carbono como os de baixa liga podem ter sua resistência aumentada pelo tratamento térmico.

Bellei (2010) cita que, usualmente os aços carbono mais utilizados em estruturas são: ASTM A36 (equivalente ao NBR 6648, 6650 e 7007), ASTM A570, NBR 6649 e DIN ST37, os quais possuem um teor de carbono máximo equivalente de 0,45% para não perder a boa soldabilidade e ao mesmo tempo elevar a

resistência e dureza. Já para os aços de baixa liga obterem resistência elevada, o teor de carbono deve-se manter na ordem de 0,20% e são: ASTM A572 (equivalente ao NBR 5000, 5004 e 7007), ASTM A441 e DIN ST52, entre outros.

3.1.2 Propriedades dos Aços Estruturais

Bellei (2010) afirma que trabalhar com o aço estrutural é consideravelmente seguro, uma vez que ele é único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos. Dentre as principais vantagens em utilizar o aço em forma estrutural, a sua alta resistência nos diversos estados de tensão (tração, compressão e flexão), apesar da pequena área de seção transversal, torna-o mais leve do que os elementos constituídos em concreto armado, por exemplo, mesmo o aço possuindo densidade de 7.850 kg/m^3 em comparação com o concreto com densidade de 2.500 kg/m^3 .

Além disso, possui elevada ductilidade tornando-se resistente a impactos em pontos de alta concentração de tensões, segundo Fakury, Castro e Caldas (2016). Para temperatura de 20°C , ou seja, tendo o aço todas as suas propriedades mecânicas conservadas, a ABNT NBR 14323 (2013) adota os seguintes valores, conforme constantes físicas simplificadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos aços estruturais

Propriedades	Grandezas
Massa específica (ρ_a)	7.850 kg/m^3
Módulo de Elasticidade (E)	200.000 MPa
Coeficiente de Poisson regime elástico (ν_a)	0,3
Coeficiente de Poisson regime plástico (ν)	0,5
Módulo transversal de elasticidade (G_a)	78.846 MPa
Coeficiente de dilatação térmica (β_a)	$1,5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Alongamento (Δl)	$14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20)$
Condutividade Térmica (λ_a)	$45 \text{ W/m }^\circ\text{C}$
Calor Específico (c_a)	$600 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$

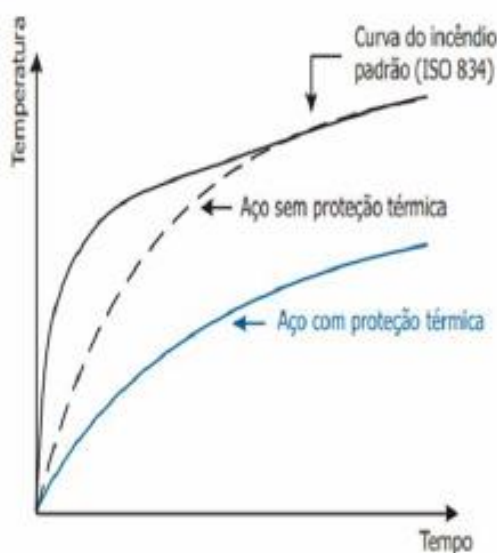
Fonte: ABNT NBR 14323 (2013).

3.2 MATERIAIS DE PROTEÇÃO CONTRA O FOGO

A fim de proteger e retardar o aquecimento, manter a rigidez e resistência da estrutura de aço durante o incêndio, deve-se utilizar algum material isolante térmico. “Esses materiais utilizados devem resistir ao fogo por um determinado período, ou seja, devem se manter íntegros durante a evolução do incêndio, sem apresentar fissuras.” (DIAS, 2018, p.67). O emprego do material de proteção contra incêndio em estruturas de aço deve ser mais frequente, segundo Souza (2004), uma vez que o seu aquecimento é mais favorecido pela alta condutividade térmica e pela esbeltez relativa das seções.

Os materiais passivos de proteção contra o incêndio possuem a finalidade de impedir ou mitigar a evolução da temperatura dentro do seu perfil e não de aumentar a resistência da peça, preservando a integridade do aço, conforme descreve Cesarino (2018). Ou seja, eles não irão impedir que o incêndio ocorra, mas irão impedir ou retardar a sua propagação, conforme observado na curva do incêndio-padrão com e sem a utilização de material isolante, representado na Figura 8.

Figura 8 - Curva de incêndio-padrão com/sem utilização de material de proteção



Fonte: Pannoni (2015).

De acordo com ABNT NBR 15524-2 (2007) para a escolha do tipo de tratamento superficial deve-se levar em consideração as características do meio

ambiente (rural, urbano, industrial ou marítimo), atmosfera com presença de elementos corrosivos (CO_2 , SO_2 , H_2S), umidade relativa e temperatura. Desta forma, Bellei (2010) afirma que, a prevenção e controle a fim de evitar problemas pode ser diminuída com a utilização de revestimentos resistentes direcionados a sua utilização.

Se após um incêndio, em uma estrutura de aço com o devido material de proteção, seus elementos internos ainda estiverem em situação de uso, segundo Cesarino (2018), realiza-se a devida manutenção no material de proteção, preservando a estrutura por mais tempo se ela estiver bem protegida. “[...] os aços estruturais, quando resfriados após um incêndio, não apresentam trincas ou fissuras e retomam pelo menos 90% das suas propriedades mecânicas originais.” (FAKURY, CASTRO e CALDAS, 2016, p.10).

3.2.1 Propriedades dos Materiais de Proteção

De acordo com Dias (2018), as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais de proteção devem ser determinadas através de ensaios realizados em laboratório, em conformidade com a ABNT NBR 5628 (2001), Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo.

Cesarino (2018) afirma que os materiais isolantes são enquadrados como medidas de proteção passiva, pois dispensam a necessidade de acionamento para funcionar e devem possuir as propriedades exemplificadas no Quadro 1. Além disso, os materiais de proteção devem trabalhar de forma que acompanhem os deslocamentos do elemento estrutural e a durabilidade do material dever ser compatível com a vida útil da estrutura.

Quadro 1 - Propriedades dos materiais de proteção (continua)

Baixa Massa Específica	O isolante deve ser leve para não sobrecarregar a estrutura, principalmente quando ele ficará suspenso.
Baixa Condutividade Térmica	Quanto menor a condutividade térmica, maior a capacidade de isolamento térmico.

Quadro 1 - Propriedades dos materiais de proteção

(conclusão)

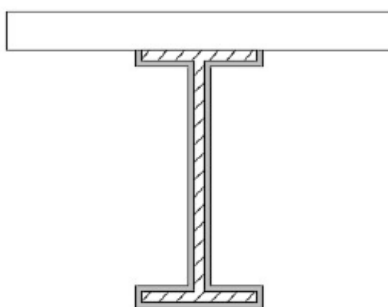
Alto Calor Específico	Pode absorver grandes quantidades de energia sem que haja alta elevação de sua temperatura.
Adequada Resistência Mecânica	Quanto maior a resistência do material isolante, menor sua fragilidade, e consequentemente, menos calor pode ser transferido até os elementos estruturais por meio de fissuras ou aberturas causadas por danos.
Custo Compatível	O custo do isolante deve ser compatível com a realidade da obra para não inviabilizar a sua implantação.

Fonte: Adaptado de Cesarino (2018).

3.2.2 Principais Tipos de Materiais de Proteção

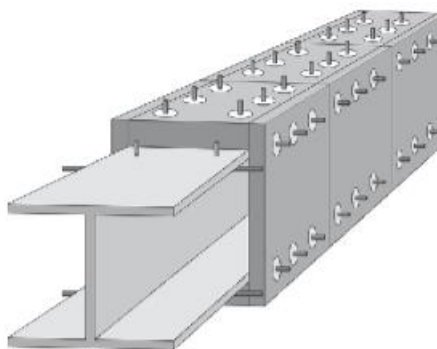
Para Fakury, Castro e Caldas (2016), a proteção deve ser feita com materiais que normalmente tem em sua composição: gesso, vermiculita, fibras minerais ou produtos cerâmicos. Podendo ter a forma de argamassa, onde é projetada em toda a superfície exposta (denominada tipo contorno), ou de placas rígidas, que são montadas em torno da superfície exposta (denominada tipo caixa), ou ainda é possível realizar a aplicação de tinta intumescente, onde este produto tem a sua espessura aumentada em até 30 vezes ao ser submetida ao calor e passará a ter um aspecto esponjoso. Tais proteções estão representadas nas Figuras 9, 10 e 11, respectivamente.

Figura 9 - Proteção tipo contorno



Fonte: Dias (2018).

Figura 10 - Proteção tipo caixa



Fonte: Fakury, Castro e Caldas (2016).

Figura 11 - Proteção tipo tinta intumescente



Fonte: Fakury, Castro e Caldas (2016).

Porém, quando a proteção for feita por tinta intumescente ou material similar, segundo a ABNT NBR 14323 (2013), a elevação de temperatura deve ser obtida por ensaios realizados em laboratório, não podendo ser aplicada com base no dimensionamento deste trabalho.

3.2.2.1 Proteções tipo Contorno

Entre as proteções de elementos estruturais contra incêndio tipo contorno encontram-se as argamassas, que podem ser cimentícias (compostas por materiais aglomerantes), fibras (obtidas a partir de rocha basáltica) ou somente à base de vermiculita, conforme Dias (2018). No tópico a seguir, aborda-se a proteção passiva contra o incêndio, tipo contorno, considerada neste trabalho: argamassa projetada de vermiculita.

3.2.2.1.1 Argamassa Projetada de Vermiculita

A argamassa projetada deve ser aplicada por jateamento direto sobre a superfície de aço e deve ser trabalhada considerando um conjunto único e rígido com a estrutura, de acordo com Dias (2018). Após a secagem, seus movimentos devem ser acompanhados para que não ocorra desprendimentos ou fissuras, como representado na Figura 12.

Conforme Martins (2000), a aplicação deve ocorrer durante a etapa de montagem das estruturas, pois requer limpeza após a aplicação, como visto na Figura 13. Em função de apresentar grande resistência mecânica, é bastante utilizada em indústrias petroquímicas, como demonstrado na Figura 14, plataforma de petróleo e em estruturas sujeitas a choques mecânicos elevados, conforme Mendes (2004).

Figura 12 - Aplicação de argamassa projetada



Fonte: Fakury, Castro e Caldas (2016).

Figura 13 - Aparência da argamassa projeta após sua aplicação



Fonte: Mendes (2004).

Figura 14 - Plataforma P-19 Petrobrás com argamassa de vermiculita



Fonte: Mendes (2004).

A argamassa projetada à base de vermiculita, para Dias (2018), é um produto de baixa densidade, composta basicamente de vermiculita expandida, cimento *Portland* e aglomerados minerais. A vermiculita perde água, intumescce e se expande quando aquecida.

De acordo com Martins (2000), é uma argamassa de agregado leve, que pertence ao grupo de minerais micáceos, silicatos hidratados de composição variada (originados da alteração das micas), com ponto de fusão em torno de 1370 °C. As propriedades físicas e mecânicas da argamassa projetada de vermiculita estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades da argamassa de vermiculita

Propriedades	Grandezas
Massa específica (ρ_a)	300 a 800 kg/m ³
Condutividade Térmica (λ_a)	0,06 a 0,15 W/m °C
Calor Específico (ca)	920 J/kg °C
Espessura (t_m)	10 a 40 mm

Fonte: Adaptado de Martins (2000).

3.2.2.2 Proteções tipo Caixa

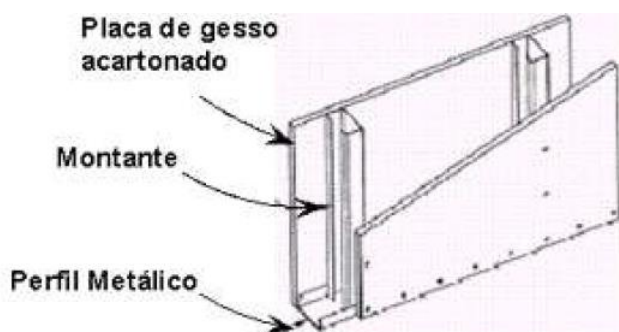
Nos materiais pré-fabricados encontram-se as proteções de elementos estruturais contra incêndio tipo caixa, onde é possível utilizar placas de lã de rocha (obtida a partir do basalto), painéis de silicato autoclavados, placas de gesso

acartonado e mantas (formadas a partir de fibras silico-aluminosas), segundo Dias (2018). Abaixo, descrevem-se as proteções passivas contra o incêndio, tipo caixa, consideradas neste trabalho: placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha.

3.2.2.2.1 Placa de Gesso Acartonado

Conforme Dias (2018), fixa-se a placa de gesso na estrutura metálica por meio de pinos ou perfis leves de aço, de acordo com a representação na Figura 15, e não devem sobrar lacunas entre elas, pois assim, a passagem de gases pelas juntas é impedida. Na Figura 16 é apresentado o detalha da placa e na Figura 17 uma edificação, no estado de São Paulo, onde utilizaram-se placas rígidas de gesso acartonado.

Figura 15 - Placa de gesso acartonado revestindo o perfil metálico



Fonte: Dias (2018).

Figura 16 - Detalhe da placa de gesso acartonado



Fonte: Mendes (2004).

Figura 17 - Edifício Palácio do Comércio (SP) com placas de gesso acartonado



Fonte: Mendes (2004).

A placa de gesso acartonado, acrescenta Dias (2018), é um elemento rígido constituído por fibra de vidro e ainda pode ser acrescida vermiculita. De acordo com Martins (2000), o gesso é obtido da gipsita (sulfato de cálcio hidratado) cozida a baixa temperatura, que quando aquecido, ocorre a evaporação de água, retardando a transmissão de calor e propiciando ao material uma considerável resistência térmica até que não houver mais água em seu interior, ocorrendo a desintegração da placa. As propriedades físicas e mecânicas da placa de gesso acartonado estão apresentadas na

Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades da placa de gesso acartonado

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: Adaptado de Martins (2000).

3.2.2.2.2 Manta de Lã de Rocha

A manta de lã de rocha, conforme Dias (2018), é presa na estrutura com a utilização de pinos de aço soldados na estrutura, conforme apresentado na Figura 18. As mantas possuem boa resistência ao serem manuseadas e também à corrosão, segundo Mendes (2004), isso porque suas fibras são multidirecionadas e entrelaçadas por um processo contínuo de agulhamento, conforme detalhe na Figura 19, o que as tornam adequadas para edificações já construídas e em funcionamento, além de possuírem variação de espessuras por serem materiais pré-fabricados. Na Figura 20 é apresentada uma edificação, em São Paulo, onde foi aplicada a manta lã de rocha como material de proteção, conforme citado por Mendes (2004).

Figura 18 - Colocação da manta de lã de rocha



Fonte: Mendes (2004).

Figura 19 - Detalhe da manta de lã de rocha



Fonte: Mendes (2004).

Figura 20 - Centro Empresarial do Aço (SP) com manta de lã de rocha



Fonte: Mendes (2004).

Segundo Martins (2000), as mantas são flexíveis e formadas a partir de fibras silico-aluminosas, ou seja, a partir da alteração de pedras basálticas, cujas fibras estão dispostas de forma aleatória. As propriedades físicas e mecânicas da manta de lã de rocha estão apresentadas na

Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da manta de lã de rocha

Propriedades	Grandezas
Massa específica (ρ_a)	100 a 500 kg/m ³
Condutividade Térmica (λ_a)	0,23 a 0,25 W/m °C
Calor Específico (ca)	1500 J/kg °C
Espessura (t_m)	25 mm

Fonte: Adaptado de Martins (2000).

4 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Quando ocorre um incêndio, conforme Fakury, Castro e Caldas (2016), além do aço atingir altas temperaturas a estrutura pode perder a capacidade de suportar as ações atuantes e sofrer colapso total ou parcial, em decorrência das reduções da resistência e rigidez. De acordo com Ferreira (2019), as máximas temperaturas registradas em um incêndio aproximam-se dos 1200 °C, sendo difícil ocorrerem incêndios que possam causar a fusão do aço, por volta dos 1550 °C.

Para Cesarino (2018), ocorrem duas situações com a variação de temperatura no aço. A primeira situação é o aumento da temperatura do aço onde haverá a diminuição na sua resistência, a qual vai estar caracterizada com a depreciação das suas propriedades e com isso ocorrem grandes deformações. A segunda situação é a diminuição da temperatura do aço, ou seja, quando ele estiver sendo resfriado, as suas propriedades serão parcialmente ou totalmente reconstituídas. “Embora o aço seja um material incombustível, suas principais propriedades mecânicas degeneram-se consideravelmente em altas temperaturas.” (FAKURY, CASTRO e CALDAS, 2016, p.9).

Nos tópicos abaixo abordam-se os impactos do incêndio no desempenho da estrutura de aço, o tempo de resistência mínimo pela ABNT NBR 14432 (2000), além das etapas de dimensionamento e verificação pelo método simplificado de cálculo conforme a ABNT NBR 14323 (2013), e a análise termo estrutural dos elementos sob situação de incêndio.

4.1 IMPACTO DO INCÊNDIO E DESEMPENHO ESTRUTURAL

Como o comportamento mecânico do aço está associado à sua temperatura, conseqüentemente está em função do tempo de ocorrência do incêndio, conforme já demonstrado anteriormente através da curva do incêndio-padrão. As altas temperaturas impactam o aço, de acordo com o apontamento de Cesarino (2018), em cinco grandes propriedades: módulo de elasticidade, tensão de escoamento, alongamento, condutividade térmica e calor específico. As quais podem ser observadas através de ensaios experimentais, como por exemplo o Teste de *Cardington* (1995, UK) e através de simulações numéricas. Propriedades

como a massa específica do aço e o coeficiente de *Poisson*, de acordo com Souza (2004), são praticamente independentes da temperatura.

Quando peças estruturais são aquecidas acabam dilatando e tem sua expansão restringida devido a restrições de apoio, gerando tensões extras, reduzindo drasticamente o desempenho, com flambagem prematura de vigas. Na Tabela 5 é possível verificar os fatores de redução para o aço, em conformidade com a ABNT NBR 14323 (2013).

Tabela 5 - Fatores de redução do aço em função da temperatura

Temperatura θ_a (C°)	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura $\theta_a (K_{y,\theta})$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura $\theta_a (K_{\epsilon,\theta})$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
300	1,000	0,800
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
900	0,060	0,067
1000	0,040	0,045
1200	0,000	0,000

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323 (2013).

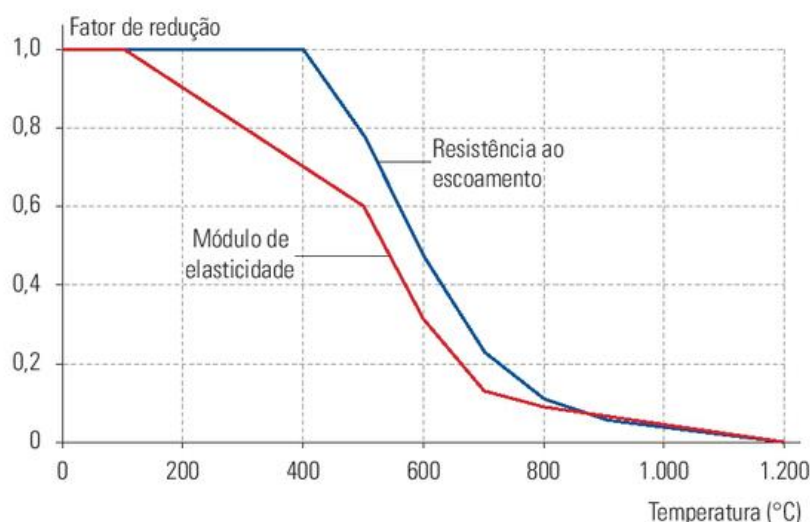
Quando a estrutura necessita de proteção contra incêndio, em conformidade com a ABNT NBR 15524-2 (2007), deve-se levar em consideração que o aço em contato com o fogo apresenta resistência reduzida e uma brusca redução de seu estado-limite de escoamento a partir de 400 °C, e a partir de 550 °C atinge valores críticos, conforme gráfico apresentado na Figura 21.

Para Cesarino (2018), com o aumento da temperatura nota-se que, a partir de 100 °C começam a ocorrer os primeiros impactos na estrutura de aço, como a queda do módulo de elasticidade, e a partir de 400 °C há uma queda gradual da tensão de escoamento do aço.

Portanto, essa redução faz com que o aço perca rigidez gradual e passe a sofrer grandes deformações com o aumento da temperatura. Estruturalmente, deformações excessivas tornam a peça menos estável, principalmente devido aos efeitos da não-linearidade geométrica, diminuindo gradualmente suas capacidades (CESARINO, 2018, p.73).

Enquanto que, em 600 °C “[...] a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço se limitam a 47% e 31% dos respectivos valores à temperatura ambiente.” (FAKURY, CASTRO e CALDAS, 2016, p.9). Chegando próximo a 800 °C reduz-se até 90% da capacidade inicial da peça, porém, se a estrutura passar dessa temperatura há o risco de colapso estrutural, uma vez que as propriedades do aço vão ser reduzidas, complementa Cesarino (2018).

Figura 21 - Redução de resistência e rigidez com a elevação da temperatura

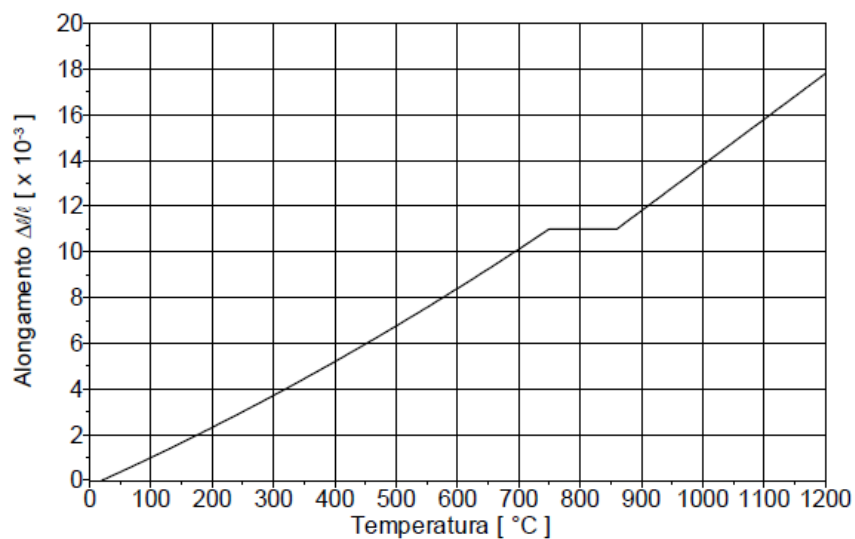


Fonte: Fakury, Castro e Caldas (2016).

Segundo Fakury, Castro e Caldas (2016), a temperatura crítica, ou seja, a temperatura do aço em que ocorre o colapso desde que seja dimensionada para total aproveitamento do material (sem folga), situa-se entre 550 °C e 650 °C.

O alongamento do aço aumenta ligeiramente com a temperatura, de acordo com Souza (2004), a cerca de 730 °C o aço sofre uma mudança de fase assumindo uma estrutura mais densa, conforme observado no gráfico da Figura 22, de forma que essa mudança provoca absorção de energia e muda a característica de expansão térmica.

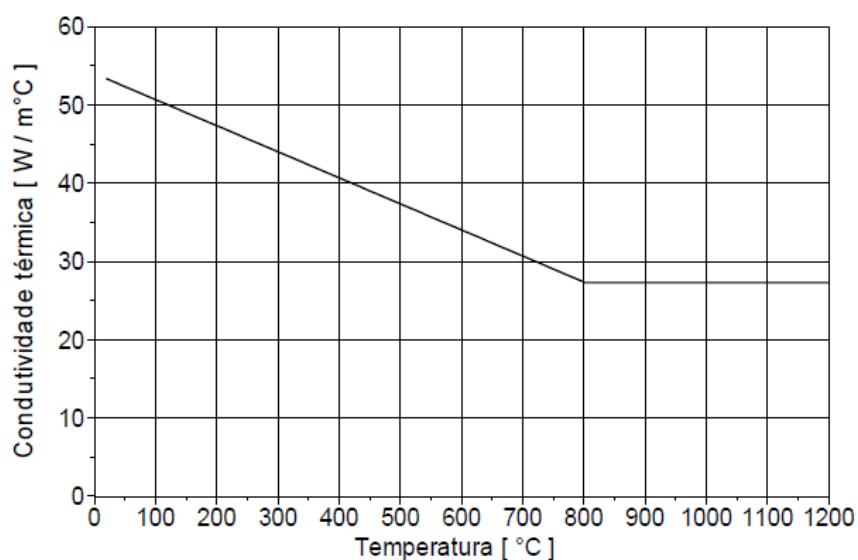
Figura 22 - Alongamento térmico do aço em função da temperatura



Fonte: Souza (2004).

Para Souza (2004), com o aumento da temperatura a condutividade térmica do aço decresce a taxas constantes até 800 °C, em concordância com o gráfico da Figura 23. Quando passa dessa temperatura a condutividade cai para aproximadamente metade, permanecendo nesse valor até 1200 °C.

Figura 23 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura

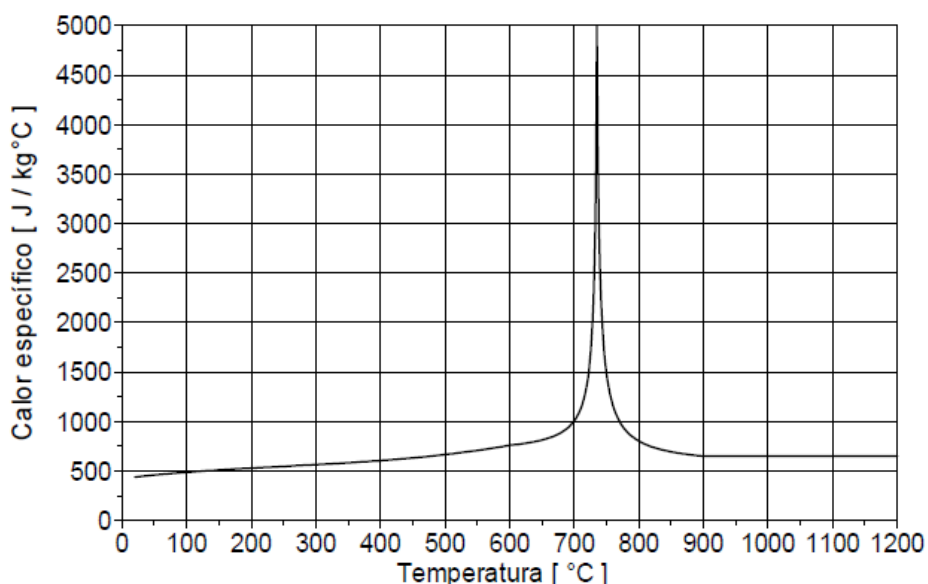


Fonte: Souza (2004).

A relação de calor específico e a temperatura do aço, ainda para Souza (2004), está representada no gráfico da Figura 24, onde a mudança abrupta de

valores do calor específico está em aproximadamente 700 °C. Esta descontinuidade é atribuída a uma perda das propriedades magnéticas do aço que são readquiridas com o seu resfriamento.

Figura 24 - Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: Souza (2004).

4.2 DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL

Os critérios mínimos de segurança contra incêndio estão baseados na ABNT NBR 14432 (2000) e no Manual Técnico do Corpo de Bombeiros. Segundo Souza (2004), a ABNT NBR 14432 (2000) estabelece condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação de uma edificação, de forma que possibilite a fuga das pessoas e a operação ao combate do incêndio em condições seguras e ocorra a minimização de danos às edificações vizinhas e a infraestrutura pública. Entretanto, o Manual Técnico do Corpo de Bombeiros apresenta medidas de proteção passivas e ativas.

Enquanto que, o dimensionamento e verificação do elemento estrutural, baseiam-se no método simplificado de equações da ABNT NBR 14323 (2013), bem como na curva incêndio-padrão, que descreve a variação da temperatura dos gases ao longo do tempo. A análise estrutural seguindo a ABNT NBR 14323 (2013), segundo Dias (2018), determina a capacidade resistente da estrutura em função da

temperatura em que ela se encontra, e pode ser aplicado à maior parte dos elementos estruturais de aço constituídos por perfis laminados e soldados, além das ligações.

Em resumo, devem-se seguir as seguintes etapas: estimar a temperatura dos gases, que uma vez vai determinar a temperatura do aço e consequentemente a depreciação das propriedades mecânicas do aço. Em seguida, para Cesarino (2018), através da equação de ELU e ELS calcula-se o momento resistente em relação ao momento solicitante da peça, se a solicitação da peça for maior que resistência depreciada deve-se verificar a condição de TRRF, ou seja, o tempo requerido de resistência ao fogo. Se este tempo mínimo não for atingido, conforme definido na norma, deve-se selecionar outro perfil (o que pode encarecer a estrutura), ou adicionar um material de proteção.

A partir disso repetem-se as etapas acima, verifica-se se o material de proteção aplicado irá diminuir a temperatura atingida e consequentemente restringir os fatores de redução das propriedades do aço. Ou seja, avalia-se se a estrutura estará sendo menos degradada com a aplicação do material de proteção passiva.

4.2.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

A ABNT NBR 14432 (2000) apresenta exigências expressas em termos do tempo requerido de resistência do fogo (TRRF), com valores típicos de 30, 60, 90 e 120 minutos. “Esses valores não significam o tempo até que o elemento estrutural entre em colapso no caso de um incêndio ou o tempo de evacuação dos ocupantes, mas fornecem uma representação escalar do desempenho dos elementos sob ensaios.” (SOUZA, 2004, p.19).

Cesarino (2018), contextualiza que o tempo de resistência mínimo está em função de três pontos principais: tempo requerido da estrutura sem entrar em colapso, tempo requerido para a evacuação e tempo requerido para manter a segurança da estrutura e edificações vizinhas e sua eventual manutenção. Segundo Ruschel (2011), o TRRF é avaliado em função do risco de incêndio e das consequências que podem vir a causar devido a uma falha estrutural. Sendo assim, todos os elementos estruturais devem seguir um tempo requerido de resistência do fogo normatizado, mantendo as suas capacidades de suporte às ações mecânicas para temperaturas associadas a este tempo.

Com relação à conservação do patrimônio, o entendimento mais aceito internacionalmente é que se trata de uma opção apenas do proprietário da edificação, sem ingerência das autoridades públicas. Se este desejar que a estrutura resista ao incêndio por um tempo além do estritamente necessário, deverá arcar com um maior custo da própria estrutura ou da sua proteção (MARTINS, 2000, p.24).

De acordo com Martins (2000), a norma estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais que integram os edifícios, a fim de evitar o colapso estrutural. O TRRF depende de vários fatores, mas principalmente do tipo de ocupação, da altura compreendida entre o ponto de saída situada no nível de descarga do prédio e o piso do último pavimento, da área da edificação, e da existência e profundidade de subsolos.

A ABNT NBR 14432 (2000) fornece uma tabela com o tempo requerido de resistência ao fogo referente a cada componente estrutural e compartimentação que integram a edificação, a qual está resumida na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo do TRRF pela ABNT NBR 14432 (2000)

Altura da Edificação (m)	≤ 6	6 < H ≤ 12	6 < H ≤ 23	23 < H ≤ 30	H > 30
Nº de Andares	2	2 a 4	4 a 8	8 a 11	11 +
Ocupação	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (min)				
Residências	30	30	60	90	120
Hotéis	30	60 (30)	60	90	120
Comércios	30	60 (30)	60	90	120
Escritórios	60 (30)	60 (30)	30	90	120
Escolas	30	30	60	90	120
Garagem Aberta Lateralmente	30	30	30	30	60
Garagem Não Aberta Lateralmente	30	60 (30)	60	90	120
Indústrias	30	30	60	90	120
Depósitos de Baixo Risco	30	30	30	30	60

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14432 (2000).

Pannoni (2015) explica que, quanto maior a resistência necessária, maior a temperatura que a estrutura deverá resistir sem que ocorra o colapso. Ou seja, um TRRF de 30 significa que uma estrutura deverá permanecer estável por 30 minutos enquanto que a atmosfera ao seu redor está a aproximadamente a 820 °C.

4.2.2 Dimensionamento Estrutural pelo Método Simplificado de Cálculo

Segundo a ABNT NBR 14323 (2013), o dimensionamento de uma estrutura em situação de incêndio deve ser feito por meio de resultados de ensaios ou por meio de métodos analíticos de cálculo, ou, ainda, por uma combinação de ensaios e métodos analíticos. Dias (2018), comenta que por meio de métodos analíticos de cálculo, pode ser usado o método simplificado de dimensionamento, desde que o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, não seja tomado com valor superior ao esforço resistente de cálculo a temperatura ambiente.

O método simplificado de análise térmica, proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013), é aplicável aos elementos estruturais de aço com e sem material de proteção térmica, situados no interior da edificação, totalmente imersos no compartimento em chamas (DIAS, 2018, p.77).

A ABNT NBR 14323 (2013) considera a distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento dos elementos estruturais de aço, ao utilizar o método simplificado de dimensionamento, dependendo do tipo de solicitação e do ELU. Ou ainda, distribuição não-uniforme, quando for favorável a segurança.

4.2.2.1 Segurança e Ações

De acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), quando a segurança é verificada isoladamente a cada um dos esforços solicitantes, as condições de segurança podem ser expressas pela Equação 1.

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (1)$$

Onde:

$S_{fi,d}$: solicitação de cálculo em incêndio obtida por meio de combinações de ações apropriadas;

$R_{fi,d}$: resistência de cálculo do elemento estrutural para o ELU, em incêndio, no tempo obtido de acordo com a ABNT NBR 14432 (2000).

As ações decorrentes da elevação da temperatura na estrutura em função do incêndio possuem um tempo de atuação muito pequeno. Conforme a ABNT NBR 14323 (2013), considerando locais em que não há elevadas concentração de pessoas nem a predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longo, são expressas pela Equação 2.

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{gi} \times F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0,21 \times F_{Qk} \quad (2)$$

Onde:

γ_{gi} : coeficiente de ponderação para as ações permanentes direta;

$F_{Gi,k}$: valor nominal da ação permanente direta;

$F_{Q,exc}$: valor nominal das ações térmicas decorrentes do incêndio;

F_{Qk} : valor nominal das ações variáveis devidas às cargas acidentais decorrentes do uso e ocupação da edificação.

4.2.2.2 Resistência Nominal de Elementos Estruturais de Aço

Em conformidade com a ABNT NBR 14323 (2013) a resistência de cálculo no tempo de uma barra pode estar submetida à força normal de tração e de compressão, além do momento fletor e à força cortante.

4.2.2.2.1 Barra Tracionada

A força normal resistente de cálculo de uma barra de aço axialmente tracionada com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento, deve ser calculada através da Equação 3, segundo a ABNT NBR 14323 (2013).

$$N_{fi,Rd} = K_{y,\theta} \times A_g \times f_y \quad (3)$$

Onde:

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ;

A_g : área bruta da seção transversal da barra;

f_y : resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

4.2.2.2.2 Barra Comprimida

A força normal resistente de cálculo de uma barra de aço axialmente comprimida com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento, de acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), deve ser calculada pela Equação 4 quando não sujeita à flambagem local e pela Equação 5 quando sujeita à flambagem local.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} \times k_{y,\theta} \times A_g \times f_y \quad (4)$$

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} \times Q_{fi} \times k_{y,\theta} \times A_g \times f_y \quad (5)$$

Onde:

χ_{fi} : fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio;

Q_{fi} : coeficiente de redução (Q_s e Q_a) que leva em conta a flambagem local em situação de incêndio;

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ;

A_g : área bruta da seção transversal da barra;

f_y : resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

O fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio deve ser obtido pela Equação 6.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\beta_\theta + \sqrt{(\beta_\theta^2 - \lambda_{o,\theta}^2)}} \quad (6)$$

Com:

$$\beta_{\theta} = 0,5 \times (1 + \alpha_{\theta} \times \lambda_{o,\theta} + \lambda_{o,\theta}^2)$$

$$\lambda_{o,\theta} = \lambda_o \times \sqrt{\frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}}}$$

$$\alpha_{\theta} = 0,022 \times \sqrt{\frac{\epsilon}{f_y}}$$

Onde:

λ_o : índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas à temperatura ambiente;

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ;

$K_{E,\theta}$: fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura θ_a ;

f_y : resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente;

ϵ : módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente.

4.2.2.2.3 Barra Fletida

Considera-se uma distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal por meio do fator de correção K_1 e no comprimento da barra por meio do fator de correção K_2 , conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de correção K_1 e K_2

K_1 – Seção transversal da barra	
Para uma barra com todos os quatro lados expostos	1,00
Para uma barra envolvida por material de proteção contra incêndio, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado	1,40
Para uma viga sem proteção contra incêndio, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com fôrma de aço incorporada no quarto lado	1,15
K_2 – Comprimento da barra	
Nos apoios de uma barra estaticamente indeterminada	1,15
Em todos os outros casos	1,00

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323 (2013).

O momento fletor resistente de cálculo de uma barra de aço com flambagem local da mesa (FLM) e de flambagem local da alma (FLA), deve ser calculado pela Equação 7 se $\lambda \leq \lambda_p$, pela Equação 8 se $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ e pela Equação 9. se $\lambda > \lambda_r$ apenas para FLM. E o momento fletor resistente de cálculo de uma barra de aço com flambagem lateral com torção (FLT) deve ser calculado pela Equação 7 se $\lambda \leq \lambda_p$, pela Equação 10 se $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ e pela Equação 9 se $\lambda > \lambda_r$.

Com:

λ : parâmetro de esbeltez para o ELU;

λ_p : parâmetro de esbeltez para o ELU correspondente à plastificação;

λ_r : parâmetro de esbeltez para o ELU corresponde ao início do escoamento.

$$M_{fi,Rd} = k_1 \times k_2 \times k_{y,\theta} \times M_{pl} \quad (7)$$

$$M_{fi,Rd} = k_1 \times k_2 \times k_{y,\theta} \times \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \times \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \quad (8)$$

$$M_{fi,Rd} = k_{E,\theta} \times M_{cr} \quad (9)$$

$$M_{fi,Rd} = C_b \times k_{y,\theta} \times \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \times \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq k_1 \times k_2 \times k_{y,\theta} \times M_{pl} \quad (10)$$

Onde:

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ;

$k_{E,\theta}$: fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura θ_a ;

M_{cr} : momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente;

M_{pl} : momento de plastificação da seção transversal à temperatura ambiente;

M_r : momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal para projeto à temperatura ambiente;

C_b : fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme.

4.2.2.2.4 Barra Cisalhada

A força cortante resistente de cálculo de uma barra de aço com flambagem em relação ao eixo perpendicular à alma de perfis I, U, H e caixão deve ser calculado pela Equação 11 se $\lambda \leq \lambda_p$, pela Equação 12 se $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ e pela Equação 13 se $\lambda > \lambda_r$.

Onde:

λ : parâmetro de esbeltez para o ELU;

λ_p : parâmetro de esbeltez para o ELU correspondente à plastificação;

λ_r : parâmetro de esbeltez para o ELU corresponde ao início do escoamento.

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \times V_{pl} \quad (11)$$

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \times \frac{\lambda_p}{\lambda} \times V_{pl} \quad (12)$$

$$V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \times 1,28 \times \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \times V_{pl} \quad (13)$$

Onde:

$K_{y,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ;

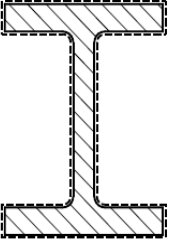
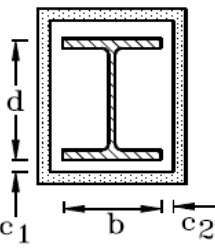
V_{pl} : força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento.

4.2.2.3 Análise Termo Estrutural de Elementos

De acordo com Dias (2018), para determinar a elevação da temperatura nos elementos em situação de incêndio, deve-se definir a quantidade de calor que chega a esses elementos, pois o índice de aumento de temperatura de um elemento de aço é proporcional ao seu fator de massividade. Segundo Martins (2000), isso significa que entre os elementos com a mesma área, aquele que possuir a menor superfície exposta ao incêndio se aquecerá mais lentamente que os demais, e entre os elementos que com a mesma superfície exposta, aquele com maior massa se aquecerá mais lentamente.

Porém, segundo a ABNT NBR 14323 (2013), ao determinar o fator de massividade, o efeito de pequenos furos na seção transversal pode ser desprezado. Algumas expressões para a determinação do fator de massividade para elementos estruturais de aço envolvidos por material de proteção contra incêndio estão resumidas no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo dos fatores de massividade para elementos com proteção

	Seção com proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{U_m}{A} = \frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{U_m}{A} = \frac{2 \times (d + c1 + b + c2)}{\text{área da seção da peça de aço}}$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14323 (2013).

4.2.2.3.1 Elementos Estruturais sem Proteção Contra Incêndio

De acordo com a ABNT NBR 14323 (2013), durante um intervalo de tempo, a elevação da temperatura de um elemento estrutural situado no interior do edifício, considerando uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, deve ser determinado pela Equação 14.

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[\frac{\left(\frac{U_m}{A} \right)}{\rho a \times c a} \right] \times \varphi \times \Delta t \quad (14)$$

Onde:

$\frac{U_m}{A}$: fator de massividade para elementos estruturais não envolvidos por material de proteção contra incêndio;

ca : calor específico do aço;

ρa : massa específica do aço;

φ : valor do fluxo de calor por unidade de área;

Δt : intervalo de tempo em segundos.

Com:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r$$

$$\varphi_c = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_a)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \times \varepsilon_{res} \times [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]$$

Onde:

φ_c : componente do fluxo de calor devido à convecção;

φ_r : componente do fluxo de calor devido à radiação;

α_c : coeficiente de transferência de calor por convecção;

θ_g : temperatura dos gases;

θ_a : temperatura na superfície do aço;

ε_{res} : emissividade resultante.

Com:

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

4.2.2.3.2 Elementos Estruturais com Proteção Contra Incêndio

O calor que chega ao elemento estrutural de aço protegido depende de como ocorrerá sua condução através do material de proteção. Conforme a ABNT NBR 14323 (2013), durante um intervalo de tempo, a elevação da temperatura de um elemento estrutural situado no interior do edifício, envolvido por um material de proteção conta incêndio, deve ser determinado pela Equação 15.

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[\frac{\lambda_m \times \left(\frac{U_m}{A}\right) \times (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{t_m \times p_a \times c_a \times \left(1 + \frac{\xi}{4}\right)} \right] \times \Delta t - \left[\frac{\Delta\theta_{g,t}}{\left(\frac{4}{\xi} + 1\right)} \right] \quad (15)$$

Com:

$$\xi = \left(\frac{cm \times \rho m}{ca \times \rho a} \right) \times t_m \times \left(\frac{U_m}{A} \right)$$

Onde:

$\frac{U_m}{A}$: fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de proteção contra incêndio;

U_m : perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio, igual ao perímetro da face interna do material de proteção contra incêndio mais metade dos afastamentos desta face ao perfil de aço, em metro;

A : área da seção transversal do elemento estrutural;

ca : calor específico do aço;

cm : calor específico do material de proteção contra o incêndio;

t_m : espessura do material de proteção contra incêndio;

$\theta_{a,t}$: temperatura do aço no tempo t ;

$\theta_{g,t}$: temperatura dos gases no tempo t ;

λ_m : condutividade térmica do material de proteção contra incêndio;

ρ_a : massa específica do aço;

ρ_m : massa específica do material de proteção contra incêndio;

Δt : intervalo de tempo em segundos.

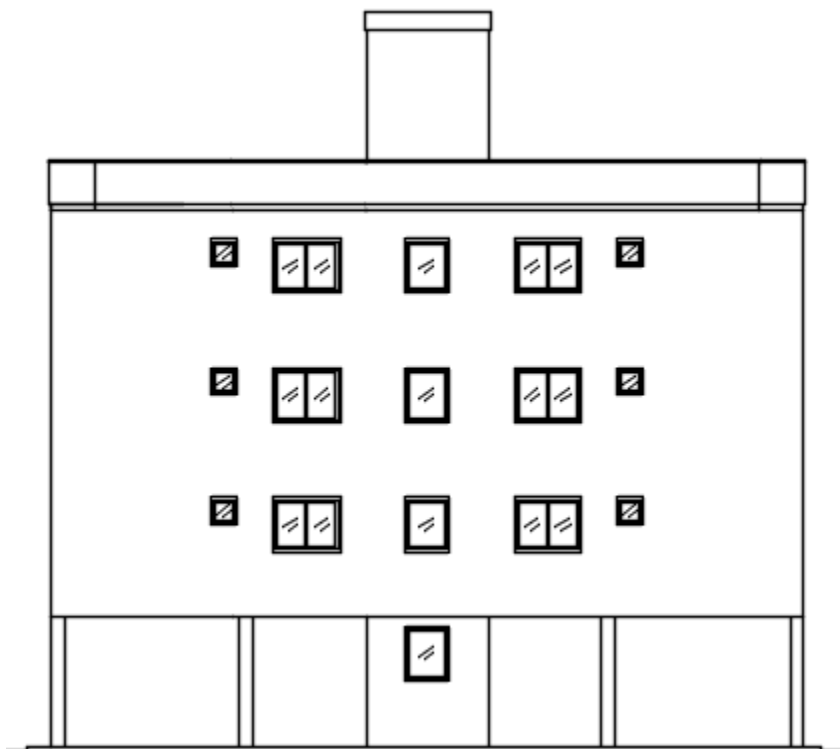
5 METODOLOGIA

Com o intuito de dimensionar a edificação de aço com a utilização dos diferentes materiais de proteção passivas contra o incêndio, e visando alcançar os objetivos descritos em capítulos anteriores, delineou-se nos itens abaixo o método do estudo adotado.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

O dimensionamento compreende em um projeto de edificação de aço residencial multifamiliar de 3 pavimentos tipo, com 9,00 m de altura compreendida entre o ponto de saída situada no nível de descarga da edificação até o piso do último pavimento, com área total útil de 681,60 m² e sem a existência de subsolos, conforme observado na Figura 25. O Apêndice A apresenta o projeto contendo as cotas da fachada e da planta baixa.

Figura 25 - Fachada leste do edifício residencial multifamiliar em análise



Fonte: Autor (2020).

5.2 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Inicialmente realizou-se o dimensionamento do pórtico rígido de aço, considerando o estado limite último e o estado limite de serviço para as combinações normais e em situação de incêndio, utilizando o *software SCIA Engineer* (2019), o qual baseia-se na ABNT NBR 8800 (2008). Na Tabela 8 apresentam-se as cargas e os principais parâmetros a serem utilizados no dimensionamento. Para as cargas permanentes e acidentais, bem como os fatores de combinações, coeficientes de ponderação e fatores de redução utilizam-se da ABNT NBR 6120 (2019) e para a ação do vento segue-se a ABNT NBR 6123 (1988) Versão corrigida 2013.

Tabela 8 - Cargas e parâmetros a serem utilizados no *software SCIA Engineer*

Parâmetros	Valores Característicos	ELU		ELS
		Fatores Combinações	Coeficiente Ponderação	Fatores Redução
Peso Próprio Aço	78,5 kN/m ³	-	1,25	-
Uso e Ocupação Ed. Residencial	1,5 e 2,0 kN/m ²	0,5	1,50	0,4 e 0,3
Vento		0,6	1,40	0,3 e 0
Velocidade Básica do Vento (Vo)		45 m/s		
Fator Topográfico (S1)		1,00		
Fator Meteorológicos (S2)		Categoria IV e Classe B		
Fator Estatístico (S3)		1,00		

Fonte: Autor (2020).

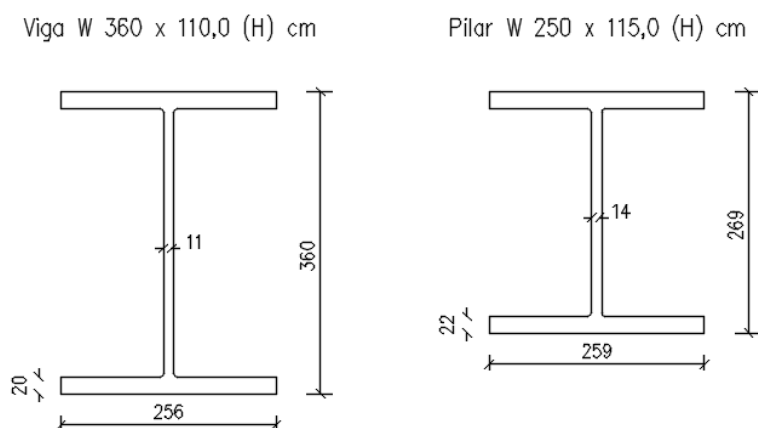
Realizou-se o pré-dimensionamento dos elementos da estrutura com base nos vãos das vigas e pilares. Para as vigas, levou-se em consideração a relação 1/20 do comprimento do vão para determinar a altura da seção transversal, e para os pilares, determinou-se a seção transversal com base nas áreas de influência dos carregamentos atuantes, conforme descritos na Tabela 9. Na Figura 26 apresentam-se os elementos pré-dimensionados considerando o aço A36 e o tipo de perfil de acordo com o obtido no catálogo da Gerdau.

Tabela 9 - Parâmetros para o pré-dimensionamento de pilares e vigas

Vigas	
Vão da viga	7,15 m
Perfil Gerdau	W 360 x 110,0 (H) cm
Pilares	
Comprimento do pilar	3 m
Área de influência	43,30 m ²
Número de pavimentos	4
Perfil Gerdau	W 250 x 115,0 (H) cm

Fonte: Autor (2020).

Figura 26 - Pré-dimensionamento de elementos



Fonte: Autor (2020).

A análise delimitou-se às vigas de aço de forma isolada, a partir de um cenário de incêndio, não levando em consideração a estrutura como um todo e não realizando uma simulação real do incêndio. Consideraram-se vigas aparentes e formadas por perfil I laminado duplamente simétrico, com seção transversal obtida a partir do dimensionamento da estrutura para combinações normais de cálculo.

Para a verificação e o dimensionamento da estrutura em situação de incêndio, primeiramente, determina-se TRRF, baseado na ABNT NBR 14432 (2000), dependendo das características do projeto.

Em seguida, realiza-se o dimensionamento da estrutura de aço em situação de incêndio com os diferentes materiais de proteção passivos (argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha),

através da ABNT NBR 14323 (2013). Para isso, estima-se a temperatura dos gases, determinando a temperatura do aço e posteriormente, calcula-se o momento resistente em relação ao momento solicitante da peça.

5.3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Nos tópicos abaixo, descrevem-se os parâmetros empregados para a modelagem estrutural da edificação no *software SCIA Engineer* (2019). Em seguida, definiu-se o cenário de incêndio, determinando o TRRF pela ABNT NBR 14432 (2000), a temperatura dos gases e, conseqüentemente, a temperatura do aço. Realizou-se o dimensionamento da estrutura de aço em situação de incêndio seguindo o dimensionamento simplificado da ABNT NBR 14323 (2013), calculando a temperatura das vigas com a aplicação dos diferentes materiais de proteção passivos: argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha.

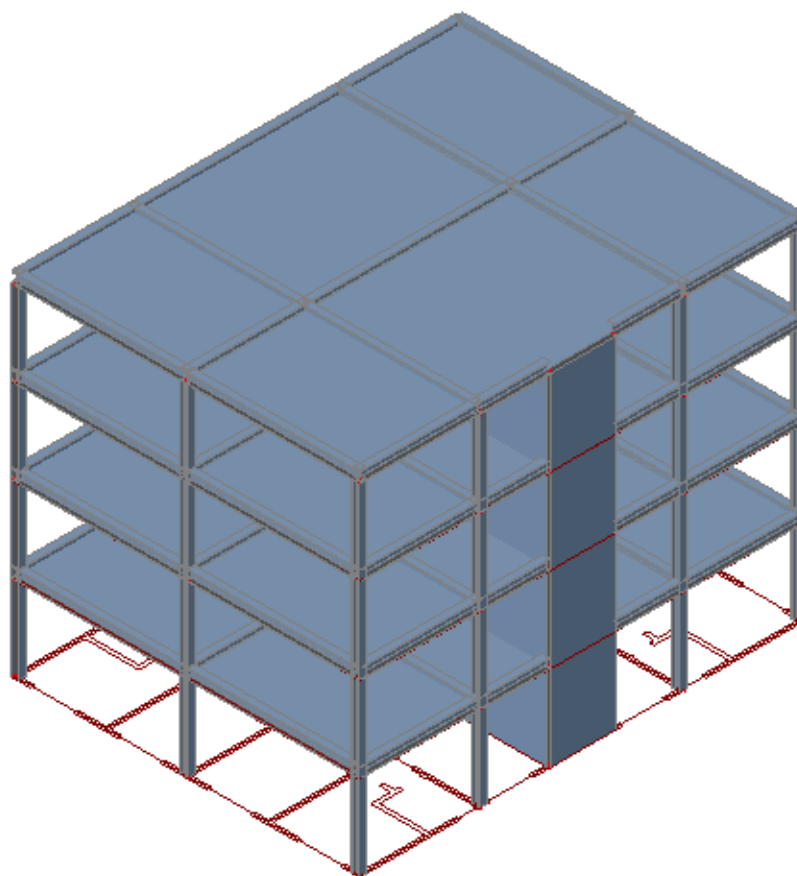
5.3.1 Parâmetros da Edificação

Utilizando o *software SCIA Engineer* (2019), realizou-se a modelagem estrutural do pórtico rígido de aço utilizando os elementos pré-dimensionados anteriormente: perfil I laminado duplamente simétrico de aço A36 da Gerdau. Para as vigas incluiu-se o perfil W 360 x 110 (H) cm, variando o comprimento de 4,2 m a 7,15 m, e para os pilares o perfil W 250 x 115 (H) cm de 3 m de comprimento, em função do pé direito. Para melhorar a precisão entre o modelo arquitetônico e o modelo estrutural, levaram-se em consideração as excentricidades dos elementos, uma vez que a parede do projeto arquitetônico possui 15 cm de largura.

Considerou-se um núcleo rígido de concreto armado no poço da escada, especificando o concreto C30 e a armadura CA-50, para aumentar a rigidez da estrutura e absorver a maior parte das ações horizontais, conforme observado no modelo estrutural na Figura 27. Realizou-se uma ligação rotulada entre as vigas de aço e o núcleo rígido de concreto armado, evitando momento negativo nessa região. Além disso, incluíram-se os apoios nas bases dos pilares de aço e nas bordas do núcleo rígido de concreto armado considerando as restrições fixas, ou seja, um sistema engastado.

Aplicaram-se as placas convencionais de laje maciça moldada *in loco* de concreto armado, apoiadas nas vigas, com 12 cm de altura, considerando o concreto C30 e a armadura CA-50. Consideraram-se as paredes externas de concreto armado celular autoclavados e as paredes internas de divisórias *drywall*, parte das paredes internas apoiam-se nas vigas, porém algumas paredes internas apoiam-se diretamente sobre a laje.

Figura 27 - Modelagem estrutural



Fonte: Software SCIA Engineer (2019).

Adotaram-se as seguintes solicitações de cargas verticais para cada pavimento, conforme a ABNT NBR 6120 (2019): carga variável devido ao uso e ocupação de $2,0 \text{ kN/m}^2$, carga linear do peso próprio das paredes externas de $2,7 \text{ kN/m}$ e para as paredes internas de $1,5 \text{ kN/m}$. Para a cobertura considerou-se a carga variável devido ao uso e ocupação de $1,0 \text{ kN/m}^2$ e carga linear do peso próprio da platibanda de $1,0 \text{ kN/m}$. O software SCIA Engineer (2019) já considera automaticamente o peso próprio dos materiais e não considerou-se a inclusão dos revestimentos.

Para as solicitações de cargas horizontais, considerou-se a ação do vento distribuída uniformemente em cada pavimento em função da área de influência, considerando a metade a altura do pavimento superior e inferior correspondente. Aplicou-se a carga distribuída de 1,99 kN/m na viga de aço do primeiro pavimento, 2,36 kN/m no segundo pavimento, 2,62 kN/m no terceiro pavimento e 1,40 kN/m na cobertura, tanto para o eixo x quanto para o eixo y. O *software SCIA Engineer* (2019) já considera automaticamente os fatores para o cálculo do vento, de acordo com a ABNT NBR 6123 (1988) Versão corrigida 2013.

Após o lançamento das solicitações de cargas, criaram-se as seguintes combinações, apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Combinações de ações para ELU e ELS sem carga térmica

Nomenclatura	Combinação
CO1	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,5) Uso e Ocup.
CO2	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,5) Uso e Ocup. + (0,84) Vento Y
CO3	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,05) Uso e Ocup. + (1,4) Vento Y
CO4	(1,0) PP + (1,0) PP Paredes + (1,4) Vento Y
CO5	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,5) Uso e Ocup. + (0,84) Vento X
CO6	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,05) Uso e Ocup. + (1,4) Vento X
CO7	(1,0) PP + (1,0) PP Paredes + (1,4) Vento X

Fonte: Autor (2020).

5.3.2 Cenário do Incêndio

Considerou-se o cenário com o foco inicial de incêndio no primeiro pavimento, ocorrendo o aquecimento principiante nesta região, e a sua propagação posteriormente para os demais pavimentos.

Em seguida, determinou-se o tempo requerido de resistência do fogo (TRRF) de 30 minutos, considerando o tipo de ocupação, a altura compreendida entre o ponto de saída situada no nível de descarga do prédio e o piso do último pavimento, a área da edificação, número de andares e a existência e profundidade de subsolos, de acordo com a ABNT NBR 14432 (2000). Os parâmetros para a determinação do TRRF estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros para o TRRF

Parâmetros	Dados
Tipo de ocupação	Residencial
Altura do ponto de saída do prédio até o último pavimento	9 m
Área da edificação	681,60 m ²
Número de andares	4
Existência de subsolo	não

Fonte: Autor (2020).

5.3.2.1 Elemento Estrutural sem Proteções Passivas

Considerando uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, determinou-se pela Equação 14 a temperatura dos gases do incêndio em 841,79 °C e a temperatura das vigas de aço em 804,98 °C, para o TRRF de 30 minutos, sem considerar proteção contra o fogo. Os parâmetros para os cálculos encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros para temperatura das vigas de aço sem proteção no tempo 30 min

Parâmetros	Dados
Temperatura dos gases θ_g	841,79 °C
Temperatura na superfície do aço θ_a	804,98 °C
Massa específica do aço ρ_a	7.850 Kg/m ³
Calor específico do aço c_a	600 J/Kg °C
Emissividade resultante ε_{res}	0,5
Coeficiente de transferência de calor por convecção α_c	25 W/m ² °C
Componente do fluxo de calor devido à radiação φ_r	5.609,26 W/m ²
Componente do fluxo de calor devido à convecção φ_c	938,97 W/m ²
Fluxo de calor por unidade de área φ	6.548,23 W/m ²
Fator de massividade com três lados expostos $\frac{U_m}{A}$	106,54 1/m
Intervalo de tempo Δt	5 s
Elevação da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$	0,74 °C

Fonte: Autor (2020).

Em seguida, realizou-se o lançamento da variação de carga térmica de $804,98\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 784,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ no *software SCIA Engineer* (2019), incluindo a combinação CO8, conforme já descrita na Equação 2 e apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Combinação de ações para ELU e ELS com carga térmica

Nomenclatura	Combinação
CO8	(1,4) PP + (1,4) PP Paredes + (1,0) Térmica + (0,21) Uso e Ocup.

Fonte: Autor (2020).

5.3.2.2 Elemento Estrutural com Proteções Passivas

Para a redução da temperatura no elemento estrutural e para atender a condição de segurança, inseriram-se as proteções passivas, uma vez que o calor que chega ao elemento depende fundamentalmente de como se processa sua condução através do material de proteção. Considerando a temperatura dos gases determinada anteriormente para o TRRF de 30 min, calculou-se a temperatura das vigas de aço para cada uma das proteções passivas: argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha. Para isso, considerou-se uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal através da Equação 15.

Aplicando a argamassa projetada de vermiculita calculou-se a temperatura das vigas de aço em $83,13\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a placa de gesso acartonado em $154,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para a manta de lã de rocha em $163,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os parâmetros utilizados para os cálculos da temperatura encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros para temperatura das vigas de aço com as proteções passivas no tempo 30 min

Parâmetros	Argamassa projetada de vermiculita	Placa de gesso acartonado	Manta de lã de rocha
Temperatura dos gases $\theta_{g,t}$	841,79 °C	841,79 °C	841,79 °C
Temperatura do aço $\theta_{a,t}$	83,13 °C	154,82 °C	163,15 °C
Massa específica do aço ρ_a	7.850 Kg/m ³	7.850 Kg/m ³	7.850 Kg/m ³
Calor específico do aço c_a	600 J/Kg °C	600 J/Kg °C	600 J/Kg °C
Massa específica do material de proteção ρ_m	300 Kg/m ³	800 Kg/m ³	100 Kg/m ³
Calor específico do material de proteção c_m	920 J/Kg °C	1.200 J/Kg °C	1.500 J/Kg °C
Condutividade térmica do material de proteção λ_m	0,06 W/m °C	0,15 W/m °C	0,23 W/m °C
Espessura do material de proteção t_m	0,020 m	0,015 m	0,025 m
Fluxo de calor por unidade de área ξ	0,12 W/m ²	0,22 W/m ²	0,05 W/m ²
Fator de massividade tipo contorno três lados expostos $\frac{U_m}{A}$	106,54 1/m	70,93 1/m	70,93 1/m
Intervalo de tempo Δt	30 s	30 s	30 s
Elevação da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$	1,42 °C	2,83 °C	2,76 °C

Fonte: Autor (2020).

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para atingir os objetivos estipulados neste trabalho, realizou-se uma análise comparativa entre as eficiências técnicas dos diferentes materiais de proteção passivos, comparando os dados apresentados por meio de gráficos e tabelas eletrônicas.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Finalizada a concepção estrutural, determinou-se que a estrutura possui deslocabilidade pequena, a partir da razão entre a análise de 1ª e 2ª ordem serem menores do que 1,1. O *software SCIA Engineer* (2019) já considera automaticamente as imperfeições geométricas iniciais.

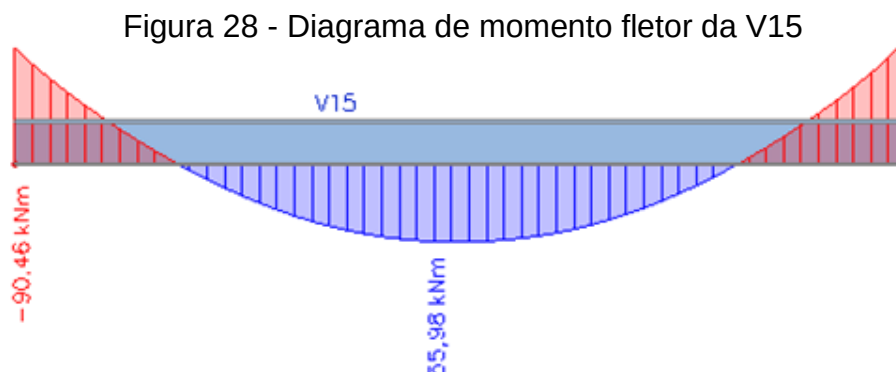
Com a finalidade de analisar o comportamento técnico do elemento estrutural aplicando os materiais de proteção, apresentam-se os resultados da seguinte forma: sem as proteções passivas (sem e com carga térmica) e com as proteções passivas (com carga térmica). Para a avaliação dos resultados, de forma simplificada, analisou-se a situação onde ocorre a viga com a maior flexão.

6.1 ELEMENTO ESTRUTURAL SEM PROTEÇÕES PASSIVAS

Neste item, apresentam-se os resultados das vigas de aço sem proteção passiva e sem a aplicação da carga térmica, e em seguida, os resultados das vigas de aço sem proteção passiva e com a aplicação da carga térmica.

6.1.1 Elemento Estrutural sem Carga Térmica

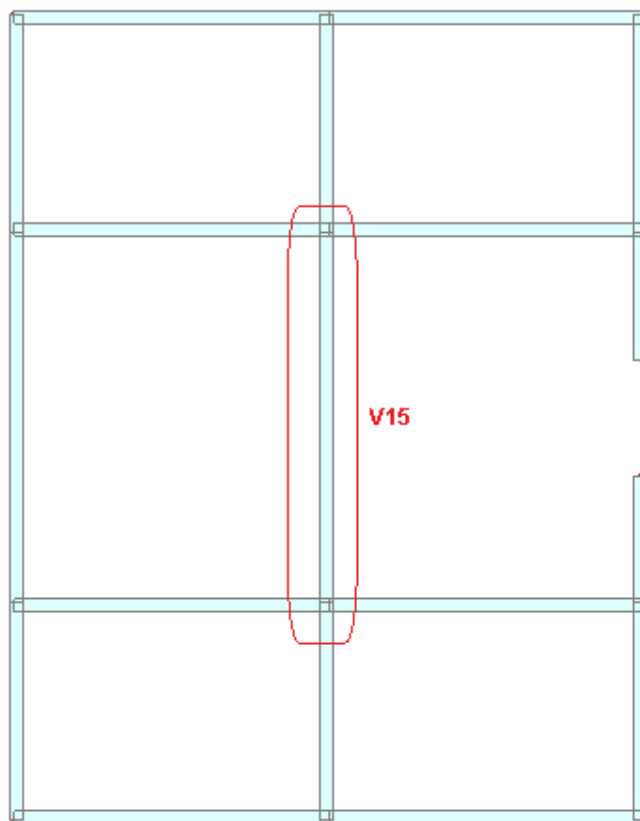
A partir do relatório de solicitações obtido no *software SCIA Engineer* (2019), verificou-se que a viga mais solicitada à flexão, sem considerar proteção passiva e sem aplicar a carga térmica é a V15, com momento fletor de -90,46 kNm, para a combinação CO2, conforme diagrama apresentado na Figura 28. Além disso, a condição de segurança, apresentada na Equação 01, é atendida pois o momento fletor resistente é de 464,27 kNm.



Fonte: *Software SCIA Engineer* (2019).

Este elemento estrutural possui vão de 7,15 m de comprimento e está localizado no pavimento térreo, conforme o detalhe da localização na edificação apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Localização da V15 na edificação

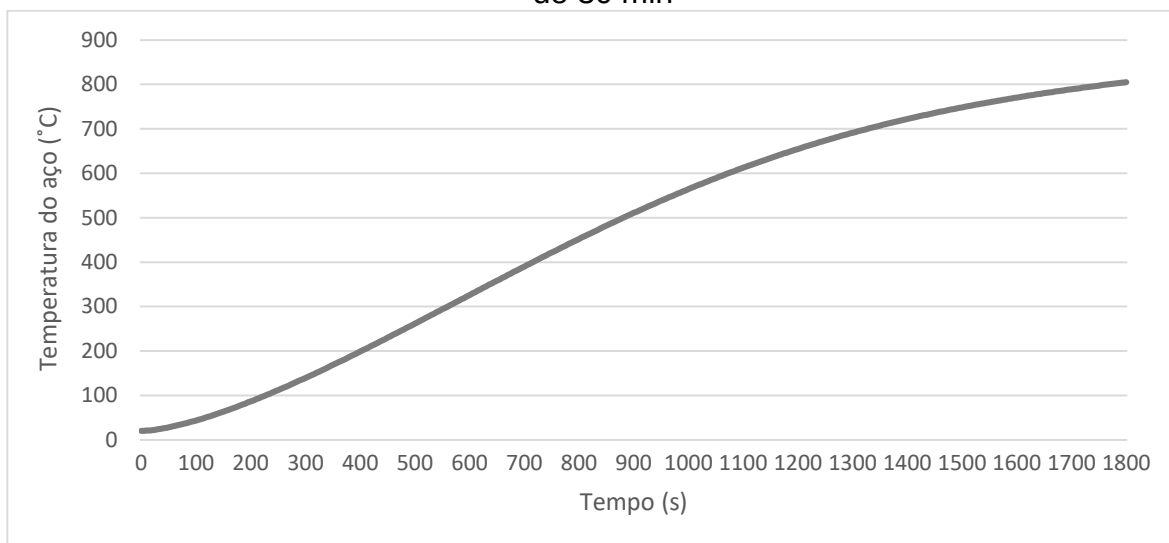


Fonte: *Software SCIA Engineer* (2019).

6.1.2 Elemento Estrutural com Carga Térmica

Após a determinação do cenário de incêndio, da temperatura dos gases de 841,79 °C e da temperatura da viga de aço em 804,98 °C, para o TRRF de 30 minutos, sem considerar proteção contra o fogo, apresenta-se no gráfico na Figura 30 a evolução da temperatura em um intervalo de tempo de 1800 segundos (30 minutos).

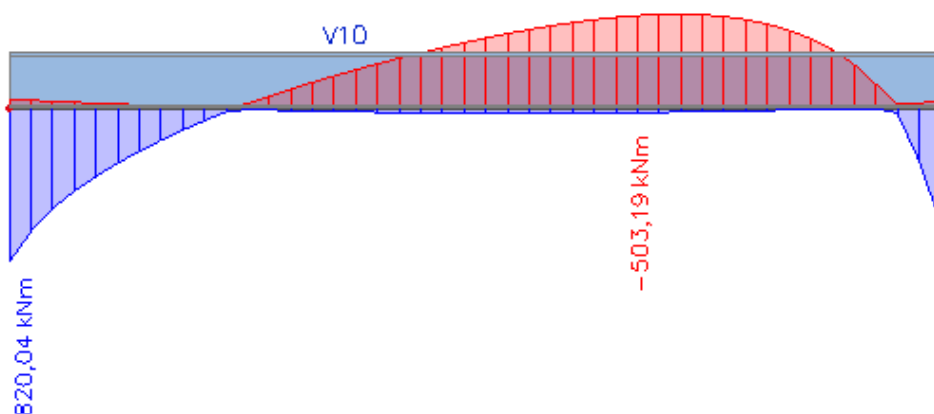
Figura 30 - Evolução da temperatura das vigas de aço sem proteção para TRRF de 30 min



Fonte: Autor (2020).

Dessa forma, a partir do relatório de solicitações obtido no *software SCIA Engineer* (2019), verificou-se que a viga mais solicitada à flexão, sem considerar proteção passiva e aplicando a carga térmica apresentada na Figura 30 é a V10, com momento fletor de 820,04 kNm, para a combinação CO8, conforme diagrama apresentado na Figura 31. Além disso, a condição de segurança, apresentada na Equação 01, não é atendida, pois o momento fletor resistente de 464,27 kNm, ou seja, a solicitação é maior do que a resistência do elemento estrutural mais solicitado.

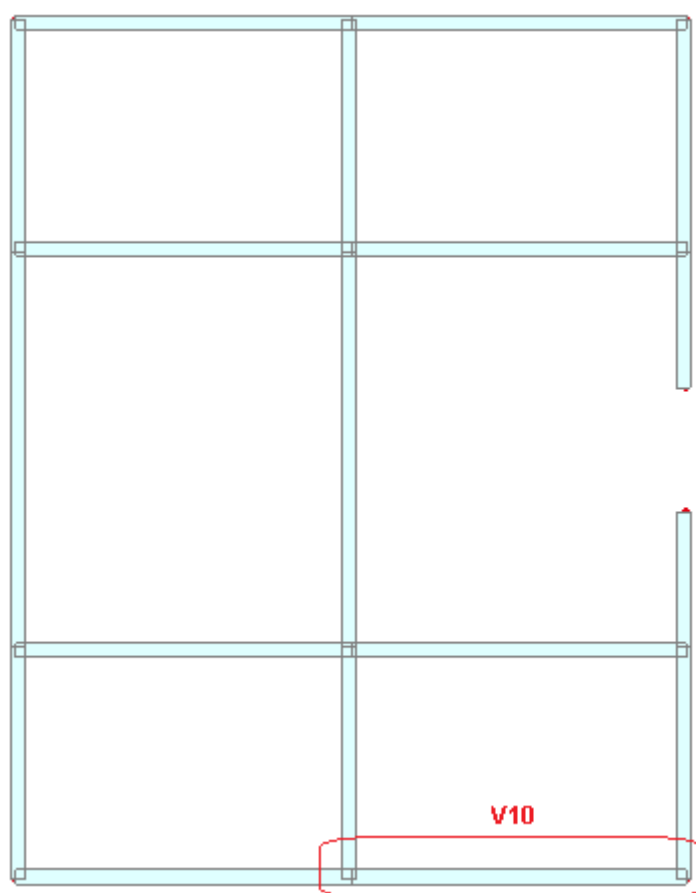
Figura 31 - Diagrama de momento fletor da V10



Fonte: *Software SCIA Engineer* (2019).

Este elemento estrutural possui vão de 6,05 m de comprimento e está localizado no pavimento térreo, conforme o detalhe da localização na edificação apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Localização da V10 na edificação



Fonte: *Software SCIA Engineer* (2019).

Após a aplicação da carga térmica, o elemento estrutural sofre tensões extras, reduzindo drasticamente o desempenho. Na Tabela 15 é possível verificar os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço sem proteção térmica à temperatura de 804,98 °C, em conformidade com a ABNT NBR 14323 (2013) e a Tabela 5, realizando interpolação linear.

Tabela 15 - Fator de redução do aço para a V10 sem proteção térmica

Temperatura na superfície do aço θ_a	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura $\theta_a (K_{y,\theta})$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura $\theta_a (K_{e,\theta})$
804,98 °C	0,107	0,088

Fonte: Autor (2020).

6.2 ELEMENTO ESTRUTUAL COM PROTEÇÕES PASSIVAS

Diante das temperaturas obtidas, abaixo apresentam-se as análises comparativas entre as proteções passivas contra o incêndio. Além disso, a viga de V10, mais solicitada à flexão com a aplicação da carga térmica e aplicação das proteções passivas, atende a condição de segurança apresentada na Equação 01, e, conseqüentemente, todas as demais vigas também.

Na Tabela 16 apresenta-se um resumo dos parâmetros adotados que variam conforme o tipo de material de proteção e a temperatura atingida na superfície do aço com a aplicação de cada um deles (argamassa de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha), em conformidade com a ABNT NBR 14323 (2013). Para eleger os valores de cada material de proteção, levou-se em consideração as propriedades apresentadas no Quadro 1. Diante disso, para cada material adotou-se a menor massa específica, o maior calor específico, a menor condutividade térmica e a menor espessura comercial, tendo em mente o intervalo de valores de cada proteção passiva apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Desta forma, valida-se que a argamassa projetada de vermiculita é a que retém a maior temperatura, uma vez que o elemento estrutural em um incêndio de 30 minutos atinge a temperatura de 83,13 °C, em comparação com o elemento estrutural sem proteção passiva onde a temperatura do elemento estrutural chega a 804,98 °C.

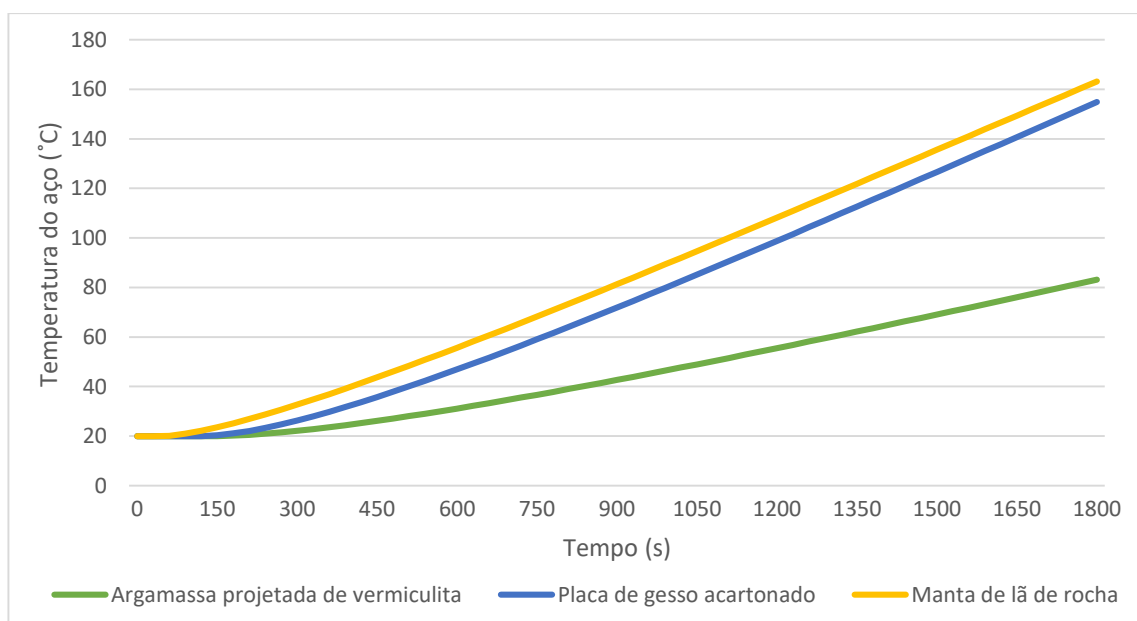
Tabela 16 - Resumo de parâmetros e temperatura na superfície do aço com as proteções passivas

Material de proteção	Argamassa projetada de vermiculita	Placa de gesso acartonado	Manta de lã de rocha
Massa específica ρ_m	300 kg/m ³	800 kg/m ³	100 kg/m ³
Calor específico c_m	920 J/Kg °C	1200 J/Kg °C	1500 J/Kg °C
Condutividade térmica λ_m	0,06 W/m °C	0,15 W/m °C	0,23 W/m °C
Espessura t_m	0,020 m	0,015 m	0,025 m
Temperatura do aço θ_a	83,13 °C	154,82 °C	163,15 °C

Fonte: Autor (2020).

Apresenta-se no gráfico da Figura 33 o aumento da temperatura no intervalo de tempo de 1800 segundos (30 minutos) considerando a carga térmica e o uso das proteções passivas para o TRRF de 30 minutos. A partir do gráfico é possível observar que a argamassa projetada de vermiculita mantém a temperatura ambiente até os 150 segundos, em comparação com a placa de gesso acartonado que mantém até os 120 segundos e a manta de lã de rocha que somente até os 30 segundos após o início do incêndio.

Figura 33 - Evolução da temperatura das vigas de aço com as proteções passivas para TRRF de 30 min



Fonte: Autor (2020).

As vigas de aço apresentaram os seguintes fatores de redução à resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço de acordo com as temperaturas atingidas, apresentados na Tabela 17, realizando interpolação linear, em conformidade com a ABNT NBR 14323 (2013) e a Tabela 5. Diante disso, observa-se que as reduções são pouco alteradas em relação à temperatura ambiente, porém há grande diferença quando comparadas com os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço à temperatura na superfície do aço de 804,98 °C para os elementos sem proteções passivas, conforme indicados na Tabela 15.

Tabela 17 - Fator de redução do aço para as vigas com as proteções passivas

Material de Proteção	Temperatura na superfície do aço θ_a	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ($K_{Y,\theta}$)	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura θ_a ($K_{E,\theta}$)
Argamassa projetada de vermiculita	83,13 °C	1,000	1,000
Placa de gesso acartonado	154,82 °C	1,000	0,945
Manta de lã de rocha	163,15 °C	1,000	0,937

Fonte: Autor (2020).

Com o aumento da temperatura ocorre o alongamento do aço que, a partir de 730 °C há a mudança das características de expansão térmica, conforme apresentado na Figura 22, além disso, a condutividade térmica do aço decai gradativamente até 800 °C, em concordância com o gráfico da Figura 23, e ocorre a perda das propriedades magnéticas do aço quando próximo de 700 °C, o qual está representado na Figura 24. Diante disso, observa-se que, com a aplicação dos materiais passivos, as vigas de aço não passam por estas perdas, uma vez que a maior temperatura atingida é de 163,15 °C, com a utilização da manta de lã de

rocha, ao contrário das vigas de aço sem proteção térmica que atingem a temperatura de 804,98 °C.

Mesmo com a utilização das proteções passivas, a partir de um determinado tempo de ocorrência de incêndio a estrutura começa a sofrer redução de resistência. Ou seja, a estrutura permanecerá com suas propriedades pouco alteradas apenas para o TRRF dimensionado e, posterior a este tempo, se o incêndio ainda não foi contido, inicia-se a depreciação das suas propriedades e com isso grandes deformações.

A redução de resistência ao escoamento inicia-se a partir dos 500 °C, conforme a Tabela 5, a qual será atingida em tempos distintos para cada material de proteção. Na Tabela 18 apresenta-se o tempo e a temperatura correspondente considerando o início da redução de resistência com a utilização da argamassa projetada de vermiculita, manta de lã de rocha e placa de gesso acartonado.

Tabela 18 - Tempo para o início da redução de resistência das vigas de aço com as proteções passivas

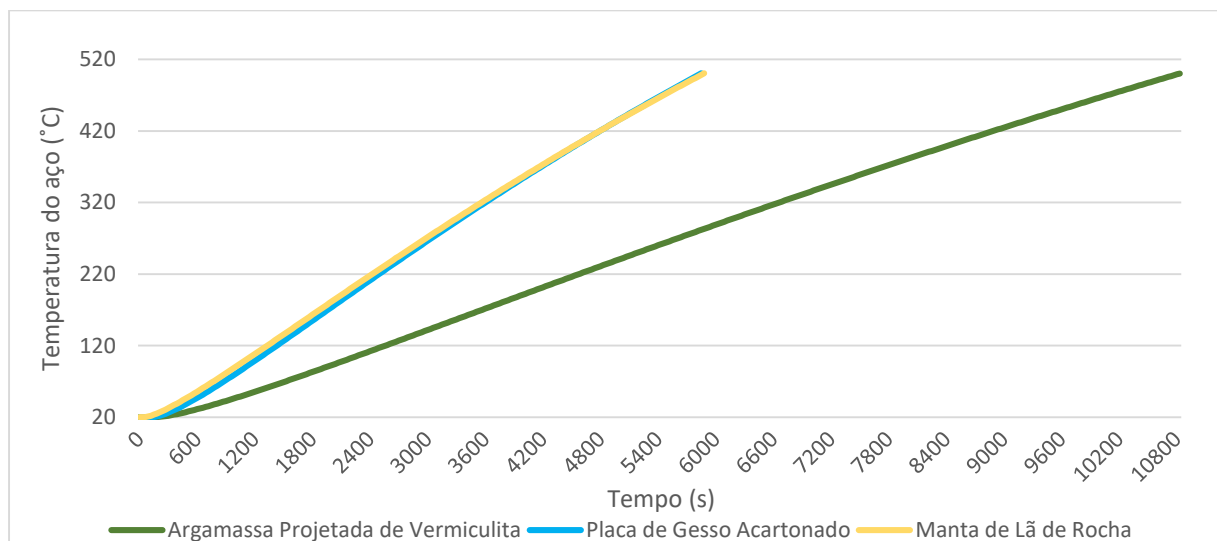
Material de Proteção	Tempo	Temperatura na superfície do aço θ_a	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a ($K_{y,\theta}$)
Argamassa projetada de vermiculita	180,50 min	500,31 °C	0,783
Placa de gesso acartonado	97,50 min	500,53 °C	0,778
Manta de lã de rocha	98,00 min	500,51 °C	0,778

Fonte: Autor (2020).

Diante disso, observa-se que a argamassa projetada de vermiculita é o material que retém as propriedades do aço por mais tempo antes de iniciar a redução da resistência com 180,50 min de incêndio. Uma diferença considerável com o tempo de apenas 14,75 min da estrutura sem a utilização de proteções passivas. Além disso, apresenta-se no gráfico da Figura 34 a evolução da temperatura até o início da redução de resistência com as proteções passivas para

o tempo máximo de 10800 segundos (180,50 min), referente a argamassa projetada de vermiculita.

Figura 34 - Tempo x Início da redução de resistência com as proteções passivas



Fonte: Autor (2020).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalidade de dimensionar uma edificação residencial multifamiliar de aço, em situação de incêndio, utilizando três proteções térmicas (argamassa projetada de vermiculita, placa de gesso acartonado e manta de lã de rocha) e comparar as eficiências técnicas e o comportamento entre os materiais de proteção na viga de aço onde ocorre a situação com a maior flexão, este trabalho de conclusão de curso atingiu os objetivos especificados através das recomendações normativas, prescrições de órgão e hipóteses do cenário de incêndio. Em suma, conforme resultados e comparativos apresentados, as proteções passivas evitam o aumento excessivo da temperatura das estruturas e seus comportamentos são diretamente dependentes de suas propriedades físicas e mecânicas: massa específica, calor específico, condutividade térmica e espessura.

Diante disso, todas as proteções utilizadas no dimensionamento cumpriram o papel de retardar a queda de resistência e rigidez para o tempo requerido à resistência contra o fogo de 30 minutos. Assim sendo, a proteção que apresentou o melhor comportamento técnico foi a argamassa projetada de vermiculita, uma vez que temperatura dos gases para um incêndio de 30 minutos chega a 841,79 °C, as vigas com a aplicação deste material atingiram a temperatura máxima de 83,13 °C. Enquanto que, sem a utilização de algum material de proteção as vigas alcançaram a temperatura de 804,98 °C, ou seja, com a aplicação deste acabamento térmico houve uma redução significativa de 89,67% da temperatura.

Findado o estudo, sugere-se a continuidade do tema em questão e do método proposto neste trabalho, para que possa ser testado e aferido através de comparação de resultados com modelos analíticos, numéricos ou experimentais. Além disso, sugere-se também como proposta, a continuidade da pesquisa em relação ao consumo e custo de implantações dos materiais passivos de proteção contra o incêndio para as estruturas de aço.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:2019:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6130:1988 – Errata 2:2013:** Forças devidas ao vento em edificações.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432:2000:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimentos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15524-2:2007:** Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos.

BELLEI, I. **Edifícios Industriais em Aço:** Projeto e Cálculo, São Paulo: Pini, 2010.

CESARINO, Yuri Bessa. **Estudo Analítico e Numérico Via MEF da Instabilidade de Vigas Metálicas em Situação de Incêndio.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental de Brasília, DF, 412 p., 2018.

CLEVELAND. **Horrific Collinwood School Fire Of 1908.** Disponível em: https://www.cleveland.com/entertainment/2016/10/horrific_collinwood_school_fir.html. Acesso em: 21 mar. 2020.

CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO. **Conceitos Básicos de Segurança Contra Incêndio.** Instrução Técnica 02/2018. São Paulo, 31 p., 2018.

CORPO DE BOMBEIROS DO PARANÁ. **Fogo.** Disponível em: <http://www.bombeiros.pr.gov.br/Pagina/Fogo>. Acesso em: 18 mar. 2020.

DIAS, Mateus de Souza Furriel. **Análise do comportamento térmico de vigas mistas aço-concreto submetidas a Incêndio.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 163 p., 2018.

FAKURY, Ricardo Hallal; CASTRO, Ana Lydia Reis; CALDAS Rodrigo Barreto. **Dimensionamento Básico de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

FERREIRA, Matheus Wanglon. **Estudo Numérico dos Efeitos Estruturais da Exposição de Pilares em Concreto Armado a Altas Temperaturas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 238 p., 2019.

INOVAE. **A Sustentabilidade do Aço e das Estruturas Metálicas**. *Journal of Engineering and Technology Innovation*. São Paulo, v.3, n.1, p.92-110, jan/abr., 2015.

MACIOCI, Maria. **Incêndio de Roma: Tais como Danos à Cidade e Quantas Vítimas?** Disponível em: <http://www.pilloledistoria.it/12153/storia-antica/incendio-di-roma-danni-vittime?lang=pt>. Acesso em: 19 mar. 2020.

MARTINS, Michele Mendonça. **Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, MG, 232 p., 2000.

MENDES, Cristiane Lopes. **Estudo Teórico Sobre Perfis Formados a Frio em Situação de Incêndio**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 160 p., 2004.

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio**. São Paulo: Gerda, 5^a ed., 2015.

RUSCHEL, Fernanda. **Avaliação da Utilização de Ferramentas de Simulação Computacional para Reconstituição de Incêndios em Edificações de Concreto Armado: Aplicação ao Caso Shopping Total em Porta Alegre-RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 133 p., 201

SAFETY. **Segurança Contra Incêndio**. Disponível em: <https://safety-smt.com.br/seguranca-trabalho/ppra/pcmso/seguranca-contra-incendio-1.html>. Acesso em: 21 mar. 2020.

SILVA, Valdir Pignatta. **Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**: Conforme ABNT NBR 15200:2012. São Paulo: Blucher, 2012.

SOUZA, Valdenir Junior de. **Simulação Computacional do Comportamento de Estruturas de Aço Sob Incêndio**. Tese de Doutorado em Estruturas Metálicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, RS, 147 p., 2004.

APÊNDICE A

