

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JONAS COSTA CORREIA DOS SANTOS

**TINTAS INTUMESCENTES COMO PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS
METÁLICAS FRENTE A SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2022

JONAS COSTA CORREIA DOS SANTOS

**TINTAS INTUMESCENTES COMO PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS
METÁLICAS FRENTE A SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Dra. Carla Cristina
Nascimento Santos Pereira

ARACAJU

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Jonas Costa Correia dos.

S237t Tintas intumescentes como proteção passiva em estruturas metálicas
frente à situação de incêndio. / Jonas Costa Correia dos Santos. –
Aracaju, 2022.

45 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira.
Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto
Federal de Sergipe, 2022.

1. Tinta intumescente. 2. Incêndio. 3. Proteção passiva. 4. Estrutura
metálica. 5. Revestimento contra o fogo. I. Pereira, Carla Cristina
Nascimento Santos. II. Título.

CDU 624.014

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 223

**TINTAS INTUMESCENTES COMO PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS
METÁLICAS FRENTE A SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.**

JONAS COSTA CORREIA DOS SANTOS

Esta monografia foi apresentada às 10h00 do dia 18 de fevereiro de 2022 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



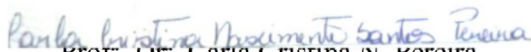
Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos

(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da
Silva

(IFS – Campus Aracaju)



Prof. Dr. Carla Cristina N. Pereira

(IFS – Campus Aracaju)

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 Pablo Gleydson de Sousa
Data: 04/03/2022 14:35:23-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa

(IFS – Campus Aracaju)

Coordenador da COEC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por ele ter me ajudado, sustentado e fortalecido nessa caminhada, pois sem ele não conseguiria.

A minha família, principalmente meus pais, que se empenharam e se esforçaram para dar condições melhores de estudo.

Aos meus amigos que me ajudaram e caminharam comigo esses anos.

A minha orientadora Prof. Dr^a Carla Cristina que me guiou com sabedoria nessa trajetória.

A todos que estiveram presente e colaboraram de forma direta e indireta para realização dessa pesquisa.

RESUMO

SANTOS, Jonas Costa Correia dos. **Tintas intumescentes como proteção passiva em estruturas metálicas frente a situação de incêndio**. 45 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2022.

Com o uso de estruturas metálicas vem a necessidade de proteção contra altas temperaturas, já que quando o aço, sem nenhuma proteção, submetido a temperaturas elevadas, sofre uma elevação rápida de temperatura, e, em função disto, há um acréscimo de tensões devido às deformações e, conseqüentemente, vai perdendo suas propriedades mecânicas. A proteção que as tintas intumescentes conferem às estruturas metálicas ainda é pouco difundido no âmbito nacional, tanto que não existe nenhuma norma brasileira que regule a sua aplicação e experimentação. O presente estudo é um trabalho de revisão bibliográfica e tem como objetivo realizar uma análise comparativa com os resultados de dois trabalhos que fizeram a experimentação de perfis metálicos (corpos de prova) com tintas intumescentes e sem proteção, onde se concluiu que a presença de tinta intumescente nos corpos de prova influenciou positivamente nas características consideradas nos trabalhos consultados, independente do método de ensaio proposto e que, no geral, em relação ao tempo, é importante se atentar à escolha da tinta e ao dimensionamento da camada de proteção, conforme perfil, espessura e fabricante.

Palavras-chave: Tintas intumescentes, incêndio, proteção passiva, estruturas metálicas, revestimento contra fogo.

ABSTRACT

SANTOS, Jonas Costa Correia dos. **Tintas intumescentes como proteção passiva em estruturas metálicas frente a situação de incêndio**. 45 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2022.

With the use of metallic structures comes the need for protection against high temperatures, since when steel, without any protection, subjected to high temperatures, it undergoes a rapid rise in temperature, and, as a result, there is an increase in stress due to deformations and, consequently, it loses its mechanical properties. The protection that intumescent paints provide to metallic structures is still not very widespread at the national level, so much so that there is no Brazilian standard that regulates its application and experimentation. The present study is a work of bibliographic review and aims to carry out a comparative analysis with the results of two works that carried out the experimentation of metallic profiles (specimens) with intumescent paints and without protection, where it was concluded that the presence of paint intumescent in the specimens positively influenced the characteristics considered in the works consulted, regardless of the proposed test method and that, in general, in relation to time, it is important to pay attention to the choice of paint and the dimensioning of the protection layer, according to the profile, thickness and manufacturer.

Keywords: Intumescent paints, fire, passive protection, metallic structures, fire coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio	16
Figura 2 - Modelo de um incêndio natural	17
Figura 3 - Modelo de incêndio Padrão	18
Figura 4 - Representação dos fatores de redução em relação a temperatura...	23
Figura 5 - Esquema das zonas formadas durante o fenômeno de intumescência	25
Figura 6 - Intumescimento de tinta na estrutura	26
Figura 7 - Desenho esquemático da posição dos maçaricos ao longo da altura dos perfis	30
Figura 8 - Disposição dos Termopares	31
Figura 9 - Aparência dos corpos de prova após o preparo inicial e pintura intumescente.	32
Figura 10 - Fluxograma de variáveis abordada no processo experimental dos trabalhos analisados	35
Figura 11 – Tempo até atingir carga máxima	37
Figura 12 – Temperatura da Câmera Termográfica e Termômetro Digital	38
Figura 13 – Carga máxima suportada até a flambagem do perfil	39
Figura 14 – Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis sem tinta do trabalho de Basso (2016)	40
Figura 15 – Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis com tinta PMA 600 do trabalho de Basso (2016)	40
Figura 16 – Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis com tinta LaPol do trabalho de Basso (2016)	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), em minutos	21
Tabela 2 - Fatores de redução do aço em relação a temperatura	23
Tabela 3 - Alguns dos componentes mais utilizados em tintas intumescentes	24
Tabela 4 – De diferenças dos ensaios	36
Tabela 5 – Dados da experimentação de Basso (2016)	36
Tabela 6 – Dados do trabalho de L. S. GIROTTO, A. B. D. SANTOS e J. A. SANTOS (2019)	37
Tabela 7 – Espessuras das tintas utilizadas em micron	39

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Carbono
CONTECC	Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia
C _w	Constante de empenamento da seção transversal
<i>E</i>	módulo de elasticidade do aço
G	Módulo de elasticidade transversal do aço
H ₂ O	Água
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
HCl	Ácido clorídrico
I _x	Momento de inércia da seção transversal
J	Constante de torção da seção transversal
K _x	Coeficiente de flambagem por flexão
LaPol	Laboratório de Polímeros do Rio Grande do Sul
L _x	Comprimento da cantoneira
NBR	Norma Brasileira
N _{ex}	Força axial de flambagem elástica
N _{exz}	Força axial de flambagem elástica por flexo – torção
N _{ez}	Força de flambagem por torção em relação ao eixo z
NH ₃	Hidróxido de amônia
r _o	raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento
<i>t</i>	Tempo
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
y _o	coordenada do eixo de cisalhamento na direção do eixo y
θ _g	Temperatura dos gases no ambiente em chamas
θ _{g,0}	Temperatura dos gases no instante $t = 0$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1 Tintas	14
3.1.1 Incêndio	15
3.1.2 Modelo de Incêndio Natural	17
3.1.3 Modelo de Incêndio Padrão	17
3.1.4 Transmissão de Calor	18
3.1.5 Estruturas em Aço em Situação de Incêndio	19
3.1.6 Propriedades Mecânicas e Térmicas do Aço Importantes em Situação de Incêndio	21
3.2 Tintas Intumescentes	24
3.2.1 Modelo de Experimentação da Tinta Intumescente	26
3.3 Trabalhos Revisados	32
3.3.1 Basso (2016)	32
3.3.2 Trabalho de Girotto <i>et al</i> (2019)	33
4. METODOLOGIA	34
5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS TRABALHOS	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil está se desenvolvendo cada vez mais e isso é devido aos sistemas de produção que busca uma obra mais enxuta e com produtividade elevada. Assim, tem crescido o uso das estruturas metálicas, em razão das suas propriedades e preço competitivo sob certas circunstâncias. No entanto, deve ser observado dimensionamento destas conforme as normas e verificado a condição de incêndio, que no Brasil começou a receber mais atenção na última década devido aos grandes incêndios.

Para Basso (2016), para eficácia no combate, prevenção e segurança contra o incêndio são necessários conhecimentos precisos sobre os materiais envolvidos e como esses reagem frente a uma situação de temperaturas elevadas. Atualmente, o mercado brasileiro se depara com uma situação complicada, pois faltam profissionais capacitados e instituições com os equipamentos adequados para serem feitos estudos nesta área.

Entretanto, quando as estruturas metálicas são submetidas a um fluxo térmico ou a altas temperaturas, mais precisamente a 550°C, o aço perde grande parte da sua resistência e a estrutura começa a entrar em colapso. Então, é preciso proteger as estruturas metálicas para que resistam a um incêndio por um determinado tempo, podendo ser de 30 minutos, 60min, 90 min ou 120min, esse tempo é denominado como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), segundo PEIXOTO (2017).

Sendo assim a proteção passiva apresenta técnicas que servem para retardar as influências geradas pelas ações térmicas decorrentes da ação de incêndios, técnicas estas como a proteção por meio de tintas intumescentes. Essa proteção quando submetidas a situações de temperaturas elevadas, passam por diversas reações que originam uma espuma carbonizada com alto desempenho isolante.

Neste trabalho de revisão bibliográfica será abordado sobre a proteção passiva por meio de tintas intumescentes em elementos estruturais em aço, através da comparação e análise entre métodos sugeridos dos trabalhos analisados com o intuito de elucidar a importância e eficiência desse tipo de proteção frente à situação de incêndio.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo é analisar e comparar os distintos métodos de ensaio sugeridos pelos autores dos trabalhos consultados quando da utilização das tintas intumescentes como proteção passiva sobre situação de incêndio nas estruturas metálicas

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca do tema tintas intumescentes para proteção de estruturas metálicas contra incêndio;
- Entender as diferenças entre os métodos de ensaios propostos pelos autores por meio de comparação entre procedimentos;
- Compreender as propriedades importantes quando se trata de proteção contra incêndio de estruturas metálicas quanto ao incêndio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Tintas

Tintas podem ser definidas como uma composição fluida e viscosa, em que são dispersos dois ou mais componentes em aglomerado líquido, que ao sofrerem processo de cura, formam uma película aderente ao substrato onde são aplicadas e têm como finalidade proteger e dar acabamentos estéticos às superfícies. Vale salientar a existência e a importância das tintas em pó, onde não há utilização de solventes, apresentando o interesse comercial e ambiental (FAZENDA, 2009).

As tintas são compostas de cinco componentes básicos: resina, pigmentos e cargas, aditivos e solventes, os quais são descritos a seguir PILZ (2004): resina juntamente com os pigmentos e cargas, constitui a porção não-volátil da tinta, que possui como função ser formador de filme, sendo também chamado de veículo, agregante ou *binder*. Sem a presença da resina, todos os demais componentes da tinta não teriam aderência ao substrato.

Segundo STRASSBURGER (2021), a resina atribui à tinta o maior número de características e propriedades, tais como brilho, dureza, flexibilidade, adesão, resistência mecânica e química. A escolha da resina correta é a chave para a formulação de uma boa tinta. A resina também denomina o tipo de tinta ou revestimento empregado: acrílico, alquídico, epóxi, etc.

Pigmentos são definidos como materiais sólidos, orgânicos ou inorgânicos e insolúveis. Os pigmentos possuem a finalidade de conferir cor, opacidade, poder de cobertura, proteção anticorrosiva e anti-incrustante, além de ajudar na proteção antichama.

Aditivos componentes que são adicionados em pequena quantidade na tinta (em geral de 1 a 3%), proporcionando características especiais ou melhoria nas propriedades. São utilizados como auxiliares nas diversas fases de fabricação, influenciam na manufatura, estabilidade, aplicabilidade, qualidade e aspecto do filme aplicado. São exemplos de aditivos: secantes, anti sedimentantes, niveladores, antipele, antiespumantes, espessantes, plastificantes, biocidas, surfactantes, tensoativos, retardantes de chama, entre outros.

Ainda segundo STRASSBURGER (2021), cargas são pós de natureza inorgânica que servem para melhorar algumas características do revestimento, porém, sem conferir cor nem opacidade. Na sua maioria são quimicamente inertes e beneficiadas em diversas faixas granulométricas de acordo com a aplicação desejada. As cargas têm como atribuição baratear a tinta, ajustar o brilho, aumentar os sólidos e a dureza, aumentar a resistência à abrasão e modificar as propriedades reológicas da tinta. As

cargas mais empregadas são carbonato de cálcio, talco, mica, barita, quartzo, entre outros.

Solvente é a porção volátil da tinta, um líquido de baixo ponto de ebulição que possui como objetivo dissolver a resina, ajustando a viscosidade da tinta e permitindo a dispersão eficiente dos pigmentos, além de auxiliar na formação do filme sobre o substrato, (FAZENDA 2009). A correta seleção dos solventes implica em boas propriedades da tinta líquida e bom desempenho após a aplicação.

Nos itens a seguir é apresentado o estado da arte acerca das tintas intumescentes, mas antes se faz necessário definir parâmetros importantes sobre incêndio e as estruturas metálicas.

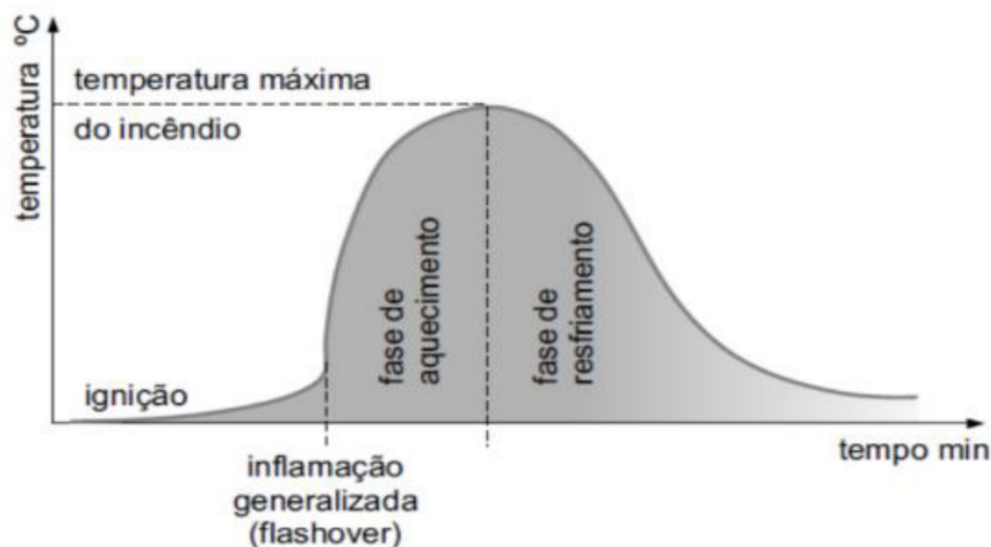
3.1.1 Incêndio

O incêndio pode ser entendido como uma situação de fogo não controlada. É definido como a ocorrência de um processo de combustão em um ambiente que não está preparado ou não idealizado para tal processo (CAMPÊLO, 2008). Portanto, para que ocorra a combustão, torna-se necessária a existência simultânea de três fatores: combustível, fonte de calor e comburente (oxigênio do ar).

A ação térmica do incêndio em uma estrutura é descrita como um fluxo de calor provocado pela diferença de temperatura entre os gases quentes e os elementos da estrutura, em que tal fluxo de calor ocorre primordialmente pelos mecanismos de transferência de convecção e radiação. O aumento da temperatura nos elementos estruturais, devido à ação térmica, causa redução da resistência, redução do módulo de elasticidade e o aparecimento de esforços solicitantes adicionais (ações indiretas) nas estruturas em que há restrições às deformações térmicas.

O incêndio, no que concerne ao estudo das estruturas, pode ser caracterizado por uma curva que fornece a temperatura dos gases em função da duração do incêndio. Para (SILVA 2010) a evolução de um incêndio consiste em três etapas: a fase inicial de elevação progressiva da temperatura (fase de ignição), a fase de aquecimento brusco e a fase de resfriamento e extinção. Na fase de ignição as temperaturas elevam-se gradualmente, ou seja, o incêndio resulta em pequenas proporções onde as temperaturas permanecem baixas não apresentando risco a estrutura.

Figura 1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio



Fonte: (VARGAS; SILVA 2010)

A fase em seguida é a de aquecimento acelerado dos gases. Enquanto a fumaça se forma, ela começa a atrair o ar do espaço circundante para a coluna ascendente de vapores, ou seja, o ar, rico em oxigênio é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção, isto é, o ar quente sobe, forçando a entrada de ar fresco pelas aberturas, principalmente nos pontos mais baixos do ambiente. Com o crescimento do incêndio, mais rapidamente, fornece um retorno da radiação proveniente das chamas e dos gases quentes para outro material combustível. O flashover corresponde ao instante em que ocorre o aumento brusco da inclinação da curva temperatura-tempo. Nessa etapa a camada de vapores, fumaça, chega a níveis altíssimos de temperatura emitindo assim uma grande quantidade de calor por todo o ambiente, e, por meio da irradiação todos os materiais se incendiam de forma generalizada. Segundo PANNONI (2004), após a ocorrência do flashover, a temperatura em um compartimento pode chegar aos 1000 °C. Em seguida, como mostra a figura 1, inicia-se a fase de resfriamento que, devido à falta de combustível, as temperaturas dos gases decrescem e a taxa de calor começa a decair. Outro fator que pode contribuir para o resfriamento é a falta de comburente, ou seja, o fogo consome o oxigênio ao ponto de ser insuficiente para sustentar a combustão. Nesta situação, as chamas podem deixar de existir se não houver ar suficiente para mantê-las.

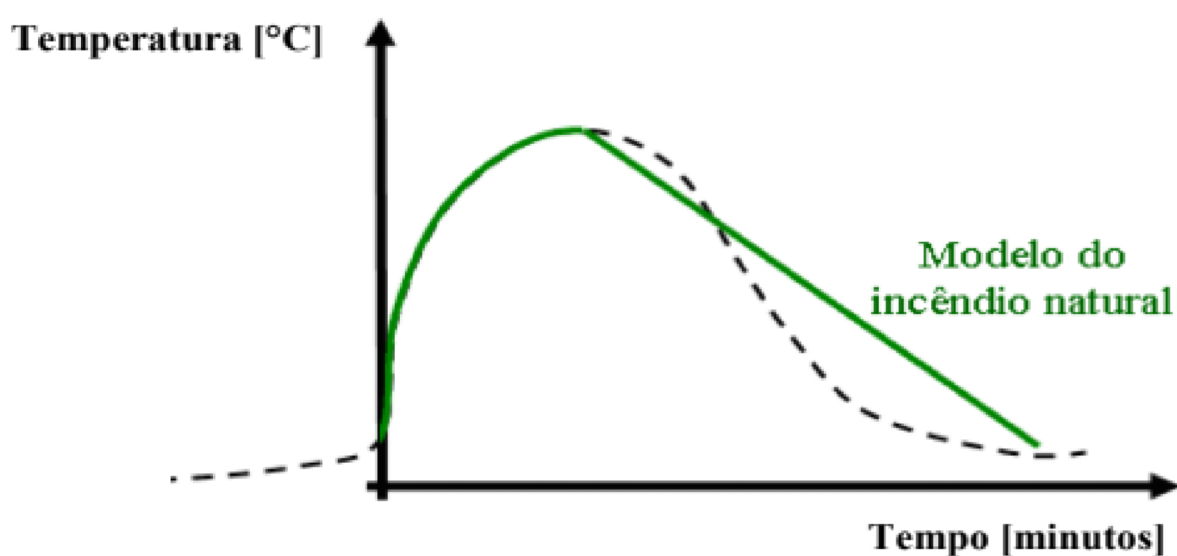
Tendo em vista que a curva “*temperatura x tempo*”, que simula um incêndio real, se altera a cada tipo de edificação a ser estudada, pois está relacionada a parâmetros como disposição das aberturas, quantidade de cargas combustíveis e fator de ventilação. Em virtude dessas dificuldades para a determinação, os principais órgãos desenvolveram métodos em que a curva “*temperatura x tempo*” seja modelada para, de forma simples, representarem casos encontrados na prática. Dentre os modelos estão o de incêndio natural e o de incêndio padrão.

3.1.2 Modelo de Incêndio Natural

O modelo de incêndio natural conforme mostra a figura 2, desconsidera a fase de ignição, pois entende que as temperaturas não são suficientes para que atinja níveis que afetem a estrutura.

A curva “*temperatura x tempo*” de um incêndio natural compartimentado dependem de vários parâmetros: carga de incêndio, grau de ventilação, características físico-térmicas dos materiais componentes de vedação, entre outras, ou seja, há variação em cada compartimento da edificação.

Figura 2 - Modelo de um incêndio natural



Fonte: Kimura (2009)

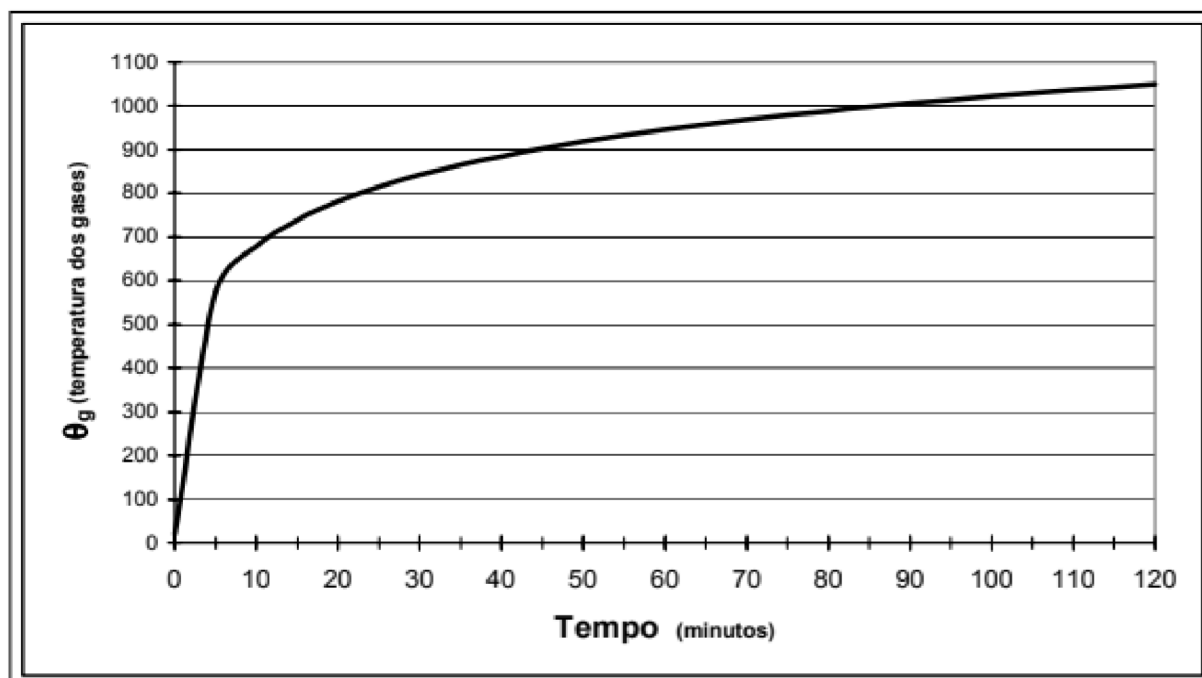
Segundo Paiva (2018), a curva mostrada na figura 2 é elaborada conforme modelos matemáticos obtidos em ensaios pela simulação de situações reais de incêndio. Os ensaios envolvem a ocorrência de um incêndio em compartimentos com aberturas, mas de modo que não haja possibilidade de propagação do incêndio para o lado externo, por efeito das características de estanqueidade, de isolamento térmico e resistência dos elementos de vedação.

3.1.3 Modelo de Incêndio Padrão

Tendo em vista que a curva temperatura-tempo do incêndio se altera, para cada situação estudada, convencionou-se adotar uma curva padronizada como modelo para a análise experimental de estruturas. Para SILVA *et al.* (2010, p. 38) por simplicidade, as normas técnicas permitem que essa curva seja empregada como curva de aquecimento em projeto de estruturas.

Contudo, a principal característica do modelo incêndio padrão é possuir um ramo ascendente, admitindo que a temperatura é sempre crescente com o tempo e, além do mais, independente das características do ambiente e da carga de incêndio.

Figura 3 - **Modelo de incêndio Padrão**



Fonte: BERNARDES (2002).

Segundo as normas brasileiras ABNT 5628 e a ABNT 14432 ambas de 2001, a elevação padronizada da temperatura em função do tempo, curva do incêndio padrão, é dada pela equação:

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

Sendo:

θ_g - temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

$\theta_{g,0}$ - temperatura dos gases no instante $t = 0$, geralmente admitida 20 °C;

t - tempo (min).

3.1.4 Transmissão de Calor

Segundo Wang (2002), pela definição fenomenológica de transferência de calor, a mesma ocorre quando há interação entre dois sistemas, ou um certo sistema e o meio em que o mesmo se insere, apresentam temperaturas diferentes e são colocados em contato.

Durante um incêndio, a temperatura dos elementos estruturais após certo intervalo de tempo tende a se aproximar da temperatura dos gases quentes, ou seja, quanto maior a diferença de temperatura maior será a taxa de calor transmitida. Para que a

elevação térmica nos elementos seja determinada, é necessário conhecer os mecanismos de transferência de calor envolvidos, conhecidos por condução, convecção e radiação. Esses podem atuar de forma isolada ou combinada, dependendo das circunstâncias. Em outras palavras, é importante saber o modo pelo qual a energia calorífica é gerada e dissipada no ambiente.

3.1.4.1 Condução

Em BUCHANAN (2002), a condução é descrita como um mecanismo de transferência de calor entre materiais sólidos, por conta da energia cinética de átomos e moléculas. Dessa forma, materiais considerados bons condutores elétricos também são bons condutores de calor. Em materiais de baixa condutividade térmica, o calor é conduzido por uma vibração mecânica da cadeia molecular. A transferência de calor flui de zonas com temperaturas altas (maior energia cinética) para as temperaturas mais baixas, assim como nas estruturas metálicas, pois o aço são bons condutores térmicos.

3.1.4.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre pelo movimento dos fluidos, sejam eles gases ou líquidos, e é um importante fator no espalhamento das chamas, bem como no transporte ascendente de fumaça e gases quentes até o teto ou para o exterior do compartimento em chamas através das aberturas.

De acordo com AZEVEDO (2010) a movimentação pode ser induzida pelo próprio incêndio, ou seja, os gases quentes ascendem e o ar frio imediatamente os substitui. A circulação dos gases também pode ser induzida por uma fonte externa ao incêndio, tal como o vento.

3.1.4.3 Radiação

Segundo BUCHANAN (2002), a radiação é a transferência de energia por meio de ondas eletromagnéticas que podem viajar pelo vácuo, ou através de sólido transparente ou líquido. Quando a energia térmica radiante passa por um meio, qualquer objeto dentro desse caminho pode absorver, refletir ou transmitir a radiação térmica incidente.

3.1.5 Estruturas em Aço em Situação de Incêndio

Os projetos estruturais relativos à resistência ao incêndio são baseados no fato de que as altas temperaturas decorrentes de um incêndio reduzem a resistência mecânica e a rigidez dos elementos estruturais da edificação e, adicionalmente, promovem expansões térmicas diferenciais, podendo levar a estrutura ao colapso (STEEL TIMES, 1993).

Em virtude disso para que o colapso da estrutura seja evitado, em situação de incêndio, as precauções de segurança contra incêndio devem ser tomadas para que os edifícios estabeleçam as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os mesmos, mantendo a estabilidade e resistência ao fogo por um tempo suficiente (NEVES,1994).

Desta forma a norma NBR 14432:2001 é encarregada por atribuir condições para elementos estruturais e de compartimentação em situação de incêndio de maneira a evitar o colapso estrutural da edificação. Conquanto, os critérios presentes na norma para a resistência ao fogo de elementos construtivos são baseados no modelo de incêndio-padrão, indicando o importante conceito de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), dado como “o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão” (NBR 14432:2001).

Além disso, para a definição do TRRF de uma edificação preconizado pela norma, a mesma determina e considera a severidade e o potencial destrutivo dos incêndios, sendo estes dependentes dos seguintes fatores: tipo de uso e ocupação, área, altura da edificação, profundidade do subsolo, facilidade de acesso para combate ao incêndio.

Segundo Silva et al. (2010, p. 22-23):

Entende-se por resistência ao fogo de elementos estruturais a capacidade de suportar, por um dado período, os intensos fluxos de energia térmica que ocorrem durante um incêndio, sem deixar de exercer sua função portante, de estanqueidade e de isolamento, quando exigidas. No caso dos elementos de aço é a função portante ou estabilidade aquela que deve ser verificada.

Para Silva et al. (2010, p. 35), o TRRF é o tempo mínimo que um elemento deve resistir frente a um incêndio padrão. Os mesmos autores dizem que “Por se tratar de uma curva padronizada e não de uma curva temperatura - tempo de um incêndio real, esse tempo é utilizado apenas para fins de verificação de projeto ou de dimensionamento do material de revestimento contra fogo.”.

Silva et al. (2010, p. 35) dizem que o TRRF poderia ser calculado, mas como os parâmetros variam de edificação para edificação, seria algo muito trabalhoso. O método tabular simplifica a utilização do TRRF onde este valor é definido e tabelado de acordo com o uso da edificação e suas dimensões. Os códigos utilizam esta forma tabelada exigindo segurança através de um TRRF.

Tabela 1 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), em minutos

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

Fonte: NBR ABNT 14432:2001.

Segundo a NBR 14432:2001 o TRRF pode assumir valores de 30, 60, 90 ou 120 minutos. Os TRRF's exigíveis no âmbito de aplicação da norma NBR 14432:2001, estão apresentados na tabela 1 os tempos entre parênteses podem ser usados em subsolos nos quais a área individual dos pavimentos seja menor ou igual a 500 m² e em edificações nas quais os pavimentos acima do solo tenham área individual menor ou igual a 750 m².

3.1.6 Propriedades Mecânicas e Térmicas do Aço Importantes em Situação de Incêndio

As propriedades mecânicas (como a resistência ao escoamento, resistência à tração e módulo de elasticidade) do aço são reduzidas quando o mesmo é submetido a altas temperaturas, como as que ocorrem no caso de incêndios causando assim uma perda da resistência e da rigidez. Desse modo, essas perdas devem ser levadas em conta no dimensionamento em situação de incêndio das estruturas em aço.

As propriedades térmicas do aço, tais como, coeficiente de dilatação térmica, calor específico e condutividade térmica também variam com a elevação da temperatura. O coeficiente de dilatação térmica está diretamente relacionado com o comportamento estrutural em situação de incêndio, visto que o valor deste coeficiente influencia nos valores das solicitações devido às dilatações térmicas e gradientes

térmicos que ocorrem nos elementos estruturais durante um incêndio. A condutividade térmica e o calor específico se relacionam com a difusão do calor através do elemento estrutural, resultando em uma menor ou maior propensão deste ser aquecido. Um elemento em aço, por possuir uma elevada condutividade térmica, absorve calor mais rapidamente e não exhibe gradientes térmicos tão altos como um elemento de concreto (O'CONNOR, 1995).

Diante disso, a norma NBR 14323:2013 refere-se ao estabelecimento dos requisitos para o projeto e dimensionamento de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio com base no método dos estados-limites. É válido ressaltar que para os projetos em situação de incêndio há somente a verificação dos estados-limites últimos aplicáveis a altas temperaturas, não havendo a necessidade de verificação dos estados-limites de serviço. Mais além, os métodos simplificados da norma limitam-se ao dimensionamento de estruturas sob incêndio pela análise de elementos isolados e assumindo-se uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal da barra.

Para taxas de aquecimento entre 2°C/min e 50°C/min, a tabela fornece fatores de redução, relativos aos valores a 20°C, para o limite de escoamento dos aços laminados a quente, limite de escoamento dos aços treilados e módulo de elasticidade de todos os tipos de aço, em temperatura elevada, respectivamente, $k_{y,\theta}$, $k_{y0,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, de modo que:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$$

$$k_{y0,\theta} = f_{y0,\theta} / f_{y0}$$

$$k_{E,\theta} = E_\theta / E$$

Sendo:

$f_{y,\theta}$ é o limite de escoamento dos aços laminados a quente a uma temperatura θ ;

f_y é o limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C;

$f_{y0,\theta}$ é o limite de escoamento dos aços treilados a uma temperatura θ ;

f_{y0} é o limite de escoamento dos aços treilados a 20°C;

E_θ é o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura θ ;

E é o módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.

A tabela 2 apresenta os fatores de redução da resistência ao escoamento do aço e do módulo de elasticidade do aço. É perceptível pela visualização da tabela a influência da elevação da temperatura em estruturas de aço, em que o módulo de elasticidade já passa a se reduzir para a temperatura de 200 °C e os parâmetros são considerados nulos para a temperatura de 1200 °C.

Tabela 2 - Fatores de redução do aço em relação a temperatura

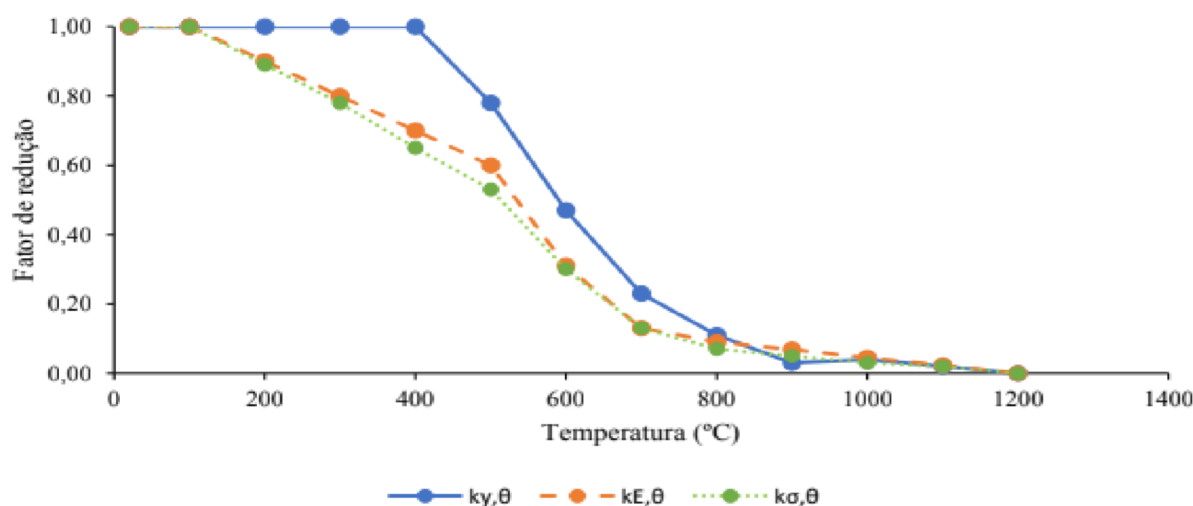
Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento para barras sujeitas à flambagem local ^a $k_{\alpha,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,890	0,900
300	1,000	0,780	0,800
400	1,000	0,650	0,700
500	0,780	0,530	0,600
600	0,470	0,300	0,310
700	0,230	0,130	0,130
800	0,110	0,070	0,090
900	0,030	0,050	0,068
1000	0,040	0,030	0,045
1100	0,020	0,020	0,023
1200	0,000	0,000	0,000

^a Para valores intermediários da temperatura de aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: NBR ABNT 14323/2013.

Na Figura 4 tem-se a representação gráfica dessas reduções de temperatura, indicando a perda de capacidade portante, e, portanto, evidenciando o cuidado para o dimensionamento adequado da estrutura sob situação de incêndio.

Figura 4 - Representação dos fatores de redução em relação a temperatura



Fonte: Paiva (2018)

Um dos fatores importantes para o dimensionamento é o fator de massividade que também é conhecido como fator de forma da seção, diz respeito ao perímetro exposto ao incêndio de um elemento metálico estrutural em função da área da seção transversal desse mesmo elemento. O fator de massividade representa um papel

importante na evolução da temperatura do aço. Quanto maior for a razão entre a área da superfície exposta ao fogo e o volume do elemento de aço, mais rápida será a evolução de temperatura.

Em consequência, o fator de massividade se mostra indispensável para o dimensionamento de estruturas metálicas com ou sem revestimento de proteção térmica. Por isso, a norma NBR 14323:2013 disponibiliza tabelas para a determinação dos fatores de massividade para diversas seções e elementos estruturais.

3.2 Tintas Intumescentes

As tintas intumescentes são compostos químicos que, quando sujeitos a um aquecimento acima de uma temperatura crítica, passam por diversas reações que originam uma espuma carbonizada, que se expande, com alto desempenho isolante. Sendo assim, as tintas intumescentes são utilizadas em estruturas metálicas como proteção passiva contra o fogo, mas também podem ser utilizadas sobre diversos materiais, como madeira, vidro e polímeros. Segundo STRASSBURGER (2021), as tintas são compostas por três materiais reativos entre si: uma fonte ácida, uma fonte de carbono e um agente expensor, além de uma resina ligante. Estes agentes reagem quimicamente com o aumento de temperatura decorrente de um incêndio, originando uma expansão em volume, tipicamente de 40 a 50 vezes, formando uma camada carbonosa de baixa condutividade térmica. A camada carbonosa possui uma função protetora, que atua de forma a aumentar a barreira de difusão ao oxigênio e a barreira térmica entre o fogo e o substrato. Com isso, o aumento da temperatura da superfície do material é atrasado, evitando assim o colapso das estruturas metálicas.

O uso destes revestimentos é determinante para limitar o aumento de temperatura no substrato de aço, pois sabe-se que o aço quando submetido a uma temperatura de 500 °C a 550 °C entra em colapso.

O desempenho de um revestimento intumescente está diretamente relacionado aos compostos utilizados, bem como à combinação entre eles. Alguns destes revestimentos estão apresentados na tabela 3.

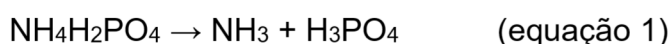
Tabela 3 - Alguns dos componentes mais utilizados em tintas intumescentes

Fonte de Carbono	Fonte ácida	Agente de expansão
Dextrina	Ácido bórico	Uréia
Pentaeritritol	Ácido fosfórico	Resinas uréia-formaldeído
Resina fenol-formaldeído	Fosfato de melamina	Melamina
Sorbitol	Polifosfatos	Grafite expansível
Melamina metilol	Boratos	
Policarbonatos	Sais de amônio	

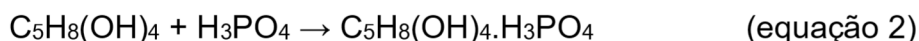
Fonte: CARDOSO, A. P. (2019). Adaptado de (ALONGI; HAN; BOURBIGOT, 2014).

Outras adições podem ser usadas em compostos intumescentes para melhorar seu desempenho mecânico e térmico, como, por exemplo, elevar a resistência ao impacto físico de correntes de ar durante o incêndio (OLIVEIRA *et al.*, [2015], p. 6).

As equações a seguir apresentam as reações químicas, segundo Troitzsch (1983 apud OLIVEIRA *et al.*, [2015], p. 7), “Para o mecanismo de intumescência do fosfato dihidrogenado de amônio, Pentaeritritol e parafinas cloradas. O primeiro passo ocorre a temperaturas entre 150 e 215°C – a decomposição do sal inorgânico produzindo gás amônia e ácido fosfórico.”.



Oliveira *et al.* ([2015], p. 7) comenta que “À temperatura um pouco superior, o ácido formado reage com o composto carbonáceo, esterificando o composto polihídrico. Esta reação pode ser catalisada por aminas e amidas.”.



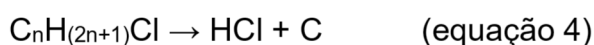
Para Oliveira (2015, p. 7):

Com temperaturas entre aquelas apresentadas no primeiro passo e durante a esterificação o aglomerante derrete parcialmente.

Entre 280 e 350°C ocorre a decomposição do éster fosfórico – a mistura se funde e as ligações são quebradas, formando-se ácido, água e resíduo de carbono.



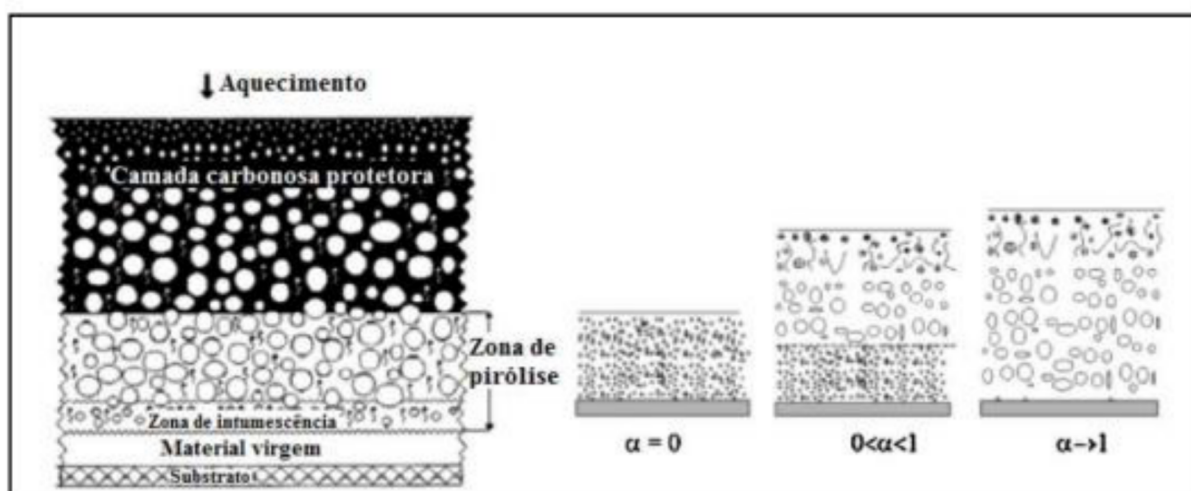
Oliveira ([2015], p. 7) afirma que “Ao mesmo tempo, o composto responsável por fornecer os gases que irão inflar a mistura se decompõe, liberando gases (como o cloreto de hidrogênio ou ácido clorídrico) que inflam a massa fundida.”.



Segundo Oliveira ([2015], p. 8), a resina aglomerante forma uma camada sobre a mistura impedindo que os gases se dissipem. A viscosidade da espuma aumenta junto com o acréscimo de temperatura. Nessa condição a espuma se solidifica devido à reticulação e carbonização gerando um material poroso e, quando as temperaturas passam dos 600°C, a massa carbonizada começa a se decompor.

Na Figura 5 está apresentado o esquema das zonas formadas durante o fenômeno de intumescência, ilustrando como vai ocorrendo a expansão com o passar do tempo e aumento do grau de conversão (α).

Figura 5 - Esquema das zonas formadas durante o fenômeno de intumescência



Fonte: CARDOSO, A. P. (2019). Adaptado de (ALONGI; HAN; BOURBIGOT, 2014).

Estes autores concluem afirmando que “Quando comparada à espessura original, a camada intumescida é cerca de 50 a 100 vezes maior, formando uma barreira térmica que protegerá o substrato da influência do calor e de se decompor.”.

Figura 6 - Intumescimento de tinta na estrutura



Fonte: MOTA (2019), adaptado de PANONI (2007)

Como mostra a figura 6, a estrutura quando submetida a um fluxo térmico dar-se a expansão da tinta formando uma camada carbonosa para absorver parte da carga térmica.

3.2.1 Modelo de Experimentação da Tinta Intumescente

Segundo Basso (2016), devido à inexistência de normas específicas para ensaios de tintas intumescentes em estruturas metálicas, foi proposto em seu trabalho um tipo

de simulação que pudesse representar uma condição semelhante à de um incêndio real em um elemento submetido a um carregamento axial, com metodologia descrita na NBR 5628:2001. O ensaio foi realizado nas dependências do Laboratório LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A preparação dos perfis para ensaio consistiu em soldar chapas metálicas em ambas as extremidades para melhor disposição do corpo de prova e distribuição da carga axial na seção do perfil. Os perfis foram colocados em uma prensa hidráulica e submetidos a uma carga axial de compressão de 20% da carga máxima de ruptura, a carga crítica do perfil, essa aplicada de forma que não exista nenhuma excentricidade, para que não gere nenhum momento indesejado.

3.2.2 Aplicação da Carga Crítica

Para o cálculo da carga crítica no perfil cantoneira de abas iguais em situação de compressão, foram utilizadas as equações preconizadas na ABNT NBR 8800:2008.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{x1}}{(K_{x1} \cdot L_{x1})^2} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

N_{ex} é a força axial de flambagem elástica;

E é o módulo de elasticidade do aço;

I_{x1} é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico;

K_{x1} é o coeficiente de flambagem por flexão;

L_{x1} é o comprimento da cantoneira.

Para o cálculo de $K_{x1} \cdot L_{x1}$, comprimento da flambagem equivalente, a NBR 8800:2008 aplica-se a equação 2 ou a equação 3 :

$$\text{Quando } 0 \leq \frac{L_{x1}}{r_{x1}} \leq 80 : K_{x1} \cdot L_{x1} = 72 \cdot r_{x1} + 0,75 \cdot L_{x1} \quad (\text{equação 2})$$

$$\text{Quando } \frac{L_{x1}}{r_{x1}} > 80 : K_{x1} \cdot L_{x1} = 32 \cdot r_{x1} + 1,25 \cdot L_{x1} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

r_{x1} é o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico.

Para o cálculo da carga crítica no perfil “U” a NBR 8800:2008 informa as equações que representam a flambagem elástica por flexão nos eixos x (pela equação 7) e y (pela equação 4) e flambagem elástica por flexo torção (pela equação 5), respectivamente.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

N_{ey} é a força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal;

E é o módulo de elasticidade do aço;

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico;

K_y é o coeficiente de flambagem por flexão;

L_y é o comprimento da cantoneira.

A flambagem elástica por flexo torção é dada pela equação:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{y_o}{r_o} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{ex} N_{ez} \left[1 - \left(\frac{y_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

N_{exz} é a força axial de flambagem elástica por flexo – torção;

N_{ex} é a força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal;

N_{ez} é a força de flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z;

y_o é a coordenada do eixo de cisalhamento na direção do eixo central y;

r_o é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado pela equação 6:

$$r_o = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2)} \quad (\text{equação 6})$$

Onde r_x e r_y são os raios de giração em relação aos eixos centrais x e y, respectivamente, e x_o e y_o são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

Sendo que para o cálculo das forças axial de flambagem por flexão em relação ao eixo de inércia x e força de flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z, a NBR 8800:2008 fornece as equações 7 e 8, respectivamente.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

N_{ex} é a força axial de flambagem elástica;

E é o módulo de elasticidade do aço;

I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico;

K_x é o coeficiente de flambagem por flexão;

L_x é o comprimento da cantoneira.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

r_o é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento;

E é o módulo de elasticidade do aço;

K_z é o coeficiente de flambagem por torção;

L_z é o comprimento do perfil;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

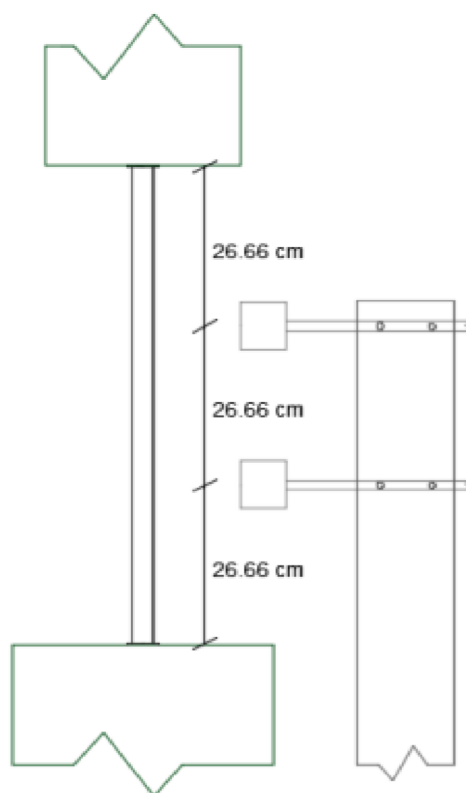
J é a constante de torção da seção transversal;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal.

3.2.3 Aplicação da Carga De Incêndio

Segundo o autor, após o carregamento inicial descrito no item anterior, é aplicada a carga de incêndio com o uso de maçaricos previamente posicionados em pontos equidistantes entre si, no terço médio do perfil, conforme pode ser observado no desenho esquemático da figura 7. Ela nos mostra também que a carga de incêndio será aplicada em apenas uma das faces do perfil. Salienta-se que os maçaricos devem ser fixados de forma a não serem movidos durante o teste. A distância dos maçaricos ao perfil foi adotada de tal forma que a labareda atinja todos os corpos de prova visando sempre uma melhor distribuição da temperatura ao longo da altura do perfil.

Figura 7 - Desenho esquemático da posição dos maçaricos ao longo da altura dos perfis



Fonte: Basso (2016).

A carga de incêndio e a carga axial são aplicadas simultaneamente. Foram utilizados data loggers para aquisição contínua do incremento de carga devido à aplicação de da carga de incêndio. O incremento de carga é devido à dilatação do material em situação de restrição, como a encontrada nos perfis durante o ensaio.

Além do incremento de carga, foram também coletados os perfis de temperatura da face não exposta dos perfis, por meio de data loggers conectados a termopares, como mostra a figura 8. Os termopares utilizados são do tipo K e foram posicionados na face imediatamente oposta aos pontos de aplicação dos maçaricos. Foi também utilizada uma câmera termográfica para a coleta de dados da temperatura na superfície dos corpos de prova.

Figura 8 - Disposição dos Termopares



Fonte: Basso (2016).

Em síntese, foi seguida a sequência abaixo para realização de ensaios segundo proposto por Basso (2016):

- a) posicionamento do corpo de prova na prensa hidráulica, deixando as duas extremidades em contato com as faces da prensa;
- b) aplicação da carga mecânica de compressão axial até o limite estabelecido e esperar alguns segundos a fim de não haver algum tipo de oscilação na carga;
- c) posicionamento dos medidores termopares já conectados ao programa Field logger;
- d) posicionamento dos maçaricos e verificação se estes estão posicionados firmemente;
- e) ignição e início da cronometragem do tempo previsto para o ensaio;
- f) acompanhar o teste interrompendo a carga de incêndio quando atingido o tempo limite do teste (máximo de 30 minutos) ou até o perfil sofrer algum tipo de ruptura;
- g) anotar os resultados de carga mecânica e temperatura na superfície do metal em função do tempo, obtidos no teste;
- h) repetir os procedimentos de a) até g) com todos os corpos de prova;
- i) analisar os resultados obtidos com todos os corpos de prova.

3.3 Trabalhos Revisados

3.3.1 Basso (2016)

Em 2016 foi defendida a dissertação de Graduação na UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) intitulada “Proteção passiva em estruturas metálicas: Desempenho de pinturas intumescentes”. O autor, Guilherme Basso, visou avaliar a eficiência de pinturas intumescentes que são encontradas no mercado e também utilizadas para fins acadêmicos, em elementos de estruturas metálicas com a finalidade de verificar a eficiência das mesmas em uma condição específica de ensaio, que simula a ação conjunta de carga axial de compressão e carga de incêndio.

Com os objetivos de avaliar experimentalmente o desempenho que as tintas intumescentes fornecem aos perfis metálicos, foram utilizados dois corpos de prova tipo cantoneira e perfil “U”. O outro objetivo é a comparação das situações com e sem proteção de tintas intumescentes, apresentando os tempos que os corpos de prova resistiram até ocorrer uma ruptura, assim como a carga de compressão e a temperatura que estes perfis apresentavam neste momento. Além disso, foram ensaiadas duas tintas intumescentes, uma fabricada na Alemanha, Renitherm® PMA 600, sendo referência no mercado nacional que é a base d’água, e outra desenvolvida pelo no Laboratório de Polímeros (LaPol) da Universidade Federal do Rio grande do Sul que é a base de solvente, como mostrado na figura 9.

Figura 9 - **Aparência dos corpos de prova após o preparo inicial e pintura intumescente.**



Fonte: Basso (2016).

Sendo ensaiados no total 12 corpos de prova com ou sem proteção passiva e para cada tinta. O ensaio foi realizado nas dependências do Laboratório LEME da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. No experimento realizado foi possível verificar através dos resultados que os corpos de prova com tintas intumescentes duraram mais tempo nos testes que os sem revestimento, o que indica que este material confere de fato uma proteção passiva para estruturas metálicas, devendo-se dar a devida atenção para as espessuras das camadas.

3.3.2 Trabalho de Giroto *et al* (2019)

O artigo foi apresentado no Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC, em 2019, que tem como título Resistência ao fogo em estruturas metálicas - Proteção passiva tinta intumescente. Os autores utilizaram a metodologia desenvolvida por Basso (2016), com objetivo de experimentar a tinta intumescente como retardante contra fogo em estruturas metálicas.

A tinta intumescente selecionada é feita a base d'água e foi aplicada conforme especificações do fabricante: recomenda a aplicação de fundo primer e uma camada de 01 mm da tinta para TRRF de 30 minutos.

O corpo de prova utilizado foi perfil metálico cantoneira de abas iguais, o ensaio foi realizado duas vezes, considerando um corpo de prova protegido com tinta intumescente, aplicada conforme as recomendações do fabricante, e o outro sem proteção, submetidos às mesmas condições de carga e fluxo térmico, medindo-se a temperatura da face não exposta com um Termômetro Digital Infravermelho, analisando a relação temperatura x tempo, e realizando o comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios.

O primeiro corpo de prova foi testado sem aplicação da tinta intumescente e durou aproximadamente 700 segundos, atingindo uma temperatura na face não exposta de 536°C. O segundo corpo de prova foi testado com aplicação da tinta intumescente e durou aproximadamente 1380 segundos, atingindo uma temperatura na face não exposta de 257,3°C, no instante em que, após a carga axial crescer e atingir um valor semelhante ao ocorrido no perfil sem aplicação da tinta, o manômetro da prensa acusou perda de carga. Nota-se que o perfil com a tinta intumescente resistiu mais tempo ao fluxo térmico aplicado.

4. METODOLOGIA

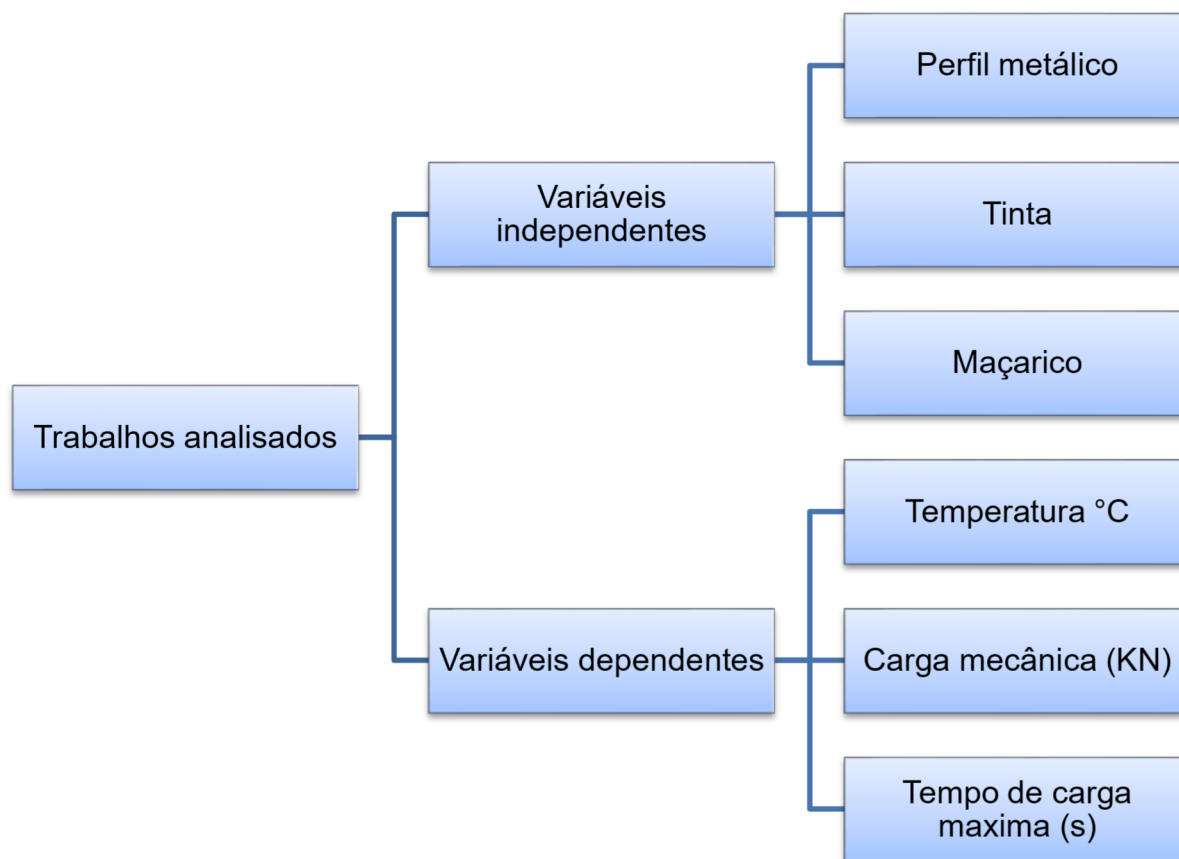
Na presente pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica para se obter o acervo que tratasse da aplicação de tintas intumescentes em estruturas metálicas mostrando a sua eficácia. Esse trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica utilizando dois trabalhos em que foram realizadas as análises comparativas dos resultados encontrados em ensaios utilizando tintas intumescentes em corpos de prova. Portanto, apesar do presente trabalho ser teórico as análises serão feitas confeccionando-se gráficos e tabelas realizados pelo próprio autor.

Os trabalhos citados e analisados posteriormente no item 5 (análises e resultados dos trabalhos) são: **Proteção passiva em estruturas metálicas: desempenho de pinturas intumescentes** Basso (2016) de que elaborou um método de experimentação das tintas intumescentes, já que as normas brasileiras não tratam esse assunto. O segundo, com o título **Resistência ao fogo em estruturas metálicas - proteção passiva tinta intumescente** de Girotto *et al* (2019), como já explicado anteriormente no capítulo de revisão bibliográfica, o artigo que usou a metodologia aplicada por Basso (2016), para experimentar o perfil cantoneira de abas iguais com e sem tinta intumescente. É importante salientar a ausência de outros trabalhos para a comparação decorre das poucas pesquisas existentes sobre o assunto e em sua maioria são direcionadas para engenharia de materiais, onde destinam a melhorar as tintas utilizando compostos orgânicos.

Diante disso, com os dados obtidos foi possível analisar os trabalhos desenvolvidos, as variáveis e os métodos que foram aplicados para atingir a intumescência da tinta. Contudo, vale ressaltar que mesmo que não haja normas brasileiras que padronizam a experimentação das tintas intumescentes, os métodos aplicados foram baseados nas ABNT NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações (2001), NBR 5628 - Componentes construtivos - determinação da resistência ao fogo (2001) e NBR 14323 Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio (2013).

Na figura 10, pode-se perceber as variáveis consideradas nos trabalhos onde as dependentes são temperatura, carga mecânica e o tempo de carga máxima, essas, como, nome já nos dizem que dependem de alguma variável independente, por exemplo a temperatura depende da quantidade de maçaricos que serão utilizados, pois o mesmo é responsável pelo fluxo térmico e da tinta a ser aplicada no perfil, visto que ela tem a incumbência de absorver parte da carga térmica.

Figura 10 - Fluxograma de variáveis abordada no processo experimental dos trabalhos analisados



Fonte: Autor (2022)

A carga mecânica depende do tipo de perfil metálico a ser utilizado, devido a carga de ruptura. E, por conseguinte, o tempo de carga máxima é uma variável que depende de todas as variáveis independentes, pois ele é medido até o perfil perder carga, onde o ensaio é finalizado.

As diferenças dos ensaios estão elencadas na tabela 4, as tintas estão descritas no item 3.3 (Trabalhos Revisados). O segundo trabalho não informou qual tinta foi utilizada, mas informou que era a base d'água, além de ter utilizado termômetro digital para aferir a temperatura e ter utilizado apenas um perfil.

Tabela 4 – De diferenças dos ensaios

	Tintas	Diluição da tinta	Maçarico	Temperatura	Prensa	Perfil Metálico
Guilherme Basso (2016)	Renitherm® PMA 600	A base d'água	2	Termopares	Sim	Cantoneira de abas iguais
	Desenvolvida no LaPol	A base de solvente		Câmera Termográfica		Perfil U
L. S. GIROTTO et al (2019)	*	A base d'água	1	Termômetro Digital	Sim	Cantoneira de abas iguais

Fonte: Autor (2022)

*Tinta não especificada.

Observa-se que Basso (2016) utilizou uma tinta à base solvente e outra à base d'água, instrumentos para medir a temperatura diferentes e dois perfis metálicos, o que enriqueceu o trabalho.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS TRABALHOS

Na tabela 5 estão expostos os resultados encontrados por Basso (2016).

Tabela 5 – Dados da experimentação de Basso (2016)

	Perfis sem tinta				Tinta PMA 600				Tinta do LaPol			
	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U1	Perfil U2	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U1	Perfil U2	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U1	Perfil U2
Tempo até atingir a carga máxima (s)	141	110	192	235	674	488	167	246	900	442	221	595
Temperatura termopar superior (°C)	173	162	178	184	-	180	-	118	-	165	138	176
Temperatura termopar inferior (°C)	156	130	159	145	-	123	-	70	-	111	87	130
Temperatura câmera termográfica (°C)	670	670	670	670	553,6	412,9	460	340	511	491	505	562
Carga máxima (KN)	66,4	72,8	176,8	169,4	74,2	74,86	186,05	186,2	102,2	76,01	203	175,92

Fonte: Adaptado de Basso (2016).

Na tabela 6 estão apresentados os resultados encontrados por Giroto *et al* (2019).

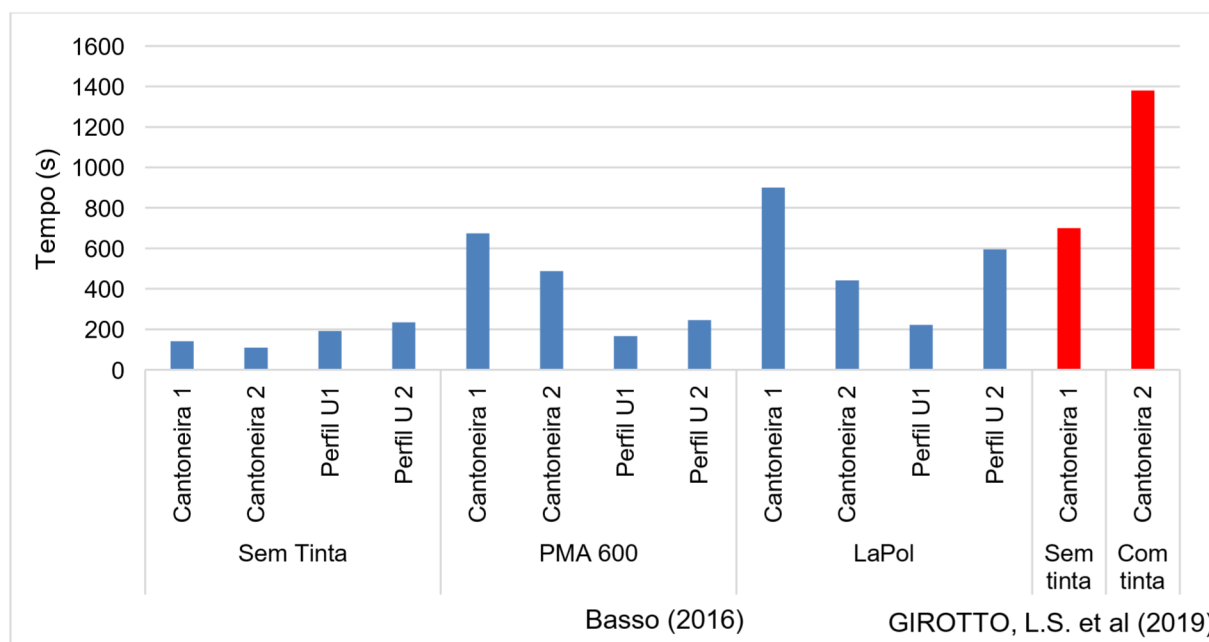
Tabela 6 – Dados do trabalho de GIROTTO (2019)

	Sem tinta	Com tinta
	Cantoneira 1	Cantoneira 2
Tempo até atingir a carga máxima (s)	700	1380
Temperatura segundo termômetro digital (°C)	536	257,3
Carga máxima (KN)	40,38	40,38

Fonte: Adaptado de L. S. GIROTTO, A. B. D. SANTOS e J. A. SANTOS (2019).

Pode ser visto nas tabelas acima que Basso (2016) utilizou 12 corpos de prova e devido a isso, houve uma grande variabilidade nos resultados. Na temperatura obtida através dos termopares algumas ficaram sem resultados, pois os mesmos desgrudaram da face não exposta ao fluxo térmico do perfil, já o segundo utilizou dois corpos de prova e um tipo de perfil. A análise mais detalhada está nas figuras de 11 a 16, onde se fará a comparação.

Figura 11 – Tempo até atingir carga máxima

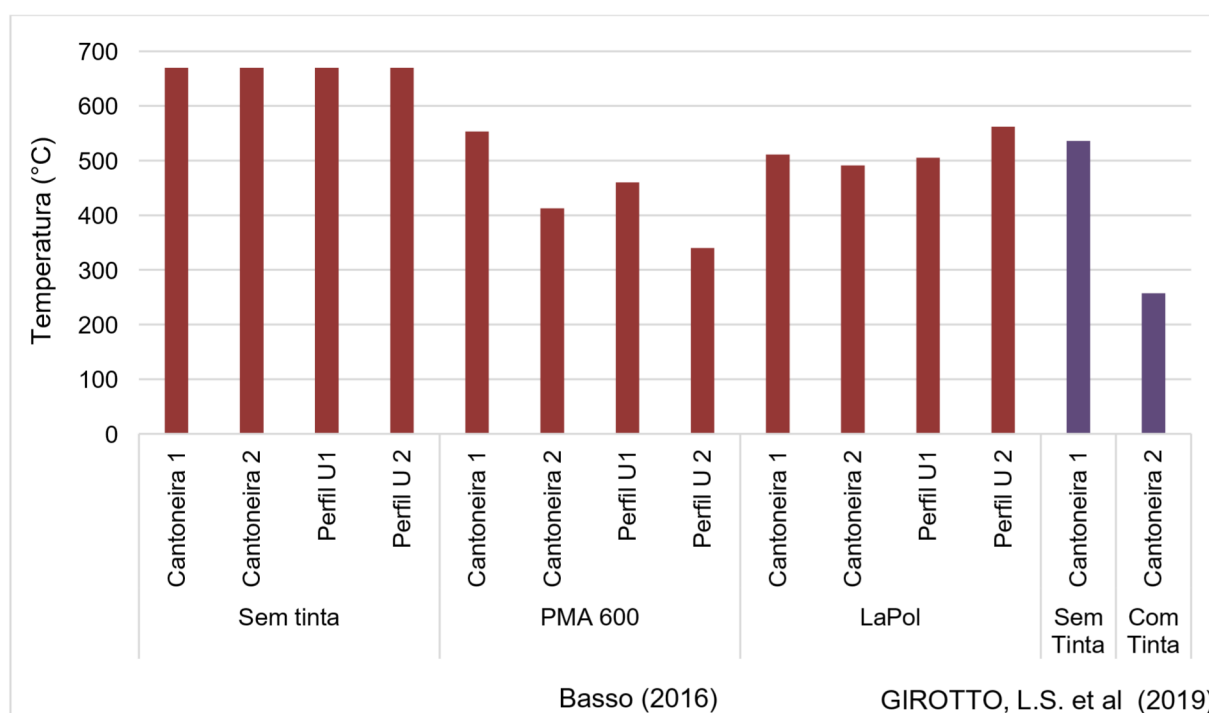


Fonte: Autor (2022)

A figura 11 mostra o tempo que o perfil suportou até começar a perda de carga ou flambar, possivelmente um dos motivos para que o ensaio não tenha se prolongado por mais tempo é a aplicação da fonte de calor não padronizada, que em um incêndio real ou mesmo um incêndio que respeite a curva-padrão, a temperatura cresce gradualmente. No caso trabalhos analisados, foram utilizados maçaricos, equipamentos que já expõe os corpos a alta temperatura desde o primeiro momento.

Basso (2016) usou dois maçaricos dividindo a altura do perfil em 1/3, já Giroto, L.S. et al (2019) um maçarico na metade do perfil. É notório na Figura 11, que a maioria dos corpos de prova com a tinta intumescente suportaram as cargas de incêndio e mecânica por mais tempo, com exceção do perfil U1 com tinta PMA 600, que devido ao seu posicionamento imperfeito, obteve acréscimos de tensões e teve um decréscimo de 13% com relação ao tempo dos perfis sem tinta. A cantoneira 1 com tinta LaPol obteve um resultado destoante, que possivelmente foi devido a liga metálica desse perfil que era um pouco diferente dos demais, mas levando em consideração que as medidas eram iguais, a mesma teve um aumento de 538,30% em relação às cantoneiras que não sofreram intumescência. As cantoneiras 1 e 2, com tinta PMA 600, e a cantoneira 2, com a LaPol, obtiveram um aumento de mais de 300% no seu tempo. Já o perfil U2 com tinta LaPol obteve um aumento de aproximadamente 153% em relação ao perfil sem tinta e 141% em relação ao perfil com tinta PMA 600. No segundo trabalho que a cantoneira 2 obteve 97,14% de aumento no seu tempo com relação a cantoneira 1 sem tinta

Figura 12 – Temperatura da Câmera Termográfica e Termômetro Digital



Fonte: Autor (2022).

Como pode ser visto na figura 12, os perfis sem tinta do primeiro trabalho alcançaram uma temperatura de 670°C, já o do segundo trabalho o perfil cantoneira atingiu 536°C. Entretanto, os outros perfis que sofreram a intumescência ficaram com as menores temperaturas, devido a tinta ter a propriedade de absolver parte do fluxo térmico. Os perfis cantoneira 1 e 2, com a tinta PMA 600 e com tinta LaPol, obtiveram um decréscimo na temperatura, respectivamente de 17,37%; 38,88%; 23,73% e 26,72%.

Já os perfis U 1 e 2, com a tinta PMA 600 e com tinta LaPol, obtiveram um decréscimo respectivamente de 31,34%, 49,25%, 24,63%, 16,12% com relação aos perfis sem tinta. No segundo trabalho a tinta não foi especificada, mas a cantoneira 2 teve um decréscimo de aproximadamente 52% em relação a cantoneira 1.

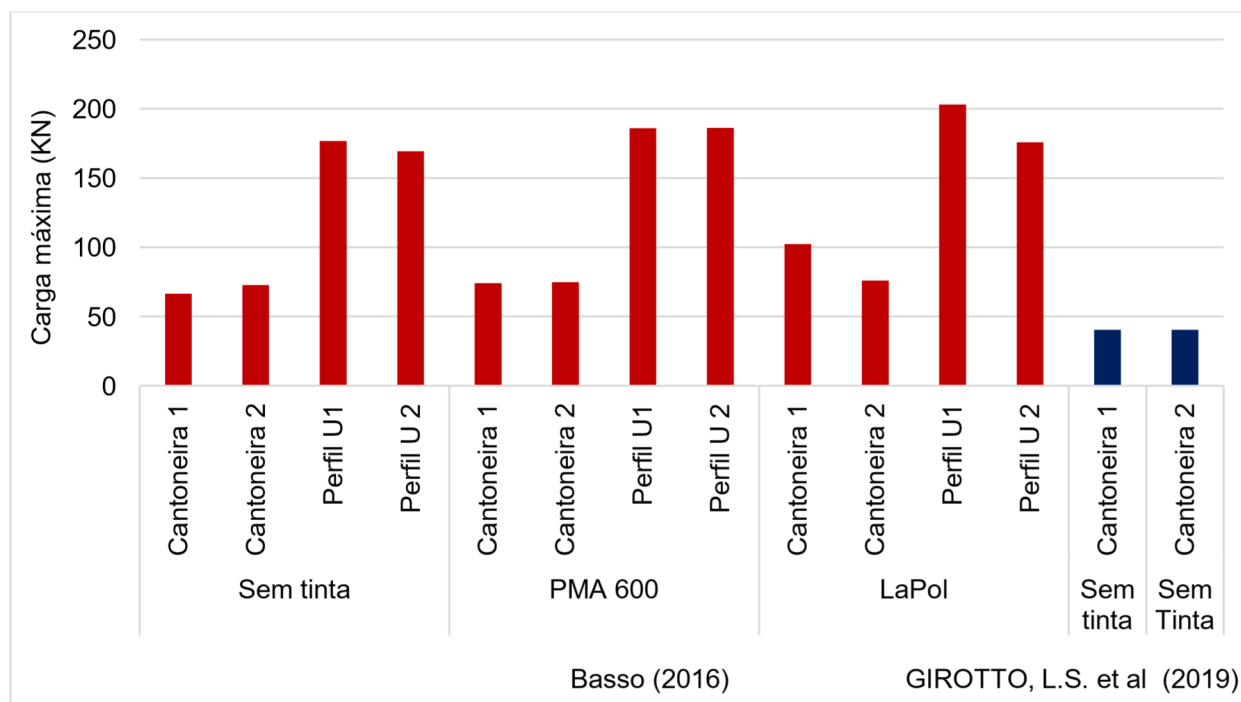
Tabela 7 – Espessuras das tintas utilizadas em micron

	PMA 600	LaPol	Tinta não especificada
Cantoneira	205	1500 a 2000	1000
Perfil U	335	3000 a 4000	-

Fonte: Autor (2022)

Um dos motivos importantes para a eficiência da intumescência é a espessura correta da camada de tinta que deve ser dimensionada conforme o seu TRRF e tipo de estrutura. Percebe-se que a tinta desenvolvida no LaPol tem espessuras maiores de cobertura de tinta, como mostra a tabela 7 e na figura 9 do item 3.3.1, porém em comparação aos perfis que utilizaram outras tintas, o decréscimo de temperatura obteve índices menores chegando ao máximo de aproximadamente 27% de absorção, sendo ultrapassada pelas outras tintas que alcançaram índices maiores.

Figura 13 – Carga máxima suportada até a flambagem do perfil



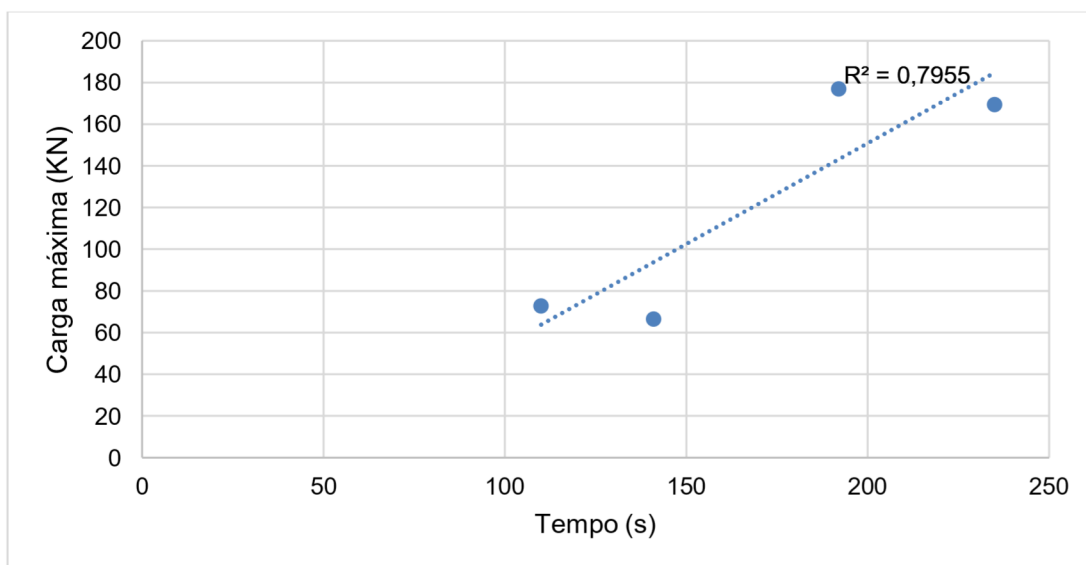
Fonte: Autor (2022).

Em relação a carga máxima suportada, pode-se notar que os perfis seguiram um padrão, pois a carga crítica ou carga de ruptura é dimensionada segundo as

propriedades de cada perfil, onde as cantoneiras tem carga inicial menor do que os perfis U.

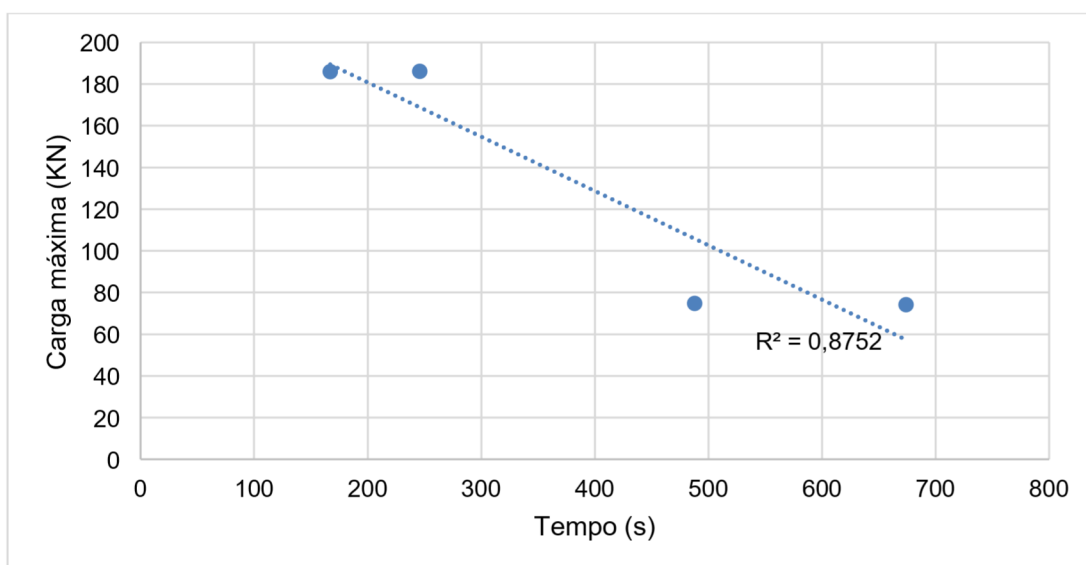
O que pode ser observado nas figuras 14,15 e 16 é o tempo que cada perfil levou para atingir a carga máxima, tendo como referência a figura 13 que são os perfis sem tinta.

Figura 14 – Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis sem tinta do trabalho de Basso (2016)



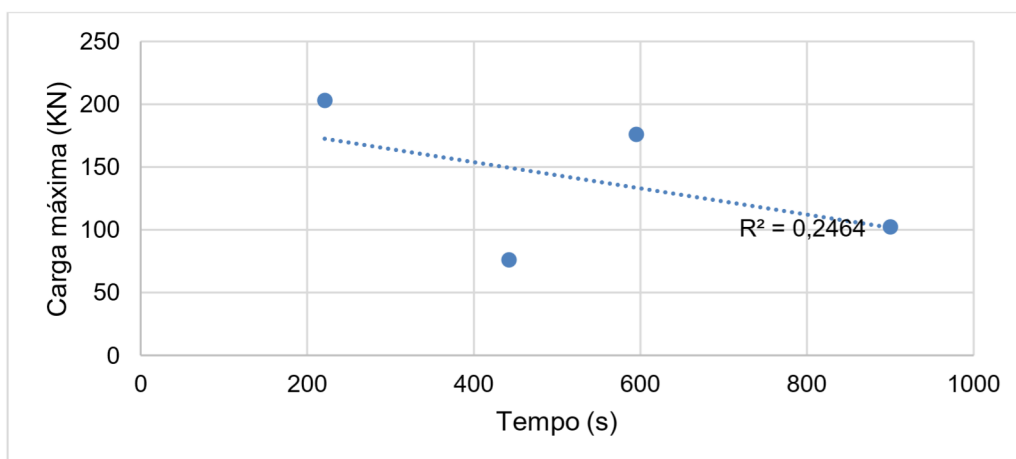
Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis com tinta PMA 600 do trabalho de Basso (2016)



Fonte: Autor (2022)

Figura 16 – **Carga máxima x tempo até a flambagem dos perfis com tinta LaPol do trabalho de Basso (2016)**



Fonte: Autor (2022)

Nota-se que não houve correlação significativa entre as duas propriedades, nem entre várias tantas testadas e não apresentadas neste trabalho, mas é importante salientar que houve incremento de carga máxima e tempo até a flambagem dos perfis, ao se utilizar tinta intumescente em relação aos corpos de prova de referência (sem tinta). Nota-se ainda que haveria uma tendência cartesiana de aumento do tempo de flambagem com redução da carga máxima, excetuando-se um ponto de inflexão (segundo ponto), considerando a figura 16.

Vale ressaltar que devido a pandemia do coronavírus ficou inviável a realização do experimento no laboratório do Instituto Federal de Sergipe e também pela periculosidade do experimento já que o mesmo necessita de uma fonte de calor como maçarico ou outra que propague chamas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o comparativo realizado entre os trabalhos nota-se a diferença comportamental entre os corpos de prova com tinta intumescente e sem proteção, sendo como esperado os perfis que sofreram a intumescência alcançaram resultados melhores como tempo e temperatura. Analisando os resultados, em relação ao experimento, percebe-se também que é importante que os corpos de prova estejam alinhados na prensa para que não ocorram excentricidades que venham ter acréscimos de tensões, prejudicando assim o resultado. Deve se levar em conta, que no experimento a carga de incêndio já iniciou elevada e se mantinha constante durante o ensaio, não seguindo a curva temperatura-tempo isso é um dos fatores que influenciaram nos resultados, mas não impossibilitou que fosse feita as análises.

No que concerne as tintas intumescentes, a proteção com a mesma se mostrou bastante eficaz. Deve ser observado o dimensionamento correto da tinta para o tipo de edificação e TRRF adequados, segundo as normas e de forma ponderada pelo projetista. Desse modo, este trabalho evidencia a importância da proteção passiva em estruturas metálicas como retardante da ação do fogo sobre suas propriedades.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432 – **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações** – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628 – **Componentes construtivos - determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2001.

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

AZEVEDO, M.S. **Estruturas de Aço Externas a Edifícios em Situação de Incêndio**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, SP, 302p, 2010.

BASSO, Guilherme. **Proteção passiva em estruturas metálicas: Desempenho de pinturas intumescentes**. Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

BUCHANAN, Andrew H. **Structural design for fire safety**. University of Canterbury.

CAMPÊLO, L. S. **Estudo numérico e analítico para determinação em situação de incêndio natural da carga crítica de vigas de aço com carga concentrada**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002a/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, p. 165, 2008.

CARDOSO, A. P. **Desenvolvimento de tintas intumescentes à base de diferentes tipos de resinas e avaliação da influência da concentração de resina no desempenho de proteção contra o fogo**. Porto Alegre, 2019.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas - Ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

GIROTTI, L. S; SANTOS, A.B. ; ALMEIDA, J. S. **Resistência ao fogo em estruturas metálicas - Proteção passiva tinta intumescente**. Apresentado no Congresso

Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC Palmas/TO – Brasil, 2019.

KIMURA, É. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação e Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, p. 225, 2009.

MOTA, Bruno da Silva. **Proteção passiva contra fogo em estruturas metálicas em prédio comercial**. Brasília, 2019.

NEVES. I. C. **Segurança Contra Incêndio em Edifícios - Fundamentos**. Apostila, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, 1994. 557p. New Zeland. 2002.

O'CONNOR, D. J. **Strutctural Engineering Design for Fire Safety in Buildings**. The Structural Engineer, v.73, n.4, p. 53-58,1995 apud: STARLING (2000).

PANNONI, Fábio Domingos. **Aços estruturais**. Artigo técnico. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/17146411-Acos-estruturais-fabio-domingos-pannoni-m-sc-ph-d-1.html>>. Acesso em: 12 jan. 2022.

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 2a ed. São Paulo, 2004.

PEIXOTO, Wesley. **A busca da qualidade em proteção passiva contra fogo de estruturas**. São Paulo, 2017, Artigo Técnico no site da ABNT.

PILZ, C. F. **Influência das propriedades da resina nas propriedades de uma tinta base água**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

SILVA, V. P. ; VARGAS, M. R. ; ONO, R. **Prevenção Contra Incêndio no Projeto de** SILVA, V. P. **Segurança das Estruturas em Situação de Incêndio**. Infra, São Paulo, v. ano5, n. 42, p. 22, 2003.

STEEL TIMES. **Steel Design to Counter Fire**. p. 383-384,1993: apud: STARLING (2000).

STRASSBURGER, D. **Tintas intumescentes base água para proteção de estruturas em aço contra o fogo**. Porto Alegre, 2021.

TROITZSCH, J. H. **Methods for the Fire Protection of Plas- tics and Coatings by Flame Retardant and Intumescent Sys** - tems.Marl, 1983.

VARGAS, M.R.; SILVA, V.P. **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS / Centro Brasileiro da Construção em aço – CBCA, 2003.