

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Marcus César Quintão Araújo

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
A INCÊNDIOS NATURAIS DE VIGAS DE AÇO
PROTEGIDAS COM TINTAS INTUMESCENTES**

Belo Horizonte

2024

Marcus César Quintão Araújo

**Análise Experimental Do Comportamento A Incêndios Naturais De Vigas
De Aço Protegidas Com Tintas Intumescentes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Correia Rodrigues

Belo Horizonte

2024

A663a

Araújo, Marcus César Quintão.

Análise experimental do comportamento a incêndios naturais de vigas de aço protegidas com tintas intumescentes [recurso eletrônico] / Marcus César Quintão Araújo. - 2024.

1 recurso online (144 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: João Paulo Correia Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 141-144.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Incêndios - Teses. 3. Aço - Teses. 4. Estudos experimentais - Teses. 5. Vigas - Teses. I. Rodrigues, João Paulo Correia. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 405 DO ALUNO MARCUS CÉSAR QUINTÃO ARAÚJO

Às **09:30** horas do dia **23** do mês de **maio** de **2024**, reuniu-se, em ambiente virtual, a Comissão Examinadora, a saber, indicada pelo Colegiado do Programa em **10 de maio de 2024**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Análise Experimental do Comportamento a Incêndios Naturais de Vigas de Aço Protegidas com Tintas Intumescentes**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. João Paulo Correia Rodrigues**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

Prof. Dr. João Paulo Correia Rodrigues - DEES-UFMG (Orientador)

Profa. Dra. Paula Bamberg - DEMC-UFMG

Prof. Dr. João Victor Fragoso Dias - DEC-UFES

Profa. Dra. Dalilah Pires Maximiano - DEEC-UFSJ

Pelas indicações acima, ao candidato foi considerada APROVADO, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 23 de maio de 2024.

Observações:

1. A aprovação do candidato na defesa da Dissertação de Mestrado não significa que o mesmo tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas;
2. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Correia Rodrigues, Professor do Magistério Superior - Visitante**, em 24/05/2024, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paula Bamberg, Professora do Magistério Superior**, em 25/05/2024, às 19:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Victor Fragoso Dias, Usuário Externo**, em 26/05/2024, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dalliah Pires Maximiano, Usuária Externa**, em 27/05/2024, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Lopes da Silva, Coordenador(a)**, em 19/07/2024, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3244259 e o código CRC 65276C75.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha querida irmã, pelo amor, carinho e compreensão ao longo da realização deste sonho.

À Ester, minha amada companheira, que se dedicou e fez com que essa caminhada e a vida se tornassem mais leves.

Aos amigos e familiares que muitas vezes dispuseram do seu tempo para me ajudar com os trâmites e preparações para realização dos ensaios dessa pesquisa.

Ao meu orientador, João Paulo Correia Rodrigues, pelo apoio técnico, orientação e amizade.

Aos meus amigos de mestrado, Cristiano, Beatriz e Fábio, que me apoiaram em diversos momentos nos estudos e no desenvolvimento dos ensaios dessa pesquisa.

Aos alunos de graduação Vitor e Micaella, que se propuseram a ajudar e aprender com o desenvolvimento dos ensaios experimentais.

Aos técnicos do Laboratório de Análise e Ensaio de Estruturas (LAEES) do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES), em especial o companheiro José Liberato, que foi peça fundamental no auxílio e execução dos ensaios experimentais.

Ao Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, que colaboraram e facilitaram todos os processos para a realização da pesquisa nas dependências do Centro de Treinamento Profissional do Corpo de Bombeiros.

À Vista Engenharia, PCF Soluções em Engenharia e HCM Engenharia, que acreditaram em mim e colaboraram com a doação dos perfis metálicos de aço estrutural e da tinta intumescente utilizada na pesquisa.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

RESUMO

A utilização das tintas intumescentes para proteção passiva em projetos de segurança contra incêndio tem tido uma crescente utilização nos últimos anos. Aspectos positivos como a boa qualidade de acabamento superficial e bom desempenho como barreira térmica fazem com que diversos pesquisadores desenvolvam estudos visando à caracterização deste tipo de proteção para se definir o comportamento dos materiais intumescentes. No Brasil, o dimensionamento de sistemas de proteção passiva é prescrito pela ABNT NBR 14323:2013. Entretanto, essas definições não são aplicáveis aos revestimentos intumescentes, uma vez que estes possuem propriedades físico-químicas não lineares, desencadeadas pela queima de gases e formação de um composto espumífero não homogêneo durante o processo de aquecimento. Deste modo, a aplicação na construção civil destes materiais de proteção é baseada principalmente em estudos experimentais, desenvolvidos pelos fabricantes com base em prescrições normativas estrangeiras. Este trabalho objetiva a determinação dos parâmetros físicos e cinéticos que descrevem o comportamento da proteção passiva intumescente em vigas metálicas submetidas ao incêndio natural. Para esse propósito, foram executados ensaios de perfis metálicos curtos com diferentes fatores de massividade e espessuras secas de proteção em um forno elétrico, para determinação do perfil de temperatura do elemento protegido e da condutividade térmica efetiva da tinta intumescente, como prevê a EN-13381:2010. Em escala real, foram feitos ensaios de vigas protegidas em situação de incêndio natural. Por meio deste ensaio, pode-se obter os gradientes de temperatura atuantes no substrato metálico protegido, a temperatura dos gases provenientes da queima e as deformações impostas pelo carregamento aplicado. Avaliou-se também o desenvolvimento da camada intumescente, a influência do aquecimento localizado e os possíveis pontos críticos formados na camada intumescente desenvolvida após o incêndio. Os resultados obtidos neste ensaio de vigas foram aplicados às equações normativas europeias para obtenção da condutividade térmica em função da temperatura média dos gases do incêndio e do aço protegido. A formação da camada carbonosa apresentou trincas nas regiões de arestas vivas, o que sugere cuidados na aplicação para garantir a segurança estrutural. Observou-se, contudo, que a tinta intumescente desempenhou bom comportamento na proteção contra o fogo para os perfis com elevado fator de massividade, impedindo a degradação das propriedades mecânicas pela ação do fogo e consequentemente o surgimento de falhas.

Palavras-chave: incêndio natural; tinta intumescente; aço; ensaios experimentais.

ABSTRACT

The use of intumescent paints for passive fire protection in fire-safety projects has increased in recent years. Positive aspects like superior quality surface finishing and effective thermal barrier performance have led numerous researchers to conduct studies aiming to characterize this type of protection, describing the behavior of intumescent coatings. In Brazil, the design of passive protection systems is prescribed by ABNT NBR 14323:2013. However, these definitions do not apply to intumescent coatings as they present non-linear physicochemical properties triggered by the burning of gas and the formation of a non-homogeneous foamy compound during the heating process. Therefore, the application of these protective materials in civil construction depends mainly on experimental studies developed by manufacturers based on foreign regulatory prescriptions. This study aims to determine the physical and kinetic parameters describing the behavior of passive protection provided by intumescent paint on steel beams exposed to natural fires. For this purpose, tests were carried out on short steel profiles with different section factors and different dry protection thicknesses in an electric oven to determine the temperature profile of the protected element and the effective thermal conductivity of the intumescent paint, as prescribed by EN-13381:2010. Full-scale tests were also carried out on protected beams under natural fire conditions. Through these tests, the temperature gradients acting on the protected metallic substrate, the temperature of gases resulting from the combustion, and the deformations caused by applied loading were determined. Additionally, the development of the intumescent layer, the influence of localized heating, and potential critical points formed in the intumescent layer post-fire were evaluated. The results obtained from these beam tests were applied to European regulatory equations to derive the thermal conductivity as a function of the average temperature of the fire gases and protected steel. The formation of the carbonaceous layer showed cracks in the edges, indicating the need for caution during application to ensure structural safety. Despite this, it was observed that the intumescent paint showed excellent behavior in fire protection for profiles with a high section factor, avoiding the degradation of mechanical properties due to fire and consequently the emergence of failures.

Keywords: natural fire; intumescent paintings; steel; experimental study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Tipos de proteção passiva aplicadas em estruturas metálicas.	22
Figura 2-1 - Curva de temperatura ilustrativa em função do tempo de um incêndio real.	29
Figura 2-2- Curvas de incêndio padrão ISO834-1:1999 e de hidrocarbonetos.	30
Figura 2-3 - Diferenças na formação do processo expansivo nos ensaios realizados	40
Figura 2-4 - Ensaio de resistência ao fogo de perfis estruturas fletidos realizado.	41
Figura 2-5 - Comparação do processo expansivo pelos dois métodos realizado.	43
Figura 2-6 - Ensaio de elementos metálicos submetidos ao incêndio localizado realizados. ...	47
Figura 2-7 - Amostras utilizadas para ensaio de intemperismo.	49
Figura 2-8 - Condutividade térmica versus temperatura.	52
Figura 2-9 - Condutividade térmica calculada por Dai (2009) e Krisnamoorthy (2011)	53
Figura 2-10 – Ábaco de verificação da resistência ao fogo.	55
Figura 2-11 - Condutividade térmica versus temperatura.	56
Figura 3-1- Amostras para ensaio de tração a temperatura ambiente (medidas em milímetros)	70
Figura 3-2 - Gráfico da resistência ao escoamento x deformação das amostras ensaiadas	71
Figura 3-3 – Aparelho de ensaio a tração a temperatura ambiente.	72
Figura 3-4 - Amostras após ensaio de tração e o perfil de ruptura registrado.	72
Figura 3-5 - Curvas de redução da resistência ao escoamento em função da temperatura para o aço A572-GR50.	73
Figura 3-6 - Curvas de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço A572-GR50.	73

Figura 3-7 - Curvas de redução da resistência ao escoamento em função da temperatura para aço ASTM A36.....	74
Figura 3-8 - Curvas de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço ASTM A36.....	74
Figura 3-9 - Modelo da máquina utilizada para ensaio de análise termogravimétrica.	76
Figura 3-10- Curvas de TG para a tinta sob diferentes taxas de aquecimentos em atmosfera de ar.	76
Figura 3-11- Curvas experimentais de DTG da tinta intumescente para diferentes taxas de aquecimento em atmosfera de ar.	77
Figura 3-12- Curvas de DTG para taxa de aquecimento de 25°C/min para atmosferas diferentes	77
Figura 3-13- Análise DSC da tinta intumescente ensaiada.	78
Figura 4-1- Forno elétrico utilizado nos ensaios de reação ao fogo.	81
Figura 4-2- Procedimento de pintura dos perfis com tinta primer epóxi.	83
Figura 4-3- Aferição da espessura de tinta aplicada.	84
Figura 4-4- Posição dos termopares TMPV soldados nos diferentes perfis ensaiados.....	85
Figura 4-5- Sistema experimental para ensaios de perfis curtos.	86
Figura 4-6 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P1-W150x13.	87
Figura 4-7 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P2-W150x13.	87
Figura 4-8 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P3-W200x31.3.	88
Figura 4-9 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P4-W200x31.3.	89
Figura 4-10 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P5-TQ100x4.75.....	90
Figura 4-11 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P6-TQ100x4.75.....	90

Figura 4-12 – Perfil P1-W150X13 com 130µm após ensaio.	91
Figura 4-13 - Perfis P2-W150X13 com 500µm após ensaio.	92
Figura 4-14 - Perfis P3-W200X31.3 com 130µm após ensaio.....	93
Figura 4-15 - Perfil P4-W200X31.3 com 300µm após ensaio.	93
Figura 4-16 – Perfil P5-TQ100x4,75 com 130µm após ensaio.....	94
Figura 4-17 - Perfil P6-TQ100x4,75 com 275µm após ensaio.	95
Figura 4-18 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P1-W150X13 - 130µm	96
Figura 4-19 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P2-W150X13 - 500µm	97
Figura 4-20 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P3-W200X31.3 - 130µm	98
Figura 4-21 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P4-W200X31.3 - 300µm	98
Figura 4-22 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P5-TQ100X4,75 - 130µm	99
Figura 4-23 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P6-TQ100X4,75 - 275µm.	100
Figura 4-24 - Trinca na camada expansiva da tinta intumescente.....	104
Figura 5-1- Container metálico utilizado nos ensaios de resistência ao fogo de vigas protegidas.	106
Figura 5-2- Modelo teórico dos esforços atuantes na viga para carga unitária.	107
Figura 5-3- Modelo experimental de vigas protegidas.	109
Figura 5-4- Adaptações necessárias para execução dos ensaios.	110

Figura 5-5- Montagem do <i>set-up</i> de ensaio com auxílio de caminhão Munck.	111
Figura 5-6- Carga de incêndio posicionada para início do ensaio.....	112
Figura 5-7- Configuração final da montagem do ensaio de vigas protegidas.	112
Figura 5-8- Posição em corte dos termopares de sonda para aferição da temperatura no compartimento.	113
Figura 5-9- Posição em planta dos termopares de sonda para aferição da temperatura no compartimento	114
Figura 5-10- Fixação dos termopares de sonda TMPS dentro do ambiente de ensaio.	115
Figura 5-11- Posição e nomeação dos termopares e LVDT's para instrumentação da viga..	115
Figura 5-12 - Pontos de aferição da medida de deslocamento manual após o ensaio	116
Figura 5-13 – Temperaturas atuantes durante o ensaio da viga V1- TQ100X4,75.....	117
Figura 5-14 – Temperaturas atuantes durante o ensaio da viga V2- W150X13.	118
Figura 5-15 – Temperaturas durante o ensaio da viga V3- W200X31,3.....	119
Figura 5-16 - Temperatura média do compartimento e da viga V1- TQ100X4,75, protegida.	120
Figura 5-17 - Temperatura média do compartimento e da viga V2- W150X13 protegida....	120
Figura 5-18 - Temperatura média do compartimento e da viga V3- W200X31,3 protegida.	121
Figura 5-19 - Expansão da tinta intumescente na viga V1-TQ100X4,75.....	122
Figura 5-20 - Expansão da tinta intumescente na viga V2-W150X13	123
Figura 5-21 - Expansão da tinta intumescente na viga V3-W200X31,3	124
Figura 5-22 - Condutividade térmica da viga V1-TQ10X4,75 – 275 μm	125
Figura 5-23 - Condutividade térmica da viga V2-W150X13 – 500 μm	125

Figura 5-24 - Condutividade térmica da viga V3-W200X31.3 – 300 μm	126
Figura 5-25 - Deslocamentos verticais medidos nas vigas no decorrer do tempo	128
Figura 5-26 – Deformada da viga V1-TQ100x4,75 após ensaio.....	133
Figura 5-27 - Deformada da viga V2-W150X13 após ensaio.....	134
Figura 5-28 - Deformada da viga V3-W200X31.3 após ensaio	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1- Valores de potencial calorífico específico segundo ABNT NBR 14432:2001. ...	31
Tabela 2-2- Valores de carga de incêndio específica segundo ABNT 14432:2001.....	33
Tabela 2-3- Fatores de redução do aço	34
Tabela 2-4- Parâmetros referentes ao momento fletor.....	58
Tabela 3-1- Seções geométricas e suas propriedades	68
Tabela 3-2 - Especificações técnicas do fabricante da tinta intumescente.....	69
Tabela 3-3- Resultados médios de resistência ao escoamento e modulo de elasticidade para aço A572-GR.50.	71
Tabela 3-4- Resultados médios de resistência ao escoamento e modulo de elasticidade para aço A36.	71
Tabela 3-5- Resultado dos ensaios de termogravimetria	78
Tabela 4-1- Perfis ensaiados e suas características.....	82
Tabela 4-2- Espessuras médias de cobertura.....	84
Tabela 4-3 - Resultados dos ensaios de perfis curtos protegidos	103
Tabela 5-1 - Dados dos perfis estruturais ensaiados e suas características.	108
Tabela 5-2 - Propriedades geométricas dos perfis estruturais ensaiados.	108
Tabela 5-3 - Deslocamentos verticais medidos manualmente após o ensaio.....	128
Tabela 5-4 - Resultados dos ensaios de vigas de aço protegidas.....	132
Tabela 5-5 – Temperaturas médias máximas dos ensaios de vigas.....	132

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a	Área da seção do perfil de aço
A_f	Área do piso do compartimento
A_p/V	Fator de massividade do perfil metálico
c_a	Calor específico do aço
C_b	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
c_p	Calor específico do material de proteção
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
d_p	Espessura do material de proteção
E_a	Módulo de elasticidade do aço.
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
f_y	Resistência ao escoamento do aço
k_{sh}	Fator de sombreamento
h	Altura da seção transversal
H_i	Potencial calorífico específico do material combustível
I	Momento de inércia da seção transversal
J	Constante de torção
L_b	Comprimento destravado
$\Delta l/l$	Alongamento do aço
M	Momento fletor
M_i	Massa total de cada componente do material comburentes
M_{Cr}	Momento fletor crítico
M_{Sd}	Momento fletor solicitante de cálculo

M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo
M_{Rk}	Momento fletor resistente característico
M_{Pl}	Momento fletor de plastificação
M_r	Momento fletor residual
ρ_a	Peso específico do aço
ρ_p	Peso específico do material de proteção
r	Raio de giração
t	Instante de tempo t, em segundos.
t_w	Espessura da alma
t_f	Espessura da mesa
V	Esforço cortante
V_{Cr}	Esforço cortante crítico
V_{Rk}	Esforço cortante resistente característico
V_{Pl}	Esforço cortante de plastificação
V_{Sd}	Esforço cortante solicitante de cálculo
V_{Rd}	Esforço cortante resistente de cálculo
W_x	Módulo de resistência elástico
Z_x	Módulo de resistência plástico

ALFABETO GREGO

λ	Índice de esbeltez
λ_p	Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_r	Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas
$\lambda_{p,fi}$	Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas em incêndio
$\lambda_{r,fi}$	Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas em incêndio
θ_g	Temperatura dos gases do incêndio
θ_0	Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento
θ_a	Temperatura do aço
k_y, θ	Redução da resistência ao escoamento não sujeito a flambagem local
k_σ, θ	Redução da resistência ao escoamento sujeito a flambagem local
kE, θ	Fator de redução do módulo de elasticidade
λ_a	Condutividade térmica do aço
Δ	Variação
ϕ	Fluxo de calor
$\lambda_{p,t}$	Condutividade térmica do material de proteção
σ_r	Tensão residual
φ	Fluxo de calor por unidade de área
ξ	Emissividade
χ_{fi}	Fator de redução do momento fletor com flambagem lateral com torção

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBMMG	Academia do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais
DEES	Departamento de Engenharia de Estruturas
DEMC	Departamento de Engenharia de Materiais de Construção
DSC	Ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial
EN	European Standards
FLA	Flambagem local das almas
FLM	Flambagem local das mesas
FLP	Flambagem local das paredes
FLT	Flambagem lateral por torção
H-TRIS	Sistema de Indução de Taxa de Transferência de Calor
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira Registrada
SCI	Segurança contra incêndio
TG	Ensaio de Termogravimetria
TMPS	Termopares para aferição da temperatura do ambiente
TMPV	Termopares para aferição da temperatura da viga protegida
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Considerações Iniciais	20
1.2	Objetivos.....	23
1.3	Justificativa.....	23
1.4	Metodologia.....	24
1.5	Estrutura da Dissertação	24
2	Revisão da Literatura	27
2.1	Considerações Iniciais	27
2.2	Segurança dos Elementos de Aço sob Ação do Fogo	28
2.2.1	Curvas de Incêndio Padrão	29
2.2.2	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo	33
2.2.3	Propriedades Mecânicas do Aço em Temperaturas Elevadas.....	34
2.3	Comportamento das Tintas Intumescentes	36
2.3.1	O Processo Expansivo.....	38
2.3.2	Aquecimento Localizado.....	46
2.3.3	Efeito do Intemperismo.....	48
2.3.4	Condutividade Térmica.....	50
2.4	Dimensionamento de Vigas de Aço em Temperatura Ambiente	56
2.5	Dimensionamento de Vigas de Aço em Situação de Incêndio	61
2.5.1	Cálculo do Desenvolvimento da Temperatura no Aço.....	61
2.5.2	Esforços Resistentes em Situação de Incêndio	63
2.6	Considerações finais.....	66
3	Caracterização dos Materiais Usados nos Experimentos.....	68
3.1	Propriedades mecânicas e geométricas dos perfis ensaiados	69
3.2	Análise cinética da decomposição térmica da tinta intumescente.....	74
3.3	Considerações finais.....	78
4	Ensaio Experimentais em Perfis Curtos Protegidos.....	80

4.1	Considerações Gerais	80
4.2	Premissas Adotadas.....	81
4.3	Metodologia para a Realização dos Ensaios.....	84
4.3.1	Descrição dos ensaios e instrumentação.....	84
4.4	Resultados Obtidos.....	86
4.4.1	Temperatura do forno e do perfil protegido	86
4.4.2	Comportamento expansivo da tinta intumescente.....	91
4.4.3	Condutividade térmica da tinta intumescente	96
4.5	Discussão dos Resultados.....	100
4.6	Considerações finais.....	104
5	Ensaio de incêndio natural em vigas aço protegidas com tinta intumescente	106
5.1	Considerações Gerais	106
5.2	Premissas Adotadas.....	107
5.3	Metodologia para Realização dos Ensaios.....	110
5.3.1	Descrição dos procedimentos de ensaio	110
5.3.2	Instrumentação dos corpos de prova e do ambiente de ensaio	113
5.4	Resultados Obtidos.....	117
5.4.1	Temperatura dos gases e do perfil protegido	117
5.4.2	Comportamento expansivo da tinta intumescente.....	122
5.4.3	Condutividade térmica da tinta intumescente	124
5.4.4	Deslocamentos verticais nas extremidades.....	127
5.5	Discussão dos Resultados.....	129
5.6	Considerações finais.....	135
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros	137
6.1	Conclusões.....	137
6.2	Sugestões para Estudos Futuros.....	139
	Referências	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A verificação da segurança contra incêndio (SCI) em projetos estruturais, sejam eles de concreto armado, de aço e/ou mistos de aço e concreto, tem tido grande relevância face aos inúmeros casos de incêndios de grandes proporções em edifícios. Associado às perdas materiais, muitas vidas são perdidas em casos de colapso das edificações atingidas pela ação do incêndio. Para diminuir estes danos, regulamentos e prescrições normativas devem ser rigorosamente implementados, bem como os sistemas de proteção contra incêndio especificados devem ser vistoriados e garantidos de que estejam em boas condições durante toda a vida útil da edificação. O estudo dos métodos de proteção contra incêndio deve contemplar desde as fases de detecção até a extinção do incêndio, passando pelo dimensionamento da estrutura e pelo comportamento dos materiais reagentes à ação do fogo, para que o projeto de segurança contra incêndio seja executado corretamente (Rodrigues, 2021).

Usualmente, o entendimento básico da segurança contra incêndio é dividido em dois domínios: o de desempenho e o prescritivo. O domínio prescritivo é responsável por desenvolver medidas e métodos que ao serem cumpridos com rigor, irão atender às condições de incêndio que podem ocorrer naquela estrutura. Já o domínio do desempenho visa compreender o comportamento dos materiais expostos à ação do fogo e assim estabelecer uma relação direta da sua resistência com a segurança face aos diversos tipos de incêndio.

Com isso, criou-se a definição do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), caracterizado como tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando submetido ao incêndio-padrão (ABNT NBR 14432:2001). Este índice leva em consideração fatores como o uso e ocupação, profundidade do subsolo, altura da edificação. Dentro desse tempo mínimo estabelecido, deve-se garantir a evacuação dos ocupantes, a segurança das operações de combate ao incêndio, e conseqüentemente, evitar a evolução do incêndio e danos às edificações limítrofes. Essa definição auxilia tanto na definição de medidas prescritivas, quanto na quantificação das classes e tipos de incêndio ocorridos, para definição de medidas baseadas no desempenho das estruturas.

No entanto, o panorama brasileiro realista remete a uma série de deficiências associadas principalmente ao não cumprimento das prescrições normativas, aliada à falta de manutenção e cuidado com as edificações no decorrer do tempo. Juntamente com estes fatores, contribuem para a má qualidade dos projetos de segurança contra incêndio, a falta de formação universitária nestas áreas, visto que poucos cursos dão a devida relevância a essa temática da segurança contra incêndios em suas grades curriculares.

Em âmbito mundial, a segurança contra incêndio também apresenta diretrizes ineficazes. Baseada em regras e regulamentos prescritivos, a engenharia de SCI é pouco flexível para que os projetistas possam maximizar o desempenho das estruturas, resultando com frequência na majoração das cargas e no superdimensionamento dos elementos estruturais (Mesquita, 2015). Para resolver essa problemática, buscou-se o desenvolvimento de metodologias baseadas no desempenho, que dizem respeito à análise do desenvolvimento do incêndio, a observação da resposta e os fenômenos que ocorrem nos materiais diante da exposição ao incêndio.

Com isso, para aumentar a viabilidade do projeto de segurança contra incêndio em estruturas metálicas e/ou mistas de aço e concreto, são comumente adotadas medidas de proteção ativas e/ou passivas em um mesmo projeto. Chuveiros tipo *sprinklers*, alarmes e sinalizações de emergência são medidas dito ativas no combate ao incêndio, pois garantem a ação imediata contra o incêndio. Outro recurso é a aplicação de sistemas de proteção no substrato dos perfis expostos a temperatura elevada, como revestimentos em argamassa projetada, placas de gesso e/ou as chamadas tintas intumescentes. Este método atua passivamente na resistência estrutural da edificação, uma vez que sua função é impedir a progressão da temperatura média da superfície, impedindo a degradação das propriedades mecânicas do material em incêndio de modo que a estrutura atenda ao TRRF solicitado em projeto.

Citados os principais métodos de proteção, a definição de qual sistema utilizar, passiva ou ativa, leva em consideração até mesmo parâmetros estéticos. Em situações em que a estrutura metálica possui caráter decorativo, especificado pelo projeto de arquitetura, se faz necessária a manutenção das características estéticas dos perfis metálicos. Neste caso, o uso da pintura intumescente se justifica, pois confere ao perfil bom acabamento superficial, com aspecto semelhante ao encontrado em perfis pintados com tintas convencionais, ao contrário da solução com argamassa projetada que possui aspecto grosseiro para o acabamento superficial, como pode ser visualizado na Figura 1-1.



(a) Tinta intumescente

(b) Argamassa projetada

Figura 1-1 - Tipos de proteção passiva aplicadas em estruturas metálicas.

Em uma situação de projeto, para atender aos requisitos de segurança contra incêndio, torna-se necessário a garantia de que os elementos principais da estrutura, entende-se estes como pilares, vigas e lajes, irão resistir às solicitações de ações durante o incêndio. Para isso, aplica-se a proteção passiva nestes elementos principais, considerando a temperatura crítica e o fator de forma de cada perfil de aço.

O objeto de estudo deste trabalho, as vigas metálicas são comumente utilizadas em edificações mistas de aço e concreto para suportar as lajes mistas ou em tesouras de cobertura no caso de galpões. Nessas configurações, as vigas estão submetidas a um esforço de flexão em torno do eixo de maior inércia, além de forças cisalhantes ao longo do comprimento. Face à importância estrutural das vigas no comportamento da edificação em caso de incêndio, buscam-se formas de garantir a integridade destes elementos estruturais em situação de incêndio, por meio da pintura com tinta intumescente.

Nesse contexto, é evidente que o desenvolvimento e a aplicação das tintas intumescentes ainda carecem de investigações aprofundadas. Essas pesquisas são essenciais para a expansão do conhecimento sobre diversos aspectos relacionados às tintas intumescentes. Tais questões englobam o desempenho prévio ao incêndio, incluindo sua resistência aos efeitos mecânicos decorrentes de impactos e o efeito do intemperismo ao longo da vida útil da aplicação. O comportamento da camada polimérica durante a exposição ao fogo, ao se considerar a existência de obstáculos que possam interferir no processo de formação da intumescência, a influência da taxa de aquecimento regida pelas diferentes curvas de incêndio impacta diretamente no comportamento do material de proteção ao fogo. Além disso, a reação posterior

ao incêndio, ao analisar o comportamento da camada residual carbonizada, com a porcentagem de massa final resultante do processo de queima também é um objeto de estudo, para se compreender a eficiência do material.

Ademais, dada a variabilidade dos cenários de incêndio possíveis, é crucial examinar minuciosamente como as tintas intumescentes se comportam diante das distintas curvas de aquecimento (sejam elas curvas de incêndio padrão ISO 834-1:1999, incêndio natural ou de hidrocarbonetos). Essa análise pode indicar ocasiões específicas em que a utilização da tinta intumescente é mais apropriada ou contraindicada.

1.2 Objetivos

A presente pesquisa tem como objetivo geral analisar do comportamento de vigas metálicas de diferentes composições geométricas, protegidas com tintas intumescentes de base aquosa submetidas a situação de incêndio natural, visando a determinação de parâmetros físicos de temperatura do substrato metálico protegido, condutividade térmica da tinta intumescente, desenvolvimento da camada intumescente, além da avaliação dos modos de flambagem local e global apresentados nos corpos de prova durante e após o ensaio. Observar a influência do nível do carregamento de flexão atuante e da curva de aquecimento preestabelecida com base nas prescrições normativas da ABNT NBR 14432:2001, a ser mensurada durante os ensaios. Com base nestes dados aquisitados, espera-se no futuro implementá-los em um modelo numérico de cálculo, de forma a auxiliar no desenvolvimento de disposições analíticas que sirvam de base para o dimensionamento de vigas de aço estrutural protegidas com tintas intumescentes submetidas a carregamento de flexão uniforme.

1.3 Justificativa

O dimensionamento de elementos metálicos protegidos com tintas intumescentes apresenta lacunas a serem preenchidas, principalmente no que diz respeito à compreensão do comportamento não homogêneo das tintas intumescentes em diferentes condições de incêndio. Aspectos relacionados ao desenvolvimento da camada intumescente em perfis estruturais com diferentes seções transversais, determinação da condutividade térmica da tinta e distribuição da temperatura na viga metálica protegida são os principais objetivos de estudo deste trabalho, uma vez que esses parâmetros são fundamentais para a simulação numérica do comportamento da tinta intumescente. Além disso, a observação dos fenômenos físicos que atuam na tinta

durante a exposição ao fogo, como a expansão volumétrica da camada carbonosa e a liberação de gases provenientes do processo de queima, são elementos de destaque a serem observados nos experimentos implementados. Para isto, desenvolveu-se neste trabalho uma metodologia experimental, visada na obtenção de parâmetros físicos que descrevessem o comportamento das tintas intumescentes em vigas de aço de diferentes fatores de forma e seção geométrica, submetidas à ação do fogo em laboratório e em condição natural. A partir disso, espera-se obter resultados de temperatura e condutividade térmica coerentes com a metodologia analítica implementada, possibilitando a implementação de um modelo de dimensionamento preciso para este tipo de proteção passiva, ampliando parte dos conhecimentos já presentes na bibliografia.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada para se atingir o objetivo mencionado no item 1.2 será composta das seguintes fases:

- a) estudo dos principais métodos de experimentação de elementos de aço protegidos com tintas intumescentes, a entender os efeitos do aquecimento localizado, processo expansivo e a determinação da condutividade térmica das tintas intumescentes.
- b) ensaios de caracterização termogravimétrica e de calorimetria exploratória diferencial da tinta intumescente e das propriedades mecânicas em temperatura ambiente para os aços estruturais que compõem as seções transversais ensaiadas;
- c) ensaios de perfis curtos de aço em fornos elétricos, de seções laminadas W e quadradas, protegidos com diferentes coberturas de tinta intumescente, em função do TRRF, para avaliação da condutividade térmica da tinta e do perfil de temperatura na superfície protegida do aço;
- d) ensaio em escala real de vigas de aço de diferentes seções submetidas a incêndio natural, visando a obtenção dos perfis de temperatura da superfície protegida e posterior cálculo da condutividade térmica da tinta intumescente.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em 6 seções, que descrevem a metodologia experimental implementada para análise do comportamento de vigas de aço protegidas com tintas intumescentes em condições de incêndio natural.

Nesta primeira seção, são apresentadas as considerações gerais que dizem respeito ao tema da pesquisa, os objetivos gerais visados que justificam a execução do trabalho e a descrição da metodologia definida, item a item, para alcançar os objetivos descritos.

Na segunda seção, é feita uma introdução ao tema, em que são abordados os conceitos gerais de segurança contra incêndio e o estado atual do estudo do comportamento das tintas intumescentes no que diz respeito a sua utilização como material de proteção contra o fogo. Ainda neste capítulo, são apresentados os métodos de dimensionamento de vigas em temperatura ambiente e em situação de incêndio, com ênfase na influência da proteção passiva no dimensionamento, por meio da condutividade térmica dos materiais de proteção.

No decorrer da terceira seção, é feita a caracterização dos principais materiais utilizados na pesquisa. Com as tintas intumescentes foi feita análise termogravimétrica e de calorimetria exploratória diferencial, para compreender as fases de ativação e as porcentagens de massa consumidas em cada fase, sob diferentes taxas de aquecimento e atmosfera. Para caracterização dos aços estruturais, foram feitos ensaios de resistência a tração em temperatura ambiente em amostras retiradas dos perfis, posteriormente ensaiadas em uma máquina universal. Por meio deste ensaio, pode-se obter a tensão de escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade dos aços trabalhados. Por simplificação, utilizando os coeficientes de redução da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, foram estimados os parâmetros de tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço para altas temperaturas.

Na quarta seção, foi avaliado o desempenho da tinta intumescente quando aplicada em perfis metálicos curtos submetidos ao incêndio em forno elétrico, com diferentes espessuras de proteção definidas por meio da temperatura máxima a ser atingida pelo aço e pelo tempo requerido de resistência ao fogo. Para analisar as peculiaridades do comportamento intumescente, foram ensaiadas amostras com diferentes fatores de massividade e diferentes composições de seção transversal. Isso possibilitou a análise do efeito de espumificação na superfície metálica, o estudo da evolução da temperatura ao longo do tempo no perfil protegido, bem como a obtenção da condutividade térmica da tinta intumescente.

A quinta seção aborda o ensaio de vigas protegidas submetidas a condição de incêndio natural. Para esse propósito, foram ensaiadas vigas de diferentes fatores de forma e diferentes composições de seção transversal, de propriedades semelhantes às que foram ensaiadas nos ensaios em forno elétrico. Neste ensaio em escala real, foram aferidas as temperaturas do

ambiente incendiado e as temperaturas do substrato metálico protegido, bem como os deslocamentos de extremidade ocorridos na viga após o ensaio. Com estes resultados, foi possível analisar a evolução da temperatura nas seções, calcular a condutividade térmica da tinta intumescente e comparar com os resultados obtidos em ensaios de forno elétrico e o resultado analítico obtido via equacionamento de norma para a viga metálica sem proteção.

Na sexta e última seção, são feitas as considerações e conclusões finais obtidas neste trabalho, destacando os principais tópicos analisados, os aspectos positivos e negativos encontrados perante a realização experimental. Detalha-se também neste último capítulo algumas linhas de investigação para continuidade do estudo de tintas intumescentes aplicadas a estruturas de aço.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações Iniciais

O primeiro relato de utilização da proteção com intumescentes foi na década de 30 do século passado, quando Heinrich Tramm e seu grupo de pesquisa, em 1938, estudou e patenteou nos Estados Unidos da América os métodos de proteção de vigas de madeira. O grupo de pesquisa utilizou revestimentos expansivos para aumentar a resistência ao fogo dos elementos estruturais e assim prolongar o tempo de exposição do material ao fogo. No Brasil, as primeiras empresas a comercializar este tipo de produto surgiram na década de 90, mas devido aos custos elevados e ao pouco conhecimento acerca deste material, a aceitação no mercado ocorreu de maneira lenta. Com o passar do tempo, a popularização das tintas intumescentes se deu principalmente, além dos benefícios significativos na resistência ao fogo, pelo fato da pintura intumescente propiciar uma boa qualidade de acabamento, favorecendo as condições estéticas requeridas pelos arquitetos para elementos estruturais de fachada ou localizados em áreas expostas. Diante disso, impulsionaram-se os estudos a respeito da caracterização e do entendimento do comportamento das tintas intumescentes.

Nesta seção, serão abordadas inicialmente as prescrições normativas que dizem respeito à segurança estrutural de elementos de aço sob condição de incêndio, analisando os itens previstos pela ABNT NBR 14432:2001 para tratativas a respeito das exigências a serem cumpridas nos projetos de segurança contra incêndio. Para essa análise, se faz necessária a observação dos métodos europeus que possuem maior abrangência no que diz respeito a proteção passiva com materiais não-homogêneos.

Em seguida, serão trazidos os principais trabalhos desenvolvidos no que diz respeito à compreensão do comportamento das tintas intumescentes em situação de incêndio, bem como suas peculiaridades decorrentes da sua aplicação em estruturas de aço. Para concluir, serão abordados os métodos de dimensionamento de vigas de aço em temperatura ambiente, prescritos na ABNT NBR 8800:2008, e em situação de incêndio, abordado pela ABNT NBR 14323:2013.

2.2 Segurança dos Elementos de Aço sob Ação do Fogo

Para garantir a segurança dos elementos estruturais em situação de incêndio, deve-se buscar o entendimento dos efeitos físicos que ocorrem durante esse fenômeno. Segundo Rodrigues *et al* (2021), o fogo é um fenômeno físico-químico resultante da combustão, onde o material combustível reage quimicamente com o comburente, em uma reação exotérmica que libera energia na forma de calor. Do processo de queima, tem-se como resultado a produção do dióxido de carbono e água, que devido à alta energia liberada na reação, por muitas vezes se transforma em estado gasoso.

Em um ambiente tomado pelo incêndio, os três principais tipos de mecanismos de transferência podem vir a ocorrer: radiação do foco de incêndio; correntes de convecção na face exposta ao fogo e a condução térmica nas interfaces do incêndio. Essas ações ocorrem em fases bem definidas de um incêndio. Destaca-se inicialmente a ignição do foco do incêndio que é a origem do fenômeno. Em incêndios residenciais, a ignição se dá principalmente por sobrecargas no sistema elétrico, chamas expostas e instalações de gases defeituosas. A segunda fase é caracterizada pelo aquecimento brusco, onde o fogo consome toda a carga de incêndio disponível, dando origem ao *flashover*. Este termo é utilizado para designar o momento em que ocorre a inflamação generalizada, com altas produções de gases inflamáveis e fumaça no ambiente. Graficamente, tem-se o *flashover* como o ponto de inflexão entre a curva da fase inicial e a curva da combustão generalizada. Após a consumação de toda a carga de incêndio disponível no ambiente, tem-se a fase de resfriamento e o final do incêndio. A representação das fases citadas acima pode ser visualizada por meio da curva de temperatura-tempo ilustrada na Figura 2-1.

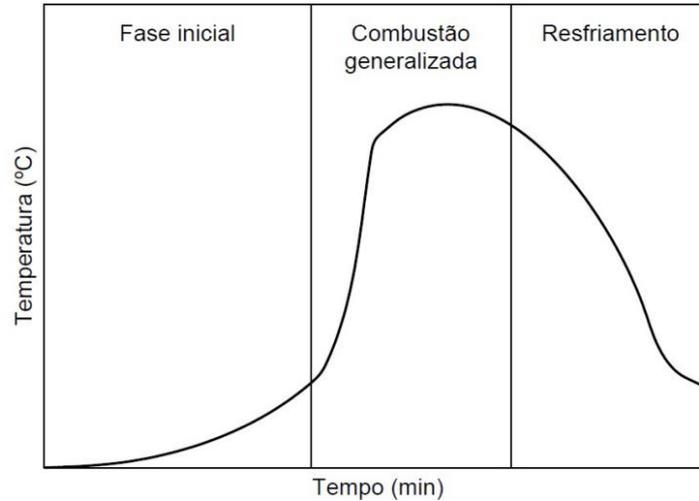


Figura 2-1 - Curva de temperatura ilustrativa em função do tempo de um incêndio real.
Fonte: Rodrigues (2021).

2.2.1 Curvas de Incêndio Padrão

Dado o exposto, tem-se outra característica relevante a se destacar que diz respeito ao comportamento do fenômeno do incêndio. Em função da evolução da temperatura dos gases emitidos, tem-se as diferentes curvas de incêndio. A ABNT NBR 14432:2001 adota uma curva de incêndio padrão, que também é utilizada em diversas normas internacionais, tais como a ISO 834-1:1999 e a norma europeia EN 1991-1-2:2010. Por esta curva padrão, a temperatura dos gases quentes pode ser obtida pela equação (2-1):

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \times \log(8t + 1) \quad (2-1)$$

Em que:

θ_g = temperatura dos gases, em °C, no instante t;

θ_0 = temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em °C;

t = tempo, em minutos.

Essa equação é utilizada para incêndios cujo combustível é composto por materiais celulósicos. Desta forma, outra curva padrão muito utilizada nas análises térmicas é a curva de incêndio considerando a combustão de materiais hidrocarbonetos, comumente verificada em casos de incêndios industriais. Neste caso, a temperatura dos gases é dada pela equação (2-2):

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (2-2)$$

Em que:

θ_g = temperatura dos gases, em °C, no instante t ;

t = tempo, em minutos.

A Figura 2-2 ilustra as duas curvas citadas acima, em que é possível visualizar a diferença de intensidade entre os dois métodos de simulação do incêndio.

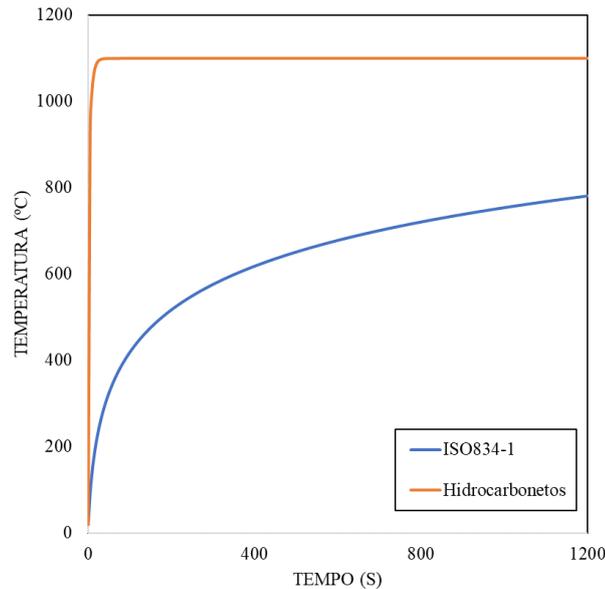


Figura 2-2- Curvas de incêndio padrão ISO834-1:1999 e de hidrocarbonetos.

No entanto, essas curvas padrão não representam fidedignamente o incêndio natural, uma vez que não levam em consideração a carga de incêndio específica, o grau de ventilação do ambiente e as propriedades térmicas dos materiais envolvidos no incêndio. Como pode ser visto no perfil de evolução da temperatura ao longo do tempo da Figura 2-2, as curvas de incêndio padrão não consideram a fase de arrefecimento do incêndio, presente nas curvas de incêndio natural proporcionada pela consumação total dos materiais combustíveis e/ou disponibilidade de oxigênio. Devido às peculiaridades de cada ambiente, a fase inicial de uma curva de incêndio real pode sofrer com a falta de material combustível e/ou disponibilidade de oxigênio para deflagração do incêndio, o que prolonga a fase inicial do incêndio real. As diferenças entre os gráficos ilustrados na Figura 2-1 e a Figura 2-2 comprovam as distinções entre os dois tipos de aquecimento.

Com base em estudos experimentais envolvendo a combustão dos principais materiais encontrados em edificações, foi elaborada e apresentada na ABNT NBR 14432:2001 uma

tabela com os valores de potencial calorífico de cada material, ilustrada por fragmentos na Tabela 2-1. A partir destes valores, pode-se então estimar a curva de aquecimento de um incêndio natural e a temperatura dos gases provenientes da queima, em função da quantidade e da área do incêndio.

Tabela 2-1- Valores de potencial calorífico específico.
Fonte: ABNT NBR 14432 (2001).

Tipo de Material	Potencial Calorífico Específico (MJ/kg)
Algodão	28
Borracha	37 (espuma); 32 (tiras)
Madeira	19
Papel	17
Polycarbonato	29
Poliéster	31

Outra padronização adotada diz respeito à classificação das edificações quanto a sua ocupação. Essas classificações vão de A a J, em função do uso e ocupação e a descrição da utilização do edifício, que pode determinar a qual divisão pertence. Considerando essa classificação, a norma também define a carga de incêndio específica para cada tipo de ocupação, por meio da

Tabela 2-2, exemplificada em trechos retirados da norma. Nos casos que fogem do padrão relatado em norma, calcula-se a carga de incêndio específica por meio da equação (2-3) abaixo:

$$q_{fi} = \frac{\sum(M_i \times H_i)}{A_f} \quad (2-3)$$

Em que:

M_i = massa total de cada componente do material comburente (em kg);

H_i = potencial calorífico específico de cada componente do material combustível (MJ/kg);

A_f = área do piso do compartimento (em m²).

Tabela 2-2- Valores de carga de incêndio específica.
Fonte: ABNT 14432(2001).

Ocupação/Us	Descrição	Divisão	Carga de incêndio (q_{fi}) MJ/m ²
Residencial	Apartamentos	A-2	300
Serviços de hospedagem	Hotéis	B-1	500
Comércio varejista	Supermercados	C-1/C-2	300
	Livrarias	C-1/C-2	1000
Serviços profissionais	Escritórios	D-1	700
Locais de reunião pública	Cinemas e teatros	F-5	600
Educacional	Escolas	E-1	300
Serviços de saúde	Hospitais	H-1	300

Essa classificação será utilizada neste trabalho para determinação da carga de incêndio utilizada nos ensaios de resistência ao fogo de vigas protegidas. Conforme a classificação empregada, deve-se calcular a quantidade de material comburente a ser utilizado no ambiente de ensaio para que a temperatura de projeto seja atendida.

2.2.2 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

Verificada a classificação da estrutura quanto a sua ocupação típica, pode-se então obter o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Como simplificação, a norma brasileira traz consigo o método tabular, que estabelece uma relação direta do TRRF em função da ocupação, altura média da edificação e profundidade média do subsolo. Nestes casos, é feita a divisão de tempos requeridos de resistência ao fogo em 30, 60, 90 e 120 minutos.

Outro método normativo válido para a obtenção do TRRF é o chamado método do tempo equivalente, que considera as diversas características da edificação e suas tecnologias construtivas, incluindo desde a carga de incêndio específica até a presença de sistema de proteção ativa e passiva na edificação. Com essa ferramenta, pode-se estimar precisamente o TRRF em concordância com as tecnologias implementadas no canteiro de obras.

A partir dos métodos citados, observa-se sobretudo a influência do sistema construtivo empregado e do tipo de ocupação na determinação do tempo requerido de resistência ao fogo das edificações. Uma vez que a definição do TRRF impacta diretamente na escolha dos sistemas de proteção contra incêndio a serem executados nas obras e construções civis, a ampliação dos

estudos dos materiais de proteção passiva contribui para a melhoria da qualidade dos projetos e sistemas implementados. Conforme definido pela norma brasileira de exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, ABNT NBR 14432:2001, a proteção passiva pode ser definida como o conjunto de medidas incorporado ao sistema construtivo do edifício, sendo funcional durante o uso normal da edificação e que reage passivamente ao desenvolvimento do incêndio, não estabelecendo condições propícias ao seu crescimento e propagação, garantindo a resistência ao fogo, facilitando a fuga dos usuários e a aproximação e o ingresso no edifício para o desenvolvimento das ações de combate.

2.2.3 Propriedades Mecânicas do Aço em Temperaturas Elevadas

No que diz respeito ao comportamento de estruturas de aço submetidas à ação do fogo, observa-se a degradação das propriedades mecânicas do aço em decorrência do aumento da temperatura. Isso ocorre principalmente devido à alta condutividade térmica deste material, que apresenta comportamento linear progressivo com a temperatura no intervalo de 20°C a 800°C. Logo, a resistência de cálculo do aço está diretamente ligada às ações térmicas, visto que vigas de aço mais robustas possuem temperaturas críticas de falha maiores do que as encontradas em seções esbeltas. A temperatura crítica de falha é um fator importante na segurança contra incêndio, pois é definida como a temperatura atuante na seção transversal quando a viga sofre algum tipo de flambagem, seja ela local (na alma ou nas mesas), global (deslocamento máximo admissível), por lateral com torção.

Para obtenção dos valores das propriedades mecânicas em temperatura elevada, serão utilizados os fatores de redução da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013. A Tabela 2-3 ilustra como devem ser feitas as reduções em função da temperatura do aço do perfil para valores a 20°C, da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço.

Tabela 2-3- Fatores de redução do aço
Fonte: ABNT NBR 14323 (2013).

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento k_y, θ	Fator de redução da resistência ao escoamento k_σ, θ	Fator de redução do módulo de elasticidade k_E, θ
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	0,060	0,050	0,068

Com base nos dados exibidos na tabela acima, nota-se que a resistência ao escoamento de seções que não estão sujeitas à flambagem local sofrem reduções impostas pelo fator $k_{y,\theta}$ apenas em temperaturas acima de 500°C. Já para seções transversais susceptíveis à ocorrência de flambagem local, a redução da resistência ao escoamento pelo fator $k_{\sigma,\theta}$ ocorre já nos 200°C. Observa-se, contudo, que o módulo de elasticidade tem seu valor reduzido pelo fator $k_{E,\theta}$ independentemente do tipo de seção transversal. Isso implica diretamente na ocorrência dos efeitos de flambagem local e instabilidade global em seções submetidas à variação de temperatura.

Quanto ao efeito da extensão térmica, a norma EN 1993-1-2:2010 juntamente com a ABNT NBR 14323:2013 preconizam as seguintes equações (2-4) para o alongamento do aço ($\Delta l/l$):

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 750^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$$

Para $750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (2-4)$$

Para $860^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$$

O calor específico do aço, C_a , expresso em J/kg.°C, deve ser obtido com base nas equações (2-5):

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (2-5)$$

Para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

Para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

Para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$c_a = 650$$

A condutividade térmica do aço, λ_a , expressa em W/m.°C, pode ser obtida com base nas equações (2-6):

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800^\circ\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (2-6)$$

Para $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3$$

2.3 Comportamento das Tintas Intumescentes

A tinta intumescente emerge como uma estratégia preeminente de proteção passiva na construção civil, especialmente em estruturas metálicas, onde a integridade estética pode ser um fator relevante considerado nos projetos de arquitetura. Reconhecida por seu fenômeno expansivo durante a exposição ao fogo, esse material é classificado como reativo. Essa classificação deriva da formação de uma camada carbonosa de baixa densidade, gerada no ápice do processo de combustão, o que, por sua vez, retarda a degradação das propriedades mecânicas dos materiais sob ação do fogo. Nesse contexto, o desempenho ao fogo da pintura intumescente está intrinsecamente ligado tanto à espessura seca da aplicação da tinta e à temperatura crítica da superfície. Segundo Mesquita (2015), quando iniciada a reação, a expansão volumétrica do material, caracterizado por sua baixa condutividade térmica, ocorre até que todo o revestimento se transforme em uma camada residual carbonosa, desde que a ação do fogo se mantenha. Durante essa curva de aquecimento, a tinta sofre perda mássica e pode originar uma espuma carbonosa de até 200 vezes o seu volume original.

O desempenho reativo das tintas intumescentes está relacionado à composição química do material. No mercado, encontram-se duas composições de solução: tintas de base aquosa e tintas de base solvente. Quando do seu surgimento, as primeiras tintas intumescentes desenvolvidas eram de base solvente. No entanto, diante do aumento das preocupações ambientais relacionadas à emissão de gases tóxicos e corrosivos no incêndio, buscaram-se soluções mais ecológicas. Em 2004, a União Europeia diante das pressões sociais impostas determinou restrições à emissão de compostos orgânicos voláteis no ambiente e isso amplificou as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de tintas intumescentes de base aquosa.

Com tempo de cura menor, as tintas intumescentes de base aquosa possuem superfície de maior dureza, sendo mais resistentes aos impactos mecânicos decorrentes da movimentação dos elementos protegidos no canteiro de obras. Além disso, com o objetivo de melhorar o desempenho das tintas intumescentes, a indústria da construção civil tem recorrido para a inserção de novas tecnologias, de forma a atender as demandas que o mercado necessita. O uso de fibras de carbono também tem sido implementado, principalmente para aumentar a resistência mecânica e a abrasão do revestimento. Experimentos mais avançados trabalham com a adição de nanopartículas, silicones, resinas e retardantes de chama para aumentar a capacidade de resistência ao fogo das tintas intumescentes.

Conforme caracterizado por Lucherini (2019), a composição química das tintas intumescentes é designada por uma fonte ácida, denominada catalisador, um composto carbonífero e o agente espumífero. As funções de cada ativo são bem definidas e atuam em fases diferentes do processo de intumescência, como pode ser visto nos ensaios de termogravimetria (TG) e de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Durante o aquecimento, a primeira reação que ocorre é a decomposição do catalisador, em temperaturas próximas a 150 e 250°C. Acima dos 200°C, o ácido inicia reação com o composto carbonífero, liberação de água (H₂O) pura e originando um composto carbonoso. Simultaneamente, o agente espumífero é consumido, formando gases que expandem o resíduo carbonoso gerado na reação anterior. Estas ações são endotérmicas, promovendo então o arrefecimento do calor gerado, que por sua vez limita o aquecimento da superfície protegida. Em resumo, a conjugação dos compostos químicos forma uma matriz polimérica que tem papel fundamental para a diminuição da taxa de aquecimento de um perfil de aço exposto a condição de incêndio.

Para garantia da eficiência contra incêndios relatada acima, o processo de aplicação das tintas intumescentes é designado por três fases, segundo Mesquita (2015). Inicialmente, o preparo da superfície de aplicação, com utilização do primer epóxi universal, visa garantir a aderência da pintura intumescente. Neste passo, a superfície deve ser limpa de quaisquer contaminantes e/ou resquícios de oxidação, para assegurar a qualidade da tinta de fundo. Em seguida, tem-se a aplicação da tinta intumescente, que é comumente executada com pistolas de ar comprimido tipo *airless*. Ao final deste processo, deve ser verificada a espessura de aplicação de modo que o valor estabelecido no dimensionamento em função do fator de massividade do perfil seja atendido. O atendimento da espessura seca de projeto pode ser garantido com a aplicação de uma ou mais demãos de tinta, respeitando o tempo de cura nos intervalos de aplicação. Para finalizar, deve ser aplicada tinta esmaltada de poliuretano como acabamento, para aumentar a proteção contra impactos e intempéries ao longo da vida útil do elemento protegido.

2.3.1 O Processo Expansivo

Estudos recentes foram desenvolvidos com o objetivo de se caracterizar e entender melhor o comportamento ao fogo das tintas intumescentes em perfis de aço, principalmente no que diz respeito ao comportamento da camada intumescente formada durante a queima.

Mesquita (2015) elaborou um estudo experimental e numérico de elementos de aço protegidos com tintas intumescentes em situação de incêndio. A avaliação foi feita por meio da elaboração de uma metodologia de testes em micro, pequena e escala real, com perfis de aço estrutural submetidos ao incêndio característico para a curva de incêndio padrão ISO 834-1:1999. Com o modelo analítico calibrado, foi possível observar características peculiares do comportamento das tintas, como o efeito de bordo nos perfis, os picos de aquecimento a que a tinta resiste até a formação de uma massa residual inerte e a influência da espessura do revestimento no controle do aquecimento do perfil de aço, bem como a taxa de perda de massa da pintura.

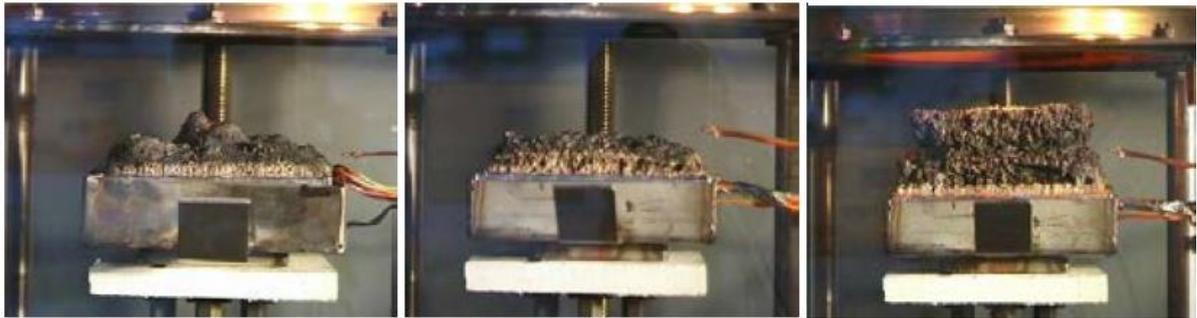
Inicialmente, a metodologia de Mesquita (2015) abrangeu a caracterização de duas tintas intumescentes distintas pela análise de decomposição térmica, utilizando os ensaios de termogravimetria. Constatou-se que as amostras apresentavam similaridades quanto às fases de decomposição, sendo quatro etapas quando o incêndio possuía ambiente oxidativo e apenas três etapas quando o incêndio possuía ambiente inerte. Para o ambiente inerte com azoto, as tintas não apresentavam a ocorrência da última etapa de decomposição, caracterizada pela mudança

na coloração da camada carbonosa de cor preta para cor branca, observada visivelmente nos ensaios e pela análise das frações mássicas obtidas.

Para compreender este efeito, o autor desenvolveu testes em pequena escala com chapas protegidas submetidas a um fluxo de calor por radiação em um calorímetro de cone, ensaiando dois tipos de tintas intumescentes. Ambas de base aquosa, a tinta A quando caracterizada nos ensaios de termogravimetria apresentou energias de ativação maiores que a Tinta B. Além disso, a Tinta A apresentava maior porcentagem de massa residual ao final dos ensaios. Ambas as tintas apresentavam quatro fases de atuação bem definidas, com picos ascendentes que representam reações exotérmicas no material.

Dito isso, foram utilizadas nestes ensaios diferentes espessuras secas de proteção, com placas metálicas submetidas a dois fluxos de calor distintos, referentes a um incêndio em sua fase inicial e um incêndio já desenvolvido, respectivamente. A obtenção dos dados de temperatura dos ensaios foi feita por meio de termopares soldados à superfície da placa metálica. Além disso, observou-se o comportamento da expansão da tinta intumescente ao longo do tempo em função das diferentes composições de ensaio realizadas, como a variação da espessura da placa, do fluxo de calor e da espessura seca de tinta. Como resultado, Mesquita (2015) observou um melhor desempenho da tinta B em relação a tinta A, caracterizado pela temperatura nas amostras com a tinta B serem menores que as amostras protegidas com a tinta A para o mesmo tempo de exposição ao fogo. Em ambas as amostras pode-se observar o processo expansivo, com relação direta para a espessura de camada residual formada com a espessura seca de proteção aplicada inicialmente.

Comparativamente, Mesquita (2015) ensaiou placas de aço protegidas com as duas tintas intumescentes em fornos de resistência ao fogo, com taxas de aquecimento similares à curva de incêndio padrão ISO 834-1:1999. Por meio destes ensaios, constatou-se um comportamento muito distinto do encontrado em ensaios utilizando o calorímetro de cone, como pode ser visto na Figura 2-3. Neste segundo modelo de ensaio, a formação da intumescência apresentou linearidade até o alcance do valor máximo e após este pico, regrediu em função da extinção da produção de gases resultantes do processo de queima e oxidação.



(a) Evolução do processo expansivo nos ensaios de placas em calorímetro de cone.



(b) Evolução do processo expansivo nos ensaios de placas em fornos de resistência ao fogo.

Figura 2-3 - Diferenças na formação do processo expansivo nos ensaios realizados

Fonte: Mesquita (2015)

Para avaliação do comportamento da intumescência em escala real, o autor executou um conjunto de 50 testes em perfis estruturais protegidos com diferentes espessuras secas de tinta intumescente, submetidos a flexão simples e à variação de temperatura, conforme a Figura 2-4. Para análise do efeito da intumescência nas arestas dos perfis, foram utilizadas as seções I e H, tubos quadrados, redondos e cantoneiras. Quanto a resistência ao fogo, foram utilizadas três taxas de carregamento mecânico a serem aplicadas aos perfis, correspondentes à 30%, 50% e 70% da relação momento fletor solicitante sobre o momento fletor resistente. Os resultados obtidos foram comparados com as prescrições normativas da EN 1993-1-2:2010, que diz respeito à obtenção da temperatura crítica e do tempo de resistência ao fogo.

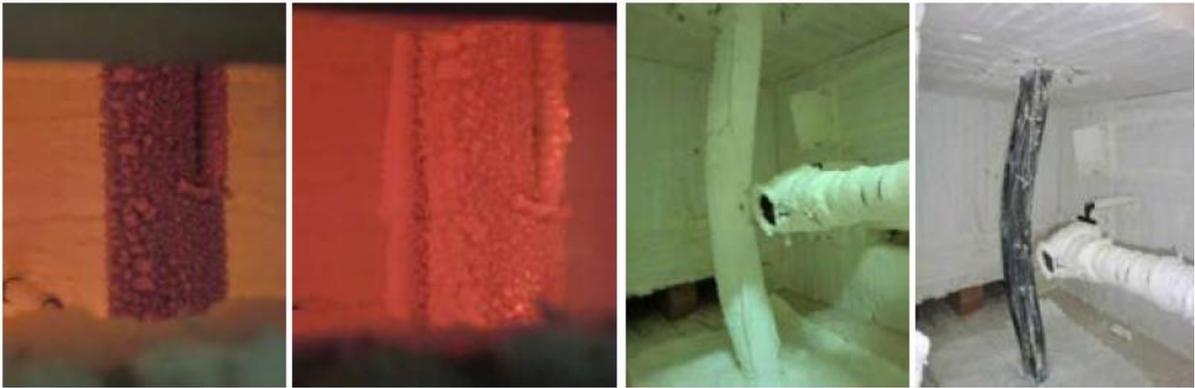


Figura 2-4 - Ensaio de resistência ao fogo de perfis estruturas fletidos realizado.
Fonte: Mesquita (2015)

Mesquita (2015) observou que o resultado experimental do tempo de resistência ao fogo das seções circulares foi inferior ao obtido pelo método simplificado do Eurocódigo. Já as seções em L, o resultado experimental foi consideravelmente superior ao obtido pelo Eurocódigo. Nas análises de perfis com diferentes espessuras, o autor observou a influência da espessura no tempo de resistência ao fogo. Nos perfis I laminados, há uma relação direta do aumento da espessura e do tempo de resistência. No entanto, principalmente nas seções tubulares quadradas e circulares, o aumento da espessura não garante o aumento direto da resistência ao fogo. Essa condição é explicada pelo aparecimento de fendas na camada carbonosa formada nos vértices da seção transversal, geradas pelo processo de retração da tinta. Essas áreas de aço desprotegidas acabam por ser zonas críticas de aquecimento e promovem a falha da seção. Além disso, observou-se em alguns casos em que foi aplicada a máxima espessura seca de proteção a ocorrência do deslocamento da camada expansiva da tinta durante a queima. Nestes casos, o peso da camada de espuma carbonosa formada superava a resistência por aderência da tinta na superfície metálica, o que ocasionava a queda do material. Com isso, observaram-se zonas de aquecimento crítico nestas regiões que induziam a falha e consequente redução do tempo de resistência ao fogo.

Chen (2015) também investigou o comportamento de placas de aço protegidas com tintas intumescentes. Foram ensaiados protótipos em um forno elétrico de resistência ao fogo, com diferentes taxas de aquecimento e variando a espessura seca de proteção. Neste caso, a curva de aquecimento não seguiu a curva padrão ISO 834-1:1999, devido às limitações do forno elétrico. A aquisição dos dados foi feita por meio de dois termopares, sendo um conectado a superfície metálica e outro posicionado para aferição da temperatura do forno elétrico. Neste caso, as propriedades geométricas e mecânicas da chapa de aço foram mantidas inalteradas de

ensaio para ensaio. Com base nestas configurações, Chen (2015) constatou por meio dos resultados experimentais a caracterização do processo expansivo da tinta intumescente em quatro fases:

- 1) Fase de estabilização: pouca variação na amostra e os parâmetros permanecem constantes. A temperatura do forno nesta fase varia de 20°C a 200°C.
- 2) Fase de expansão com formação da camada espumífera: a camada carbonosa é formada por meio da reação química do agente ácido e o composto polimérico da tinta, liberando gases. A temperatura nesta fase varia entre 200°C a 500°C.
- 3) Fase de carbonização e consumo de matéria: atuando nas faixas de temperatura de 500°C a 700°C, esta fase é caracterizada pela expansão completa do revestimento, apresentando coloração escura provocada pela carbonização do material.
- 4) Fase de formação da camada inorgânica inerte: após os 700°C, há a oxidação da camada carbonosa, formando óxido de cálcio. Isso faz com que a coloração escura do material apresente manchas ligeiramente esbranquiçadas. Nesta fase, o revestimento já oxidado pouco contribui para resistência ao fogo do elemento metálico.

Observou-se que na fase de expansão da camada intumescente, há uma diminuição brusca na transferência de calor do ambiente para a chapa metálica, que atesta o comportamento da tinta para sua funcionalidade proposta. Com a variação da espessura seca aplicada, pode-se observar uma diminuição das temperaturas médias de ativação de cada fase citada acima para amostras que foram pintadas com espessuras secas maiores. Por fim, o autor concluiu que o excesso de camada inerte da última etapa pode ser prejudicial ao comportamento do perfil protegido, visto que essa camada não confere resistência ao fogo. Da mesma forma, a observar a diminuição do fluxo de calor do ambiente para a chapa, Chen (2015) concluiu que a tinta intumescente é capaz de proteger efetivamente a chapa de aço.

Na mesma linha de pesquisa, Lucherini (2022) realizou uma investigação experimental voltada para avaliação do desempenho de tintas intumescentes em chapas de aço submetidas a um forno a gás de resistência ao fogo e um conjunto de painéis térmicos que promovem o aquecimento por radiação, utilizando o sistema de indução de taxa de transferência de calor (H-TRIS). Como resultado, a autora observou o comportamento distinto do processo expansivo para as duas

formas de aquecimento, uma vez que o teste utilizando o H-TRIS impõe condições térmicas bem definidas e estáveis na superfície protegida, enquanto no ensaio utilizando o forno a gás tem-se maior variabilidade dos efeitos de convecção e radiação no interior do forno, tornando complexo o comportamento e a homogeneidade da camada espumífera. Além disso, observou-se nos ensaios no forno a gás a ocorrência de deslocamentos parciais e totais da tinta oriundos do processo de expansão da camada carbonosa. Semelhante a análise feita por Mesquita (2015), a autora concluiu que esse deslocamento dá origem a pontos críticos de aquecimento localizados nas chapas. Outro fator preponderante para o comportamento distinto utilizando as duas metodologias diz respeito à quantidade de oxigênio disponível, como pode ser visto na Figura 2-5. Nos ensaios utilizando o H-TRIS, o processo oxidativo observado na última fase de atuação da tinta se dá completamente devido a disponibilidade de oxigênio abundante no local do ensaio. Enquanto isso, no ensaio em forno a gás, em que a amostra é condicionada em um ambiente isolado, o processo oxidativo possui limitações de oxigênio disponível e por isso ocorre em menor escala. Desta forma, pode-se observar como a taxa de aquecimento e os métodos de transferência de calor impactam no comportamento do processo expansivo da tinta intumescente.

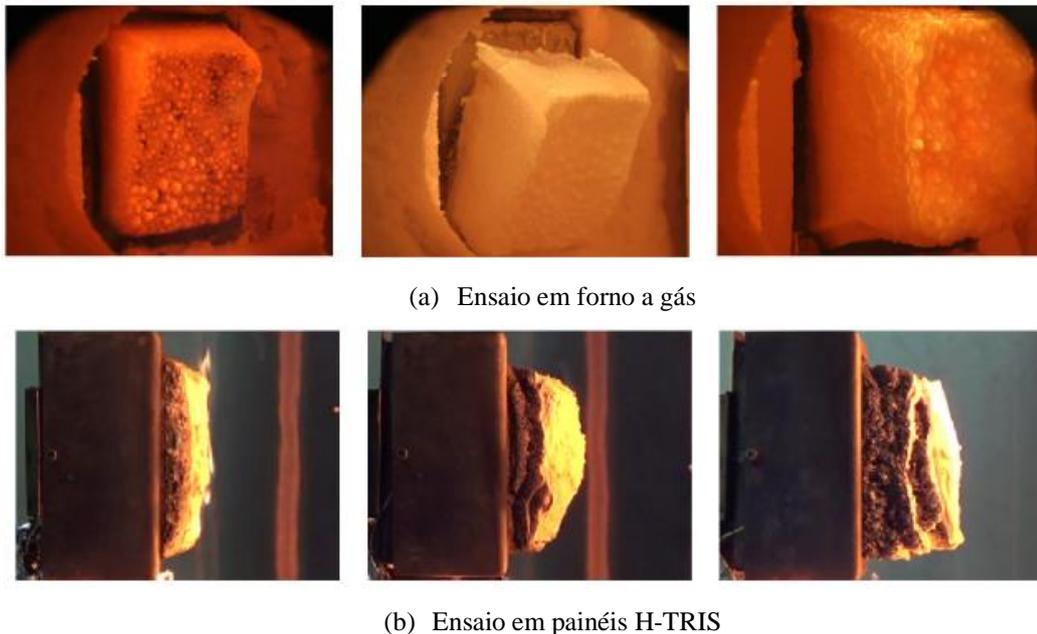


Figura 2-5 - Comparação do processo expansivo pelos dois métodos realizado.
Fonte: Lucherini (2022).

Zhang (2012) focou seus estudos na avaliação do desempenho de placas de aço revestidas com tintas intumescentes de base solvente sob altas temperaturas, ensaiadas em calorímetro de cone. Nesse conjunto de experimentos, foram utilizadas vinte amostras de placas de aço protegidas e

foi avaliado o fluxo de calor na expansão da camada carbonosa e o efeito da transferência de calor da espuma para a chapa de aço. A partir dos experimentos, foi encontrada uma equação matemática que relaciona a taxa local de expansão volumétrica da tinta com a perda de massa e a variação de temperatura. Os resultados mostraram, como encontrado por Mesquita (2015) Krisnamoorthy (2011), que o comportamento do material pode ser dividido em quatro etapas: fase de estabilização, fase de expansão da espuma, fase de consumo de material carbonífero e fase de camada inorgânica final. O experimento, utilizando o calorímetro de cone, obteve resultados precisos no que diz respeito ao grau de espumificação da tinta e do tempo de resistência ao fogo. Observou-se então que na fase de formação da espuma, a taxa de absorção de calor pela chapa de aço reduziu significativamente e a fase final, de formação do material residual inorgânico teve pouco efeito na proteção contra o incêndio.

No que diz respeito a perfis estruturais, Song (2018) realizou ensaios com pilares tubulares de aço preenchidos com concreto, submetidos a um carregamento axial excêntrico, com e sem proteção intumescente. As amostras foram submetidas à curva de incêndio padrão por até 180 minutos. Para análise dos efeitos térmicos, variou-se a seção geométrica dos pilares e a espessura seca de proteção aplicada nas amostras. Diante dos resultados, o autor analisou o domínio da distribuição das temperaturas no perfil e o tempo de resistência ao fogo de cada composição. Em uma análise de pilares tubulares mistos de aço e concreto em situação de incêndio, o aço sem proteção atinge altas temperaturas tão rapidamente que sua contribuição na resistência mecânica se torna desprezível devido a minoração da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade impostos pelo aquecimento do aço. Este estudo desenvolvido por Song (2018) teve como objetivo reduzir a temperatura média da seção metálica utilizando a tinta intumescente como barreira térmica, avaliando diferentes espessuras de revestimento intumescente e níveis de carga de compressão aplicados. Além disso, o autor desenvolveu um modelo de elementos finitos para análise dos processos de transferência de calor nos protótipos e para determinação da capacidade de resistência ao fogo dos pilares. A modelagem numérica foi validada com base nos resultados experimentais obtidos.

As conclusões obtidas por Song (2018) indicam que os pilares protegidos com espessuras secas inferiores a 3,36 milímetros apresentaram condições satisfatórias de resistência ao fogo de 180 minutos, com deformações abaixo das deformações admissíveis. Observou-se também o aquecimento da superfície metálica na fase final dos ensaios, o que complementa o que foi exposto pelos resultados dos autores citados anteriormente, de que a camada carbonosa residual

pouco interfere na resistência ao fogo. Contudo, diferentemente dos autores expostos anteriormente, a tinta intumescente utilizada por Song (2018) não apresentou deslocamento. Apenas com algumas pequenas trincas distribuídas aleatoriamente no comprimento, o revestimento permaneceu em bom estado por toda a extensão do perfil ensaiado. Com isso, estes pontos não se caracterizavam como ponto crítico de aquecimento localizado, como em outros casos.

Feita a modelagem dos pilares tubulares mistos de aço e concreto com base na temperatura da superfície do aço medida nos ensaios, pode-se obter um método para calcular a espessura seca otimizada para a proteção intumescente. Os resultados indicaram que o desempenho dos perfis utilizando a determinação da espessura seca de proteção pelos métodos de cálculo simplificados são mais conservadores do que o obtido pela formulação implementada por Song (2018). No entanto, o autor certificou-se de ser necessário o desenvolvimento de mais estudos para elaboração de um método de cálculo mais racional e econômico para espessuras secas de pilares mistos protegidos.

Nessa linha de raciocínio, Gillet (2019) desenvolveu um estudo focado na criação de um modelo de cálculo para prever o comportamento das tintas intumescentes, relacionando a espessura seca com os requisitos mínimos de segurança contra incêndio. Dito isso, destaca-se da pesquisa de Gillet a importância do conhecimento das propriedades térmicas das tintas intumescentes e suas fases de atuação para que seja assim possível desenvolver uma ferramenta numérica representativa do comportamento das tintas intumescentes, com ênfase no seu efeito expansivo e na transferência de calor na interface da superfície metálica protegida. Este modelo numérico criado foi baseado na descrição do comportamento reativo da tinta, calculando o desenvolvimento da camada carbonosa e transferência de calor na interface dos materiais. Os resultados dos testes numéricos foram confrontados com resultados experimentais dos elementos protegidos submetidos a exposição de temperatura em um forno solar. Diferente dos fornos convencionais, este forno utiliza a radiação solar para induzir o aquecimento localizado no elemento por meio de refletores convexos, que concentram a radiação no ponto de estudo. Considerando essas variáveis, os resultados numéricos obtidos apresentaram concordâncias com os resultados experimentais, comprovando a eficiência da ferramenta preditiva desenvolvida.

2.3.2 Aquecimento Localizado

Outro efeito físico importante de ser caracterizado para compreensão do comportamento das tintas intumescentes é a ocorrência do aquecimento localizado nos elementos estruturais. Durante o início de um incêndio, pode-se ter a atuação localizada do fogo na região limítrofe do ponto onde se deu a ignição do incêndio. Considerando a faixa de temperatura média de ativação das tintas intumescentes próximas aos 180°C a 200°C, pode-se ter o início da reação de intumescência nesses pontos localizados. Ao observar esse efeito, diversos pesquisadores buscaram entender melhor como ocorrem os processos de transferência de calor, espumificação e da variação da condutividade térmica dos revestimentos intumescentes por meio de ensaios em que a atuação da chama ocorre de maneira localizada nas amostras.

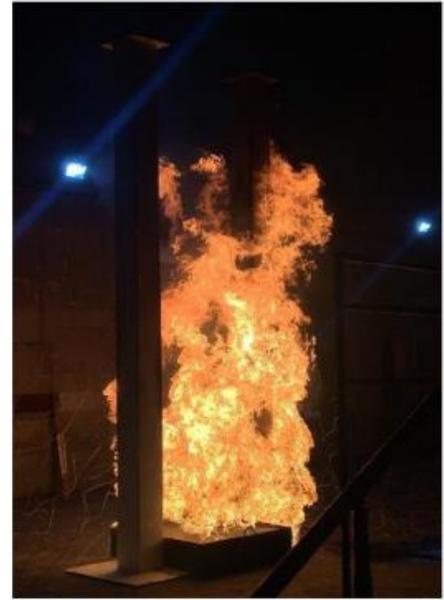
Nøøgaard (2013) investigou a resistência e o processo expansivo da camada carbonosa de tinta intumescente quando submetida a taxas de temperatura severas. Frequentemente, o dimensionamento de tintas intumescentes leva em conta a ocorrência de incêndios celulósicos, caracterizados por uma curva de aquecimento mais lenta. Nos casos em que a pintura pode sofrer danos mecânicos ou haver a concentração de carga de incêndio, o perfil de aço pode sofrer com o aquecimento extremamente rápido. Para simular essa condição, o autor utilizou oito perfis curtos protegidos com diferentes configurações de espessura seca de tinta à base de solvente aquecida em um forno mufla normal. Por meio desses ensaios, foram avaliados os parâmetros de resistência mecânica da tinta, o grau de expansão volumétrica e a fração mássica residual resultante. Como resultado, o autor observou que o aquecimento rápido faz com que a resistência mecânica à compressão da camada carbonizada não se relaciona de maneira significativa com o fator de expansão da tinta. Nos lados protegidos que possuíam face exposta à fonte geradora de calor, a resistência mecânica da camada carbonosa formada apresentou maior resistência mecânica à compressão. Como conclusão, o autor ressaltou a importância de se avaliar possíveis danos mecânicos que podem ocorrer na tinta durante o incêndio, sendo estes pontos responsáveis por deflagrar um ponto crítico de aquecimento localizado.

Xu *et al* (2021) estudaram experimentalmente o comportamento de revestimentos intumescentes de base aquosa e a base de solventes expostos a incêndios localizados. Para tal, foi adotado a metodologia de experimento para perfis metálicos verticais e horizontais, com espessuras variáveis aplicadas na face do substrato metálico, conforme a Figura 2-6. Para este

ensaio, foram submetidos a temperaturas de até 800°C, gerados por uma fonte de calor (tipo poolfire) localizada situada a cinquenta centímetros das amostras.



(a) Viga submetida ao incêndio localizado



(b) Coluna submetida ao incêndio
localizado

Figura 2-6 - Ensaio de elementos metálicos submetidos ao incêndio localizado realizados.
Fonte: Xu *et al* (2021).

Para análise numérica, considerou-se a segmentação do elemento de aço ensaiado em várias partes ao longo do comprimento, sendo a estimativa da temperatura de cada faixa segmentada calculada com base na equação de massa concentrada. A temperatura de cada elemento é considerada uniforme e a condutividade térmica da tinta intumescente é estimada com base no modelo de três estágios, criado por Han *et al* (2019). Desconsidera-se neste caso a condução de calor entre diferentes segmentos. Os resultados obtidos mostraram uma concordância dos valores medidos experimentalmente e os valores obtidos via método de cálculo, com similaridades na distribuição da temperatura ao longo do comprimento dos perfis de aço.

A depender da fonte emissora de calor, observaram-se pontos localizados no perfil que não apresentaram expansão volumétrica completa, principalmente nas arestas e bordas do perfil. No entanto, a taxa de expansão obedeceu aos valores obtidos para a situação de incêndio generalizado. Como conclusão, os autores obtiveram que as condutividades térmicas do material intumescente também podem ser utilizadas para casos de cargas de incêndio localizadas, devido a convergência dos resultados experimentais.

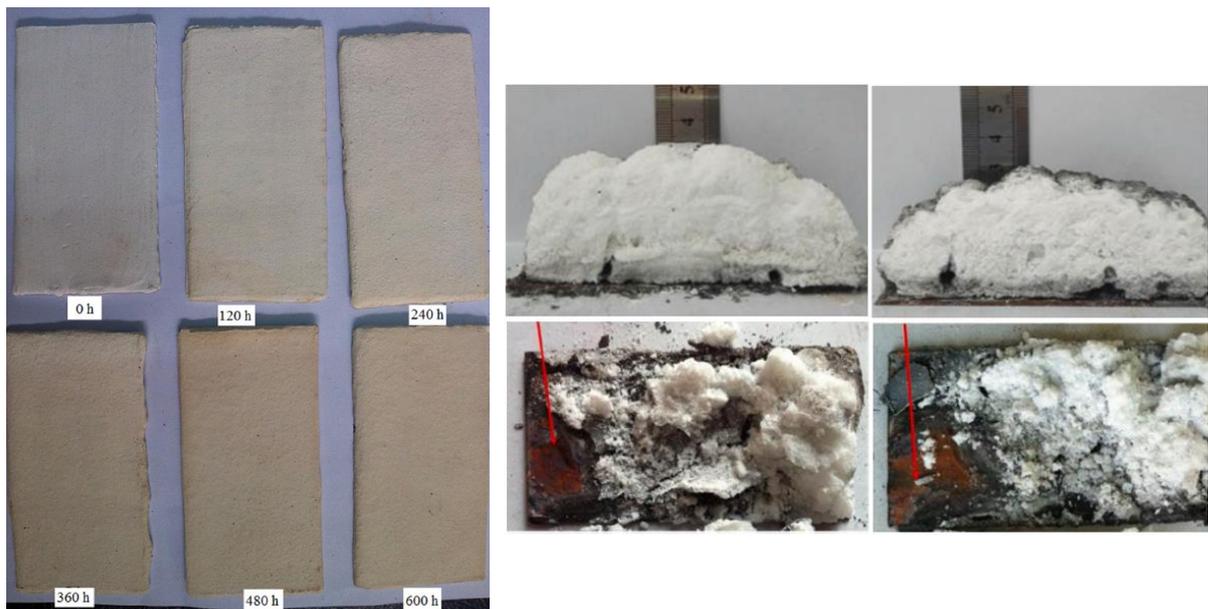
Outro estudo relevante focado no desenvolvimento do aquecimento localizado foi feito por Chun (2020). O autor elaborou um estudo detalhado do comportamento ao fogo de pilares metálicos revestidos com tinta intumescente, com falhas na pintura, para analisar a influência do dano localizado na resistência ao fogo dos elementos estruturais. Para essa análise, os perfis foram submetidos a curva de incêndio padrão ISO834-1:1999. Utilizando uma modelagem numérica em elementos finitos desenvolvida no *software* Abaqus, calculou-se a resistência à flambagem de colunas com danos parciais na superfície pintada. Nessa análise paramétrica, foi considerada a influência da esbeltez da seção metálica para as diferentes taxas de carregamento. Verificou-se, portanto, curvas de aquecimento e absorção de calor não uniformes induzidos pelos pontos danificados, reduzindo consideravelmente a resistência ao fogo das colunas de aço. Foram obtidos resultados significativos referentes a degradação das propriedades nos casos em que as taxas de carregamento aplicado foram superiores a 0,7 e onde o dano na superfície protegida era localizado na parte superior da coluna.

2.3.3 Efeito do Intemperismo

A vida útil das tintas intumescentes é um fator relevante quando se projeta a utilização deste tipo de material de proteção. Aliado à boa resistência mecânica para resistir a possíveis impactos ao longo da sua vida útil, a tinta intumescente deve ser capaz de resistir aos efeitos de intemperismo que podem vir a ocorrer com o tempo. Quando se têm perfis metálicos de fachada protegidos com tintas intumescentes, a radiação solar, a umidade e o vento podem degradar o material, fazendo com que percam suas propriedades de resistência ao fogo. Portanto, torna-se necessária a compreensão dos efeitos de intemperismo para saber prever o período entre as possíveis manutenções, bem como as condições mínimas para que a tinta tenha um comportamento satisfatório.

Wang et al (2020) estudaram o processo de envelhecimento por intemperismo acelerado das tintas intumescentes, investigando os processos químicos e físicos que ocorreram no material quando submetidos a raios ultravioletas e diferentes condições de umidade. Para isso, utilizaram-se chapas protegidas submetidas a diferentes tempos de envelhecimento, ilustradas pela Figura 2-7. Após o tempo determinado para cada amostra ensaiada, as chapas metálicas protegidas foram submetidas a taxa de aquecimento de 10°C/minuto. Como resultado do ensaio, o autor constatou que a superfície da tinta se mostrou áspera e fragilizada, com o tempo de resistência ao fogo reduzido consideravelmente. Isso se deu devido à oxidação, decomposição

e reações de hidrólise dos principais componentes da tinta pela ação do intemperismo. Por meio de um modelo numérico parametrizado em função da expansão do intumescente e da distribuição de poros na superfície do material esponjoso, foi traçada uma dependência linear entre o ângulo de contato da superfície do revestimento e a razão de envelhecimento. Com isso, pode-se determinar a taxa de envelhecimento da tinta para compreender o comportamento do material ao longo de sua vida útil e assim prever medidas de manutenção e reparo caso sejam necessárias.



(a) Amostras antes do ensaio

(b) Amostras após a exposição ao fogo

Figura 2-7 - Amostras utilizadas para ensaio de intemperismo.

Fonte: Wang (2020).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Beraldo et al (2020) analisaram o efeito da radiação solar como efeito de degradação ao longo da vida útil das tintas intumescentes de base solvente. Devido ao fato de existirem diversos casos de aplicação de intumescentes em elementos estruturais que estão expostos a essa intempérie, a pesquisa ensaiou substratos metálicos revestidos com diferentes espessuras secas de tinta intumescente e submetidos à ação do fogo, espectroscopia, análise termogravimétrica, micro calorimetria de combustão e análise visual. Para avaliação do comportamento da camada carbonosa formada após o envelhecimento, foram utilizadas microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura para comparação com o processo expansivo em elementos que não foram submetidos ao processo de envelhecimento. Feito isso, com os resultados dos testes foi possível verificar a degradação nos componentes resinosos e a diminuição da proteção ao fogo diante do envelhecimento da tinta.

2.3.4 Condutividade Térmica

Para implementação numérica do comportamento das tintas intumescentes, tem-se a condutividade térmica como principal variável a ser determinada em função do aumento da temperatura. Essa propriedade física é utilizada como simplificação para representar os mecanismos de transferência de calor entre o ambiente incendiado e o perfil metálico protegido, pois descreve a capacidade de um material transmitir calor. Quanto maior a condutividade térmica de um material, mais eficaz ele é na condução do calor. Esta propriedade desempenha um papel crítico na determinação da taxa de transferência de calor através de um material ou entre diferentes materiais em contato térmico.

Com base nas diferentes composições químicas de materiais intumescentes disponíveis no mercado, diversos autores executaram rotinas experimentais visando correlacionar o desempenho das tintas com a condutividade térmica em função da taxa de aquecimento e do substrato metálico protegido. Essas formulações têm como base os principais métodos de composição de massa, transferência de calor e conservação de energia descritos por Cagliostro *et al* (1975).

Para simplificação das metodologias utilizando revestimentos intumescentes, a obtenção da condutividade térmica das tintas geralmente despreza o efeito de espumificação das tintas, que devido a sua complexidade precisa ser modelada com um pouco mais de sensibilidade. Apesar de não retratarem com total realismo o comportamento da tinta, essas formulações matemáticas unidimensionais para avaliação do fluxo de calor desenvolvidas têm se mostrado satisfatórias para a simulação dos efeitos térmicos.

Um método importante utilizado para o dimensionamento de elementos estruturais metálicos protegidos com materiais de proteção passiva é extraído da EN 1993-1-2:2010. Esse modelo é baseado na aproximação da transferência de calor por uma equação de condução de calor transiente, com condições não-homogêneas. Essas simplificações, portanto, limitam o uso do equacionamento para materiais não reagentes. No caso das tintas intumescentes, a aproximação é feita com o material expandido por uma massa térmica, temperatura do gás de incêndio e temperatura do aço protegido. Esse modelo trata a pintura intumescente como não reativo, desconsiderando as mudanças na espessura do revestimento ao longo do tempo e as variações nas propriedades físico-químicas, tal que o comportamento depende apenas da relação entre a temperatura e taxa de aquecimento.

Para obtenção da condutividade térmica pela norma europeia, deve-se considerar a temperatura média do incêndio e a temperatura média do substrato metálico, ambos possíveis de serem medidos em ensaios experimentais. A equação proposta para a variação da temperatura no aço de um perfil protegido material de proteção passiva com variação de espessura é dada por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a \left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (2-7)$$

Esta equação é sugerida pelo EN13381-8:2007 como um método simplificado. Com isso, rearranjando a equação acima, pode-se obter a condutividade térmica da tinta variando ao longo do tempo e da temperatura, $\lambda_{p,t}$, conforme abaixo:

$$\lambda_{p,t} = \left[d_p \frac{V}{A_p} c_a \rho_a \left(1 + \frac{\phi}{3}\right) \frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] [\Delta\theta_{a,t} + (e^{\phi/3} - 1) \Delta\theta_g] \quad (2-8)$$

Em que ϕ , definido como o fluxo de calor armazenado na camada intumescente, deve ser calculado como:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \left(\frac{A_p}{V}\right) d_p \quad (2-9)$$

As variáveis utilizadas nestas equações são descritas por:

λ_p = condutividade térmica da tinta intumescente;

A_p/V = fator de massividade do perfil de aço;

d_p = espessura de tinta intumescente aplicada;

c_a = calor específico do aço;

ρ_a = peso específico do aço;

$\theta_{g,t}$ = temperatura ambiente dos gases no instante de tempo t;

$\theta_{a,t}$ = temperatura do perfil de aço no instante de tempo t;

Δ_t = intervalo de tempo considerado entre as medições;

Devido as simplificações impostas pelo método europeu previsto na EN 1993-1-2:2010, o comportamento da tinta intumescente não é descrito em sua realidade. Com base nisso, alguns autores baseados em seus ensaios experimentais, desenvolveram equações para calcular a condutividade térmica da tinta intumescente.

Dai (2009) utilizou este equacionamento previsto na norma europeia, realizando algumas adaptações para a consideração do material intumescente. Inicialmente, foram aferidas as temperaturas da seção metálica totalmente protegida e a condutividade térmica foi calculada com base na equação (2-8). Considerando que a temperatura da camada intumescente pode ser estimada por $\theta_p = (\theta_g + \theta_a)/2$, é possível transformar os valores de $\lambda_{p,t}$ para λ_p . O valor médio de λ_p pode ser estimado com base nos resultados dos demais ensaios de vigas e colunas realizados. Utilizando este valor médio, pode-se substituir na equação (2-7) e determinar os valores de temperatura na superfície protegida. Em seu trabalho, Dai (2009) avaliou a condutividade térmica de dez amostras protegidas com tintas intumescentes. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 2-8.

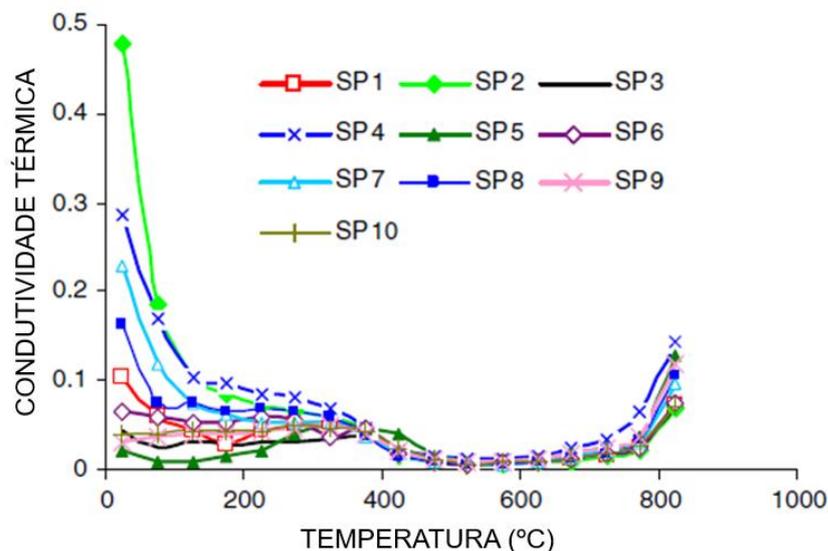


Figura 2-8 - Condutividade térmica versus temperatura.
Fonte: Dai (2009).

Krisnamoorthy (2011) executou um estudo voltado para a análise de revestimentos intumescentes parcial ou totalmente danificados aplicados a estruturas metálicas em altas temperaturas. Durante sua investigação, a autora constatou a pouca sensibilidade da condutividade térmica relacionada à densidade e a emissividade da tinta em altas temperaturas, enquanto alterações na composição da espessura seca de intumescente aplicado refletiam

significativamente na condutividade térmica. Essas observações foram possíveis a partir do equacionamento desenvolvido para a condutividade térmica média calculada de cada amostra ensaiada individualmente. A autora segmentou as curvas para 20°C a 350°C e de 350°C a 800°C. Entende-se que acima dos 800°C, toda a massa do material de proteção tenha sido consumida, portanto, a condutividade térmica nesse intervalo não é relevante. As equações elaboradas por Krisnamoorthy (2011) para materiais intumescentes com propriedades físicas semelhantes ao que foi utilizado nos seus respectivos experimentos estão descritas abaixo. Para cada intervalo de temperatura da camada intumescente (θ_p), definiu-se uma equação para cálculo da condutividade térmica da tinta.

Para 20°C < θ_p < 350°C:

$$\lambda_p = -2 \times 10^{-8} \theta_p^3 + 1 \times 10^{-5} \theta_p^2 - 0,0029 \theta_p + 0,2759 \quad (2-10)$$

Para 350°C < θ_p < 800°C:

$$\lambda_p = 3 \times 10^{-10} \theta_p^3 + 5 \times 10^{-8} \theta_p^2 - 0,0004 \theta_p + 0,152$$

Comparativamente, utilizando as duas propostas de cálculo da condutividade térmica desenvolvidas por Dai (2009) e por Krisnamoorthy (2011), o seguinte gráfico da evolução da condutividade térmica com a temperatura foi obtido e é ilustrado pela Figura 2-9.

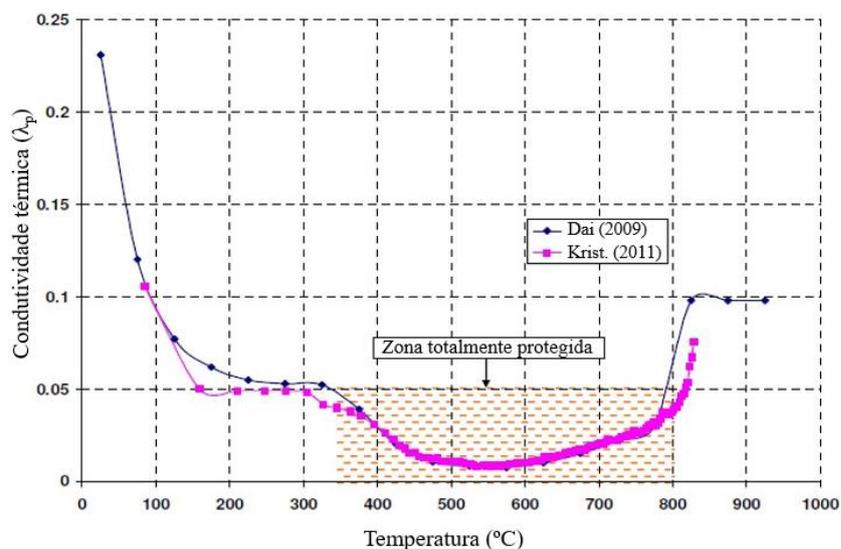


Figura 2-9 - Condutividade térmica calculada por Dai (2009) e Krisnamoorthy (2011)
Fonte: Krisnamoorthy (2011).

As curvas representadas graficamente mostram claramente que a condutividade térmica cai bruscamente durante a fase inicial do aquecimento, uma vez que sofre a transformação do seu

estado virgem para o início da carbonização. O gráfico ainda ilustra o início da atuação da tinta intumescente, que começou a proteger o aço entre as temperaturas de 200°C a 350°C. A proteção mais eficaz foi encontrada no intervalo entre 400°C a 800°C, onde a condutividade média era cerca de 0,01 W/m³K. Após 850°C, o aumento na condutividade térmica pode estar associado à perda de massa da tinta, que foi toda consumida nas reações de carbonização durante o aquecimento. A partir dessa fase, não é considerado que o material intumescente fornece proteção ao fogo para o aço.

Mesquita (2015) realiza outra abordagem das prescrições normativas europeias citadas acima. Com base no Anexo E da norma europeia EN13381-8:2010, onde se tem definido o método da condutividade térmica efetiva, o autor classifica inicialmente o material de proteção quanto ao seu desempenho. Ou seja, caso possua capacidade térmica inferior a metade da capacidade térmica do aço, o material pode ser classificado como leve e assim assumir que o fluxo de calor na camada de proteção é zero. Com isso, a temperatura do aço pode ser descrita por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{V d_p c_a \rho_a} \Delta t \quad (2-11)$$

A condutividade térmica variável em função do tempo é definida pela inversão da equação (2-11), resultando na equação:

$$\lambda_{p,t} = \frac{d_p V}{A_p} \frac{c_a \rho_a}{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t} \Delta\theta_{a,t} \quad (2-12)$$

A variação da condutividade térmica pode ser transformada em variação da temperatura assumindo que a temperatura do material de proteção é definida por:

$$\theta_{p,t} = \frac{\left[\frac{(\theta_{t-1} - \theta_t)}{2} + \frac{(\theta_{a,t-1} - \theta_{a,t})}{2} \right]}{2} \quad (2-13)$$

Dessa forma, conhecendo a condutividade térmica do material de proteção intumescente, pode-se adaptar um ábaco que relaciona a espessura seca de proteção com as temperaturas críticas e o tempo de resistência ao fogo, conforme a Figura 2-10.

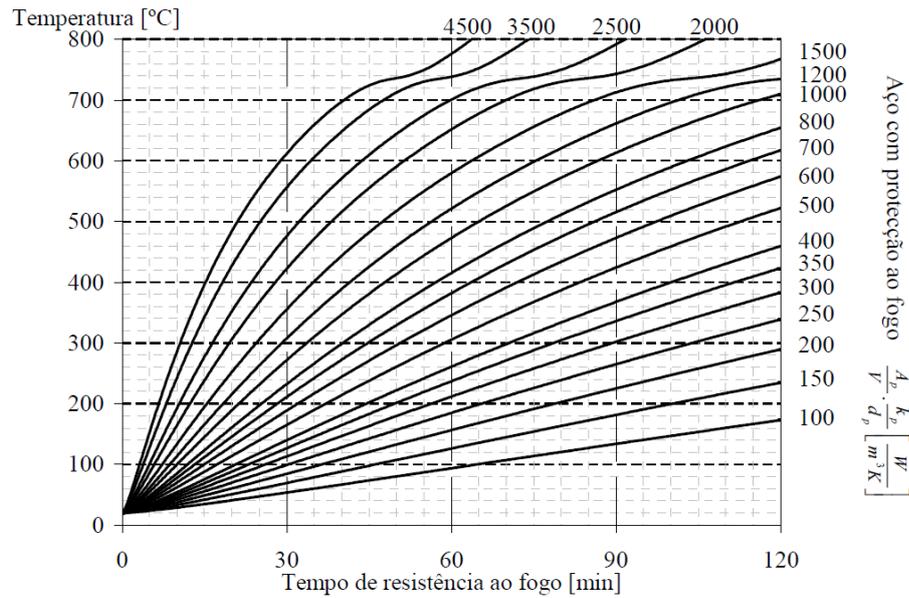


Figura 2-10 – Ábaco de verificação da resistência ao fogo.

Fonte: Anexo E – EN13381-8:2010.

Billota (2016) utilizou as mesmas formulações exemplificadas por Mesquita (2015) e pela EN13381-8:2010 para executar testes em um edifício construído estruturas de aço na década de 80, protegidas com tintas intumescentes. O autor tinha como objetivo avaliar o grau de desempenho das tintas após as ações de intemperismo que o afetaram ao longo da vida útil da edificação. Após análise experimental e numérica, concluiu-se que seria necessário proteger novamente os elementos estruturais. Os resultados experimentais apresentaram comportamentos satisfatórios e coerentes com as formulações impostas pelo Anexo E da EN13381-8:2010. Além disso, Bilotta (2016) concluiu que perfis com maiores fatores de massividade geralmente resultavam em um aumento mais rápido da temperatura do aço, sendo assim, necessitando de maior proteção intumescente. Utilizando o equacionamento previsto em (2-11) e (2-12), o autor construiu os gráficos de variação da condutividade térmica em detrimento do avanço da temperatura, conforme a Figura 2-11.

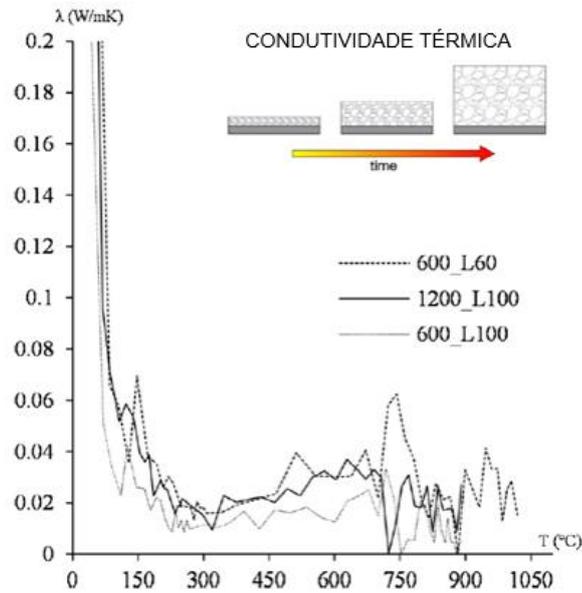


Figura 2-11 - Condutividade térmica versus temperatura.
Fonte: Bilotta (2016).

As formulações desenvolvidas nesta revisão da literatura servirão de base para o cálculo da condutividade térmica da tinta intumescente utilizada no roteiro experimental deste trabalho. Dado a metodologia implementada pelos autores Dai (2009), Krisnamoorthy (2011) e Mesquita (2015), será feita a comparação da condutividade térmica obtida para os ensaios realizados e comparado com os valores desenvolvidos segundo os autores citados.

2.4 Dimensionamento de Vigas de Aço em Temperatura Ambiente

Um dos principais elementos estruturais de uma edificação em aço, as vigas metálicas são comumente empregadas para suporte de sistemas de piso, coberturas e forros. Submetidas a ação de cargas verticais e/ou horizontais em uma estrutura, as vigas são responsáveis por fazer a transferência dos esforços para os demais elementos de suporte da estrutura. Constituídas por ligas de aço com boas propriedades mecânicas de resistência e durabilidade, este tipo de elemento é frequentemente empregado para vencer grandes vãos devido a sua característica de esbeltez aliada a uma relação peso da estrutura por metro linear otimizada, comparada com outros métodos construtivos. Com diferentes seções transversais disponíveis no mercado, a escolha do perfil pode levar em consideração até mesmo aspectos estéticos, muitas vezes requerido pelos projetos de arquitetura. Quanto ao seu comportamento estrutural, as vigas metálicas de piso são utilizadas geralmente na configuração biapoiada, transmitindo apenas esforços cortantes. No caso de vigas de cobertura de galpões, muitas vezes utilizam-se as vigas

engastadas, para garantir maior estabilidade ao pórtico, formado por vigas e pilares. Neste caso, há transmissão de esforço cortante, momento fletor e axial.

Para compreender o comportamento das vigas protegidas utilizadas nos ensaios de vigas em situação de incêndio natural propostos para este trabalho, devem-se avaliar os estados limites últimos possíveis e os modos de flambagem aos quais as vigas de diferentes seções transversais estão submetidas, segundo as principais prescrições normativas. Para tal, será feita uma transcrição comparativa dos métodos utilizados pela norma brasileira de elementos de aço, ABNT NBR 8800:2008, a norma americana ANSI/AISC 360:2016 e a norma europeia EN 1993-1-1:2004, ambas para o dimensionamento à temperatura ambiente.

Segundo Fakury *et al* (2016), quando um elemento estrutural está submetido a um carregamento de flexão decorrente de ações estáticas, o colapso pode ocorrer devido a plastificação total da seção transversal, por flambagem lateral com torção ou pela flambagem local dos elementos que compõe aquela seção (almas e mesas) na região comprimida. Na consideração do esforço cortante, o colapso da viga se dá por escoamento ou pela flambagem ou ruptura dos elementos da seção transversal. Considerando as seções I laminadas e tubulares quadrada utilizadas nos ensaios, tem-se os seguintes estados limites aplicáveis, causados por tensões normais e de cisalhamento:

- Flambagem lateral com torção (FLT);
- Flambagem local da mesa comprimida (FLM);
- Flambagem local das almas (FLA);
- Colapso sob força cortante

Além dos estados limites últimos citados, as vigas devem ser dimensionadas para o atendimento aos estados limites de serviço que dizem respeito a flecha e a vibração. Deste modo, no dimensionamento de barras submetidas a momento fletor e força cortante, devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (2-14)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (2-15)$$

Quando uma barra está submetida a momento fletor em relação ao eixo de maior inércia, torna-se possível a ocorrência de instabilidades laterais na barra, conforme Araújo *et al* (2016). Aliado ao deslocamento vertical provocado pelo carregamento de flexão, surge um deslocamento lateral e uma torção. Este fenômeno caracteriza a flambagem lateral com torção (FLT). Para este estado limite último possível, analisa-se os parâmetros de esbeltez da barra (λ), o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (λ_p), e o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r). Pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, para cada intervalo em que se encontra o índice de esbeltez da barra analisada, tem-se a determinação dos momentos fletores resistente nominal (M_{Rk}), do momento fletor correspondente ao início do escoamento (M_r) e do momento de plastificação (M_p).

Para os casos em que a solicitação induz a ocorrência de instabilidades locais na barra, os estados limites últimos de flambagem local das mesas (FLM) e da alma (FLA) devem ser verificados. Nestes casos, analisa-se novamente o intervalo para novos valores do parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (λ_p), e os parâmetros de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r). Para facilitar a compreensão, as disposições normativas serão organizadas e apresentadas pela Tabela 2-4.

Tabela 2-4- Parâmetros referentes ao momento fletor
Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Tipo de perfil	Estado limites últimos	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Perfis I laminados com duplo eixo de simetria fletidos em relação ao eixo de maior inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_x$	Ver nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$\frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}}$
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_x$	$\frac{0,69E_a}{\lambda^2} W_c$	b/t	$0,38 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$0,83 \sqrt{\frac{E_a}{(f_y - \sigma_r)}}$
	FLA	$f_y W_x$	Viga de alma esbelta	h/t_w	$3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$
Perfis tubulares quadrados fletidos	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_x$ Ver nota 2	$\frac{2C_b E_a}{\lambda} \sqrt{JA_g}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13E_a}{Z_x f_y} \sqrt{JA_g}$	$\frac{2E_a}{M_r} \sqrt{JA_g}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver nota 3	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$

em relação	Ver nota 3					
ao eixo de						
maior	FLA	$f_y W_x$	-	h/t_w	$3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$
inércia						

As notas relacionadas à Tabela 2-4 são:

- 1) $M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E_a I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)}$;
- 2) A tensão residual de compressão nas mesas, σ_r , deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado;
- 3) W_{ef} é o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida (ou alma comprimida no caso de perfil U fletido em relação ao eixo de menor inércia) de largura igual a b_{ef} , substituindo o valor de σ pelo valor do f_y do aço.

Para os casos de FLM e FLA aplicáveis, o momento fletor resistente nominal é dado por:

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rk} = M_{pl} = Z_x f_y$$

Para $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (2-16)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{Rk} = M_{cr}$$

Para os casos em que FLT é um estado limite último aplicável, o momento fletor resistente nominal é dado por:

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rk} = M_{pl} = Z_x f_y$$

(2-17)

Para $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rk} = C_b \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq M_{pl}$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{Rk} = M_{cr} \leq M_{pl}$$

Em comparação com a norma americana ANSI/AISC 360:2016, nota-se que o método de dimensionamento utilizado para vigas fletidas são semelhantes. No entanto, a norma europeia possui algumas distinções no método de cálculo utilizado. O valor de cálculo do momento fletor resistente para uma seção transversal em relação ao seu eixo é determinado pelo seguinte modo segundo as prescrições europeias:

Para seções Classe 1 ou 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Para seções Classe 3:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2-18)$$

Para seções Classe 4:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Quanto ao colapso sob esforço cortante, a norma brasileira considera que a força cortante resistente nominal é dada por:

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rk} = V_{pl} = 0,60 A_w f_y$$

Para $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rk} = V_i = \frac{\lambda_p}{\lambda} V_{pl} \quad (2-19)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rk} = V_{cr} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 V_{pl}$$

Por sua vez, os parâmetros de esbeltez são calculados da seguinte forma para os diversos tipos de seção transversal.

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E_a}{f_y}} \quad (2-20)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E_a}{f_y}}$$

Similar ao que ocorre com as verificações para momento fletor, a norma brasileira converge com as prescrições normativas americanas e diverge do modelo de cálculo europeu. As divergências se dão com base na seguinte equação (2-21), que determina o valor do esforço resistente plástico à cortante pela norma europeia.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (2-21)$$

Deste modo, tem-se a metodologia necessária para a verificação de barras de aço fletidas em temperatura ambiente, seguida da breve comparação com os demais modelos de cálculo normativos, europeu e americano.

2.5 Dimensionamento de Vigas de Aço em Situação de Incêndio

2.5.1 Cálculo do Desenvolvimento da Temperatura no Aço

Para determinação da resistência de vigas metálicas em situação de incêndio, o desenvolvimento das equações descritas no item 2.4 devem ser adaptadas de acordo com o desenvolvimento da temperatura do aço. Dito isso, é de suma importância a compreensão dos efeitos de degradação das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura. Sendo assim, a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, referenciada pela EN 1993-1-2:2010, determina para a distribuição uniforme da temperatura na seção transversal que a variação da temperatura no aço em um dado intervalo de tempo seja definido por:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{u/A_g}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (2-22)$$

Para estruturas de aço pertencentes a áreas internas com revestimentos de proteção ao fogo inertes, a distribuição da temperatura na seção transversal pode ser descrita por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p(u/A_g)(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})\Delta t}{t_m c_a \rho_a} \frac{1}{1 + (\xi/4)} - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{(4/\xi) + 1} \quad (2-23)$$

No caso de estruturas de aço localizadas em áreas externas, a temperatura do aço deve ser determinada tendo em conta:

- a) O fluxo de calor por radiação proveniente do compartimento de incêndio;
- b) O fluxo de calor por radiação e o fluxo de calor por convecções provenientes das chamas que emanam das aberturas;
- c) A perda de calor por radiação e por convecção da estrutura de aço para a atmosfera ambiente;
- d) As dimensões e a localização dos elementos estruturais;

Deste modo, para verificação do domínio da temperatura das estruturas em aço, pode-se utilizar o método da temperatura crítica, fornecido pela EN 1993-1-2:2010. Neste tópico, a norma europeia determina a temperatura crítica do aço, exceto quando se considera critérios de deformação ou quando é necessário ter em conta os fenômenos de instabilidade, deve ser determinada por:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \times \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (2-24)$$

Sendo o grau de utilização, μ_0 , definido como a relação do esforço solicitante de cálculo sobre o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio.

Ao considerar a proteção passiva com revestimentos expansivos, como as tintas intumescentes, a equação que descreve o comportamento da distribuição de temperatura na seção transversal carece de uma adaptação simplificada sugerida pelo EN13381-8:2007. Essa formulação leva em consideração a temperatura média do forno e a temperatura média do substrato metálico protegido. Sendo assim, tem-se a equação (2-25).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p(u/A_g)(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})\Delta t}{t_m c_a \rho_a} \frac{1}{1 + (\phi/3)} - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1)\Delta\theta_{g,t} \quad (2-25)$$

Para o cálculo da temperatura no substrato metálico protegido por tintas intumescentes, deve-se adotar o valor de λ_p calculado com base na equação (2-8).

2.5.2 Esforços Resistentes em Situação de Incêndio

Os modelos de dimensionamento da proteção passiva a considerar o uso de tintas intumescentes são baseados no atendimento ao tempo requerido de resistência ao fogo e na temperatura crítica de falha. Isso pode ser obtido por meio de experimentos realizados com elementos de aço revestidos com tintas intumescentes em testes de forno, sujeitos a determinadas curvas de incêndio. A depender da motivação da análise, o material pode ser submetido a curvas de incêndio mais severas, como a de hidrocarbonetos, comumente empregada para aplicações industriais, por exemplo.

Quando um elemento estrutural está submetido a um carregamento mecânico e é simultaneamente sujeito a altas temperaturas, a perda de propriedades mecânicas do material devido ao aquecimento pode dar início ao colapso por instabilidade, visto que ocorre a diminuição da capacidade resistente do perfil. Dessa forma, quando há a perda de estabilidade, dado principalmente pela deformação excessiva do elemento diante do aumento da temperatura, tem-se a chamada temperatura crítica de projeto. Para garantir a integridade estrutural, a seguinte condição deve ser atendida:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (2-26)$$

Sendo:

$S_{fi,d}$ = Esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio;

$R_{fi,d}$ = Esforço resistente de cálculo do elemento estrutural para o estado limite último em situação de incêndio.

A obtenção dos esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio, segundo a ABNT NBR 14323:2013, deve ser baseada no conceito de deslocabilidade das estruturas. Para estruturas de pequena e média deslocabilidade, adota-se que o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio pode ser adotado como 70% dos esforços solicitantes considerados para o dimensionamento à temperatura ambiente. Em estruturas de grande deslocabilidade, deve-se obter os esforços solicitantes por análise global elástica não-linear, considerando os efeitos globais e locais provenientes da não linearidade geométrica dos materiais.

Para os esforços resistentes de cálculo, tem-se o seguinte equacionamento para barras submetidas a flexão, que será objeto de estudo deste trabalho nos estudos experimentais e numéricos. Inicialmente, deve-se obter os fatores de redução da resistência ao escoamento. Para seções que não estão sujeitas à flambagem local em elevadas temperaturas tem-se o $k_{y,\theta}$. Para seções sujeitas à flambagem local em temperaturas elevadas, tem-se o $k_{\sigma,\theta}$. Além disso, o módulo de elasticidade, também deve ser obtido em função do aumento da temperatura, tendo em conta o coeficiente $k_{E,\theta}$. Os parâmetros de esbeltez (λ_p e λ_r) devem ser obtidos conforme Anexo G da ABNT NBR 8800:2008 e mensurados, para situação de incêndio ($\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$):

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \lambda_p \quad (2-27)$$

$$\lambda_{r,fi} = 0,85 \lambda_r \quad (2-28)$$

Em seguida, determina-se o momento fletor resistente de cálculo em função do estado limite último. Para barras sujeitas a flambagem local, têm-se:

$$\text{Se } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \rightarrow M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl} \quad (2-29)$$

$$\text{Se } \lambda_{p,fi} \leq \lambda \leq \lambda_{r,fi} \rightarrow M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y \quad (2-30)$$

$$\text{Se } \lambda > \lambda_{r,fi} \rightarrow M_{fi,Rd} = \kappa k_{\sigma,\theta} M_y \quad (2-31)$$

Sendo:

M_{pl} = Momento de plastificação da seção transversal à temperatura ambiente;

M_y = Momento fletor correspondente ao início do escoamento à temperatura ambiente;

κ = Fator de correção em função da distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal. Adota-se $\kappa = 1,00$ para vigas com os quatro lados expostos ao fogo.

Para o estado limite último de flambagem lateral com torção, o momento fletor resistente de cálculo pode ser obtido por:

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (2-32)$$

Em que:

χ_{fi} = Fator de redução do momento fletor associado à flambagem lateral com torção, calculado com $\lambda_{0,fi}$:

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{0,85 M_{cr}}} \quad (2-33)$$

Os valores e a metodologia de cálculo descritos acima consideram o dimensionamento de elementos estruturais sem proteção passiva, sendo necessário para estes casos, avaliar o item 8.5.1.2 da norma ABNT NBR 14323:2013, que traz as disposições para o tratamento de elementos estruturais envolvidos por material de revestimento contra o fogo.

No entanto, no subitem 8.5.1.2.6 da norma tem-se o impedimento de utilização das prescrições ditas até então para o caso de revestimento de elementos estruturais com tintas intumescentes, visto que o comportamento desses materiais não possui o mesmo padrão dos revestimentos convencionais, como argamassas, placas de gesso entre outros. Neste caso, a elevação da temperatura deve ser obtida por meio dos ensaios prescritos na seção 7 da ABNT NBR 14323:2013 ou formulações das normas europeias, como previsto no item 4, de verificação da resistência ao fogo da EN 1993-1-2:2010.

Neste tópico da norma europeia, a temperatura crítica definida acima é determinada por meio de um modelo simplificado baseado na solução de uma equação diferencial de condução de calor, com condições limites não homogêneas e a utilização de hipóteses simplificadas. No caso de materiais considerados como leves, como é o caso das tintas intumescentes, existem um conjunto de equacionamentos descritos no item 4.2.4 da norma. A partir deste equacionamento, pode-se construir um ábaco que relaciona o tempo de resistência ao fogo com a temperatura para cada fator de massividade modificado em função da condutividade térmica da seção, ábaco este ilustrado pela Figura 2-10, na discussão do comportamento da condutividade térmica das tintas intumescentes.

Para utilização do ábaco ilustrado na Figura 2-10, deve-se determinar inicialmente o valor da condutividade térmica do aço protegido com o material intumescente, exibido no ábaco como curvas que variam de 4500 a 100. Por exemplo, para a curva de condutividade térmica do aço protegido de 1000, tem-se que para o tempo de resistência ao fogo de 60 minutos, representado pelo eixo das abcissas, a temperatura atuante no conjunto protegido é de aproximadamente 480°C, conforme eixo das ordenadas. No mercado, diversos fabricantes utilizam essas

informações para prescrever os valores de espessura de aplicação a serem empregados para as condições de projeto, uma vez conhecida as propriedades de condutividade térmica da tinta trabalhada.

Para segurança dos elementos estruturais sob a ação do fogo, a EN 1993-1-2:2010 prevê, para a verificação da resistência ao fogo, a utilização da curva de incêndio ISO 834-1:1999. Essa análise pode ser feita em três domínios diferentes: do tempo, da resistência e da temperatura. Em cada caso, o valor calculado, seja tempo, resistência ou temperatura, deve ser inferior ao valor requerido para cada domínio, respectivamente. Além disso, a norma EN 13381-8:2010 determina o intervalo de 350 a 700°C para temperatura crítica do elemento estrutural protegido, onde a espessura da proteção deve ser determinada de acordo com o nível de carregamento solicitante. Já a norma europeia EN 1993-1-2:2010 prevê as temperaturas limite de projeto aos quais os elementos estruturais devem ser submetidos. Para vigas em que a flambagem lateral não é um potencial modo de colapso, a temperatura limite é de 540°C para todas as categorias de edifícios exceto os da categoria E e 525°C para os edifícios da categoria E.

2.6 Considerações finais

No cenário brasileiro, a segurança dos elementos de aço sob ação do fogo é regida principalmente pelas normas ABNT NBR 14432:2001 e ABNT NBR 14323:2013. A partir dessas premissas normativas, é possível estabelecer as condições de contorno que envolvem o problema de segurança contra incêndio e verificar a situação da estrutura metálica, protegida ou sem proteção para resistir à ação do fogo. No caso da utilização da tinta intumescente na proteção passiva, como forma de retardar o efeito de degradação das propriedades térmicas do material, devem-se utilizar as prescrições normativas europeias, nomeadamente o EN 1993-1-2:2010 e o EN13381-8:2007, que dispõe de simplificações para consideração do efeito intumescente das tintas.

Ao aprofundar na temática da proteção intumescente, observa-se a necessidade de compreensão dos principais efeitos físicos que preponderam durante o seu comportamento ao fogo. Destaca-se o processo expansivo da tinta intumescente, iniciado em faixas de temperatura próximas a 180 e 250°C e fundamentais para o impedimento da absorção de calor pela superfície protegida. A influência do efeito de aquecimento localizado, que induz a formação da camada expansiva, também se mostra como um efeito de importância relevante para se trabalhar com este material, além do efeito do intemperismo, que pode ser caracterizado e entendido como as ações naturais

que ocorrem no material durante a sua vida útil. A exposição a raios ultravioletas, umidade das chuvas e o vento induzem à degradação das propriedades da tinta intumescente, carecendo de cuidados de manutenção para garantir a segurança estrutural contra o fogo.

O entendimento do comportamento dos materiais enobrece o estudo do incêndio, principalmente nas análises relacionadas ao desempenho dos materiais. Essas análises utilizam as principais interações dos materiais que compõem o ambiente com o fogo. Nisto, enquadram-se os materiais combustíveis e os materiais que compõem o próprio sistema estrutural, como o aço e os elementos empregados para proteção passiva. Além disso, este capítulo apresentou as metodologias de cálculo implementadas para cálculo de vigas de aço em temperatura ambiente e em situação de incêndio, principais objetos de estudo deste trabalho.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS USADOS NOS EXPERIMENTOS

No presente capítulo, são discutidos os ensaios empregados para caracterização das propriedades mecânicas do aço estrutural dos perfis utilizados na implementação da metodologia prescrita, juntamente com a análise cinética do processo de decomposição da tinta intumescente aplicada. Os perfis estruturais selecionados compreendem perfis laminados da série W, fabricados pela Gerdau Açominas e perfis tubulares quadrados. A terminologia para identificação destes perfis ao longo deste trabalho é: W150x13, W200x31,3 e TQ100x4,75. As dimensões e propriedades geométricas estão exibidas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1- Seções geométricas e suas propriedades

Bitola mm x kg/m	d mm	b_f mm	t_w mm	t_f mm	Área cm ²	u cm	I_x cm ⁴	I_y cm ⁴
W 150 x 13,0	148	100	4,30	4,90	16,60	67,00	635,00	82,00
W 200 x 31,3	210	134	6,40	10,20	40,30	93,00	3168,00	410,00
TQ100X4,75	100	100	4,75	4,75	18,10	400,00	273,44	273,44

A tinta intumescente utilizada foi fornecida pela empresa PCF Soluções em Engenharia, referência no segmento de projetos de segurança contra incêndio, no Brasil. A tinta fornecida é comercializada para um TRRF de até 60 minutos em casos de incêndio de materiais celulósicos. Fabricada pela empresa brasileira Skymar Tintas, a tinta intumescente utilizada possui o nome comercial de STOPTHERM600 e é amplamente comercializada no mercado da construção civil brasileiro.

Caracterizada pela cor branca, a tinta é constituída de um composto polimérico de base aquosa e durante o seu processo de queima produz dióxido de carbono, monóxido de carbono e óxido nítrico. Levemente básica, com pH em torno de 8,0 – 9,5, a tinta é classificada como não inflamável quando em seu estado líquido, antes de sua aplicação final em elementos estruturais. Baseado nas informações do fabricante da tinta ilustradas pela Tabela 3-2, considera-se que o calor específico da tinta é 1000 J/kg.K e a densidade da mistura em temperatura ambiente deve ser tomada como 1300 g/cm³. Esse valor segue as recomendações visualizadas na norma europeia EN13381-8:2010. Segundo Dai (2009), como a camada de tinta intumescente aplicada aos perfis estruturais é muito pequena, a transferência de calor pela camada intumescente será

majoritariamente por condução de calor. Dessa forma, a precisão dos valores de calor específico e densidade da tinta não afetarão a qualidade dos resultados.

Tabela 3-2 - Especificações técnicas do fabricante da tinta intumescente
Fonte: Skymar Tintas ®

Informações Técnicas da Tinta Intumescente	
Veículo	Água
Cor	Branco
Aspecto	Fosco
Sólidos por volume	70%
Densidade da mistura	1300g/cm ³
Espessura úmida	1143µm
Espessura seca	800µm
Vida útil em estoque	12 meses
Temperatura da superfície	Até 52°C
Temperatura armazenagem	Até 40°C
Umidade relativa do ar	Sem limites
Diluyente recomendado	Água
Proporção de diluição	Até 10%
Rendimento teórico	0,88m ² /lts p/ 800µm

A emissividade da tinta intumescente geralmente está entre 0,7 e 0,95. Para a tinta intumescente em seu estado virgem, considera-se a emissividade igual a 0,7. Para a camada carbonosa, a emissividade da tinta intumescente ensaiada assume valor igual a 0,9. Esses valores estão em concordância com os utilizados por Mesquita (2015), Krisnamoorthy (2011) e Dai (2009). A condutividade térmica da tinta será calculada a partir do comportamento responsivo da tinta obtido a cada ensaio executado neste trabalho.

3.1 Propriedades mecânicas e geométricas dos perfis ensaiados

Para caracterização do aço dos perfis estruturais, foram ensaiadas 4 amostras de cada tipo de aço a tração em temperatura ambiente. O ensaio de tração do aço em temperatura ambiente é um procedimento padrão utilizado para avaliar as propriedades mecânicas desse material, como resistência, ductilidade e tenacidade. Este ensaio, baseado na norma ABNT NBR ISO 6892-1:2018, consiste no posicionamento de um corpo de prova em uma máquina que aplica força gradual de tração calibrada com velocidade de tensionamento em função do módulo de elasticidade do material (de 6 N/mm².s⁻¹ a 30 N/mm².s⁻¹ para aços com módulo de elasticidade superiores a 150 GPa). Durante a aplicação da carga, são aferidos os dados de força e deslocamento do corpo de prova, que posteriormente podem ser convertidos no diagrama tensão x deformação. Os valores de deslocamento do corpo de prova foram aferidos pelo sensor da própria máquina de tração.

A definição da geometria das amostras tomou como base a norma ANSI/ASTM E8/E8M:2021, e ABNT NBR 68 sendo cada protótipo cortado a laser, conforme a Figura 3-1. Para o perfil tubular, o aço manufacturado é tipo ASTM A36, com tensão de escoamento nominal igual a 250 MPa e tensão de ruptura de 400 MPa. Para perfis laminados da série W ou H, considera-se o valor nominal do aço ASTM A572-GR.50, com tensão de escoamento igual a 345 MPa e tensão de ruptura de 450 MPa. Ambos possuem módulo de elasticidade nominal igual a 200 GPa.

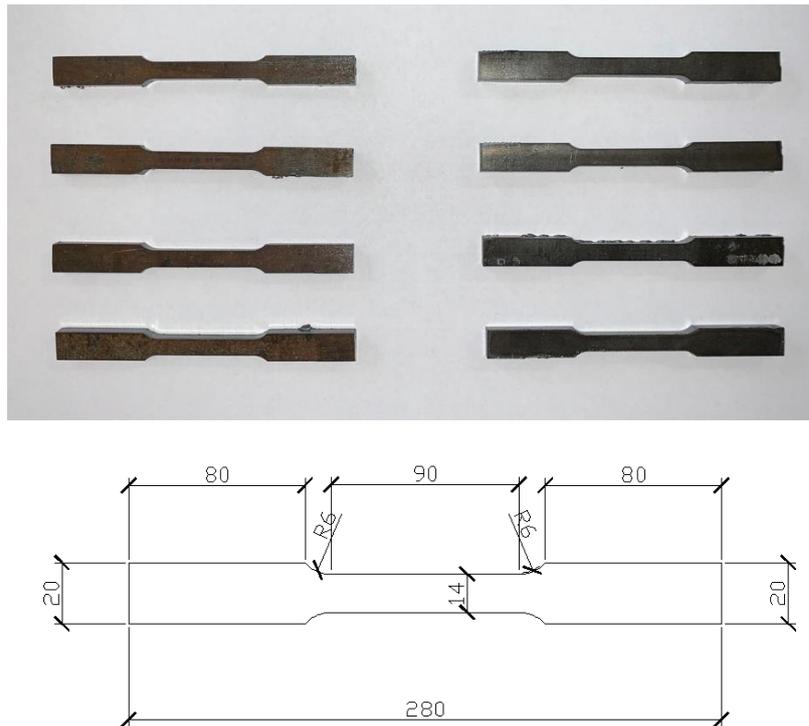


Figura 3-1- Amostras para ensaio de tração a temperatura ambiente (medidas em milímetros)

Os valores médios da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade de cada tipo de aço ensaiado estão apresentados nas tabelas Tabela 3-3 e Tabela 3-4, para o aço ASTM A572-GR.50 e ASTM A36, respectivamente. Os dados obtidos no ensaio estão ilustrados pelos gráficos ilustrados na Figura 3-2.

Nota-se que os valores encontrados apresentam pouca variabilidade por se tratar de amostras retiradas do mesmo perfil, no entanto, são muito superiores aos valores nominais de resistência ao escoamento do aço repassado pelo fabricante, sendo 250 MPa para ASTM A36 e 345MPa para aço ASTM A572-Gr.50. Observou-se também que o gráfico tensão-deformação do perfil tubular quadrado não apresentou patamar de escoamento. Isso se justifica pelo fato de o perfil ter sido conformado a frio. A Figura 3-3 mostra o equipamento utilizado para o ensaio de tração a frio e a Figura 3-4 ilustra o comportamento do perfil de ruptura das amostras após o ensaio

de tração. Pode-se observar na figura o comportamento semelhante do processo de ruptura, ocorrido na região de estrição do corpo de prova.

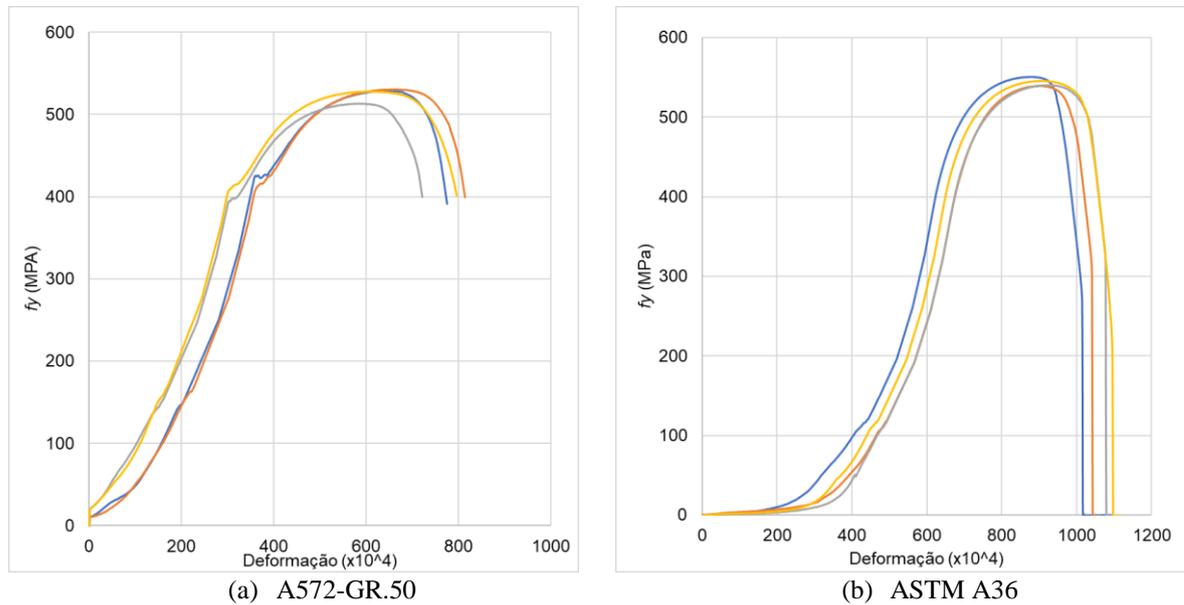


Figura 3-2 - Gráfico da resistência ao escoamento x deformação das amostras ensaiadas

Tabela 3-3- Resultados médios de resistência ao escoamento e modulo de elasticidade para aço A572-GR.50.

Amostra	Resistência ao Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
V1	424,97	181,31
V2	415,98	183,19
V3	398,18	179,20
V4	413,32	183,98
Média	413,11	181,92

Tabela 3-4- Resultados médios de resistência ao escoamento e modulo de elasticidade para aço A36.

Amostra	Resistência ao Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
V5	380,17	197,37
V6	383,78	199,13
V7	377,23	194,65
V8	375,14	192,00
Média	379,08	195,79



Figura 3-3 – Aparelho de ensaio a tração a temperatura ambiente



Figura 3-4 - Amostras após ensaio de tração e o perfil de ruptura registrado

Dada a resistência média, pode-se calcular a curva de degradação da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade em função dos coeficientes de redução fornecidos pela norma brasileira e citada no item 2.2.3. Para o aço A572-GR.50, têm-se na Figura 3-5, o gráfico com as curvas da redução da resistência ao escoamento para os casos em que há redução devido a ocorrência de flambagens locais e para os casos em que não há flambagem local.

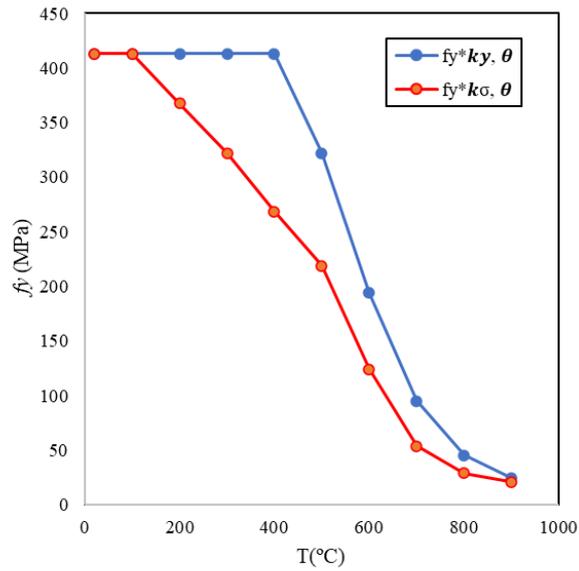


Figura 3-5 - Curvas de redução da resistência ao escoamento em função da temperatura para o aço A572-GR50.

Para o módulo de elasticidade deste mesmo aço A572-GR50, tem-se a seguinte curva de redução em função da temperatura, conforme a Figura 3-6.

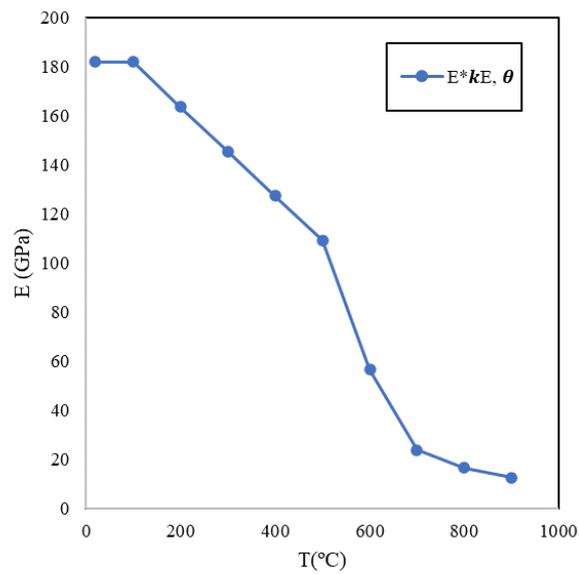


Figura 3-6 - Curvas de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço A572-GR50.

Para o aço ASTM A36, dos perfis tubulares quadrados, a redução da resistência ao escoamento está representada pela Figura 3-7.

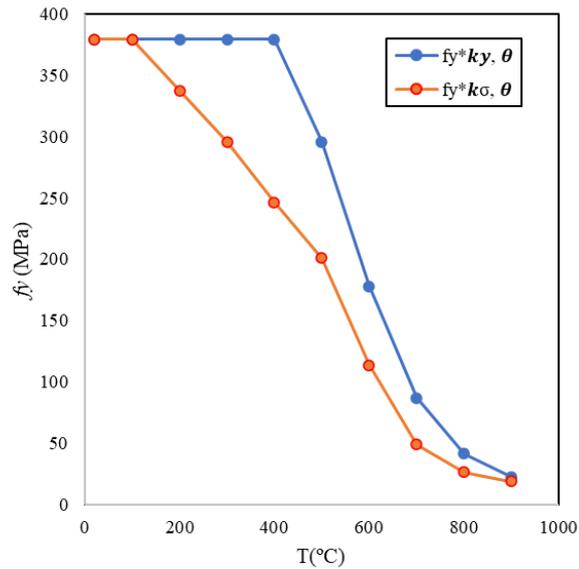


Figura 3-7 - Curvas de redução da resistência ao escoamento em função da temperatura para aço ASTM A36

Para o módulo de elasticidade deste mesmo aço ASTM A36, tem-se a seguinte curva de redução em função da temperatura, conforme a Figura 3-8.

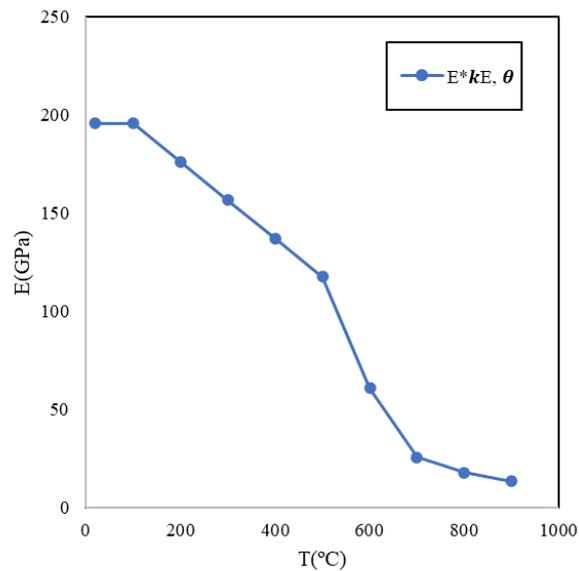


Figura 3-8 - Curvas de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço ASTM A36

3.2 Análise cinética da decomposição térmica da tinta intumescente

O entendimento das fases de decomposição térmica da tinta intumescente diante da evolução da temperatura é fundamental para compreensão do seu efeito retardador de temperatura no aço. A estratégia comumente utilizada para o estudo do comportamento de tintas intumescentes

são os ensaios experimentais de termogravimetria (TG) e de calorimetria exploratória diferencial de varredura (DSC).

O ensaio termogravimétrico consiste na determinação da perda mássica em função da variação de temperatura, que pode ser feita empregando diferentes taxas de aquecimento, em um ambiente atmosférico manipulável, de ar, nitrogênio, vácuo, entre outros. Em geral, os estudos cinéticos são feitos com taxas de aquecimento de até 40°C/min e amostras pequenas de 5 a 20mg do material analisado. Durante um teste de termogravimetria, a amostra é aquecida em uma taxa controlada pré-determinada enquanto sua massa é continuamente monitorada. Qualquer alteração na massa da amostra, como perda de massa ou ganho de massa, é registrada ao longo do tempo. Essas mudanças na massa são então correlacionadas com as transformações químicas ou físicas que ocorrem na amostra durante o aquecimento. Essa técnica é comumente aplicada em ciência dos materiais e química para investigar a decomposição térmica, perda de solventes, desidratação, oxidação e outras transformações térmicas de uma amostra.

Já o teste de calorimetria diferencial de varredura, é uma técnica usada para medir as mudanças na capacidade térmica de uma substância em função da temperatura. Durante um teste de DSC, a amostra é aquecida ou resfriada em uma taxa controlada, enquanto uma referência inerte é mantida em condições semelhantes. O calor necessário para alterar a temperatura da amostra e da referência é medido e comparado, revelando informações sobre as transições térmicas e reações que ocorrem na amostra. A análise das curvas de DSC pode fornecer dados sobre pontos de fusão, pontos de ebulição, transições de fase, reações endotérmicas e exotérmicas, capacidades térmicas, estabilidade térmica, entre outros parâmetros. Essas informações são valiosas para entender as propriedades térmicas e o comportamento dos materiais em diferentes condições de temperatura.

Para a tinta intumescente utilizada nos ensaios, os testes de TG e DSC foram realizados na Universidade de Coimbra, no Instituto Pedro Nunes – IPN, no equipamento tipo NETZSCH modelo TG 209 F1 Libra, com características semelhantes ao equipamento ilustrado na Figura 3-9, retirado do *website* do fabricante da máquina.



Figura 3-9 - Modelo da máquina utilizada para ensaio de análise termogravimétrica.
Fonte: Netzsch®

As amostras utilizadas possuíam massa inicial entre 9,474 e 15,315mg. As taxas de aquecimento utilizadas foram (5°C/min, 10°C/min, 15°C/min e 25°C/min), com temperatura inicial de 20 °C até 950 °C. Foi utilizada atmosfera de ar com caudal de 30 ml/min e para efeito de comparação foi realizado um teste de cada tinta em atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento igual a 25 °C/min.

As Figura 3-10 e Figura 3-11 apresentam os resultados obtidos pelos ensaios de TG.

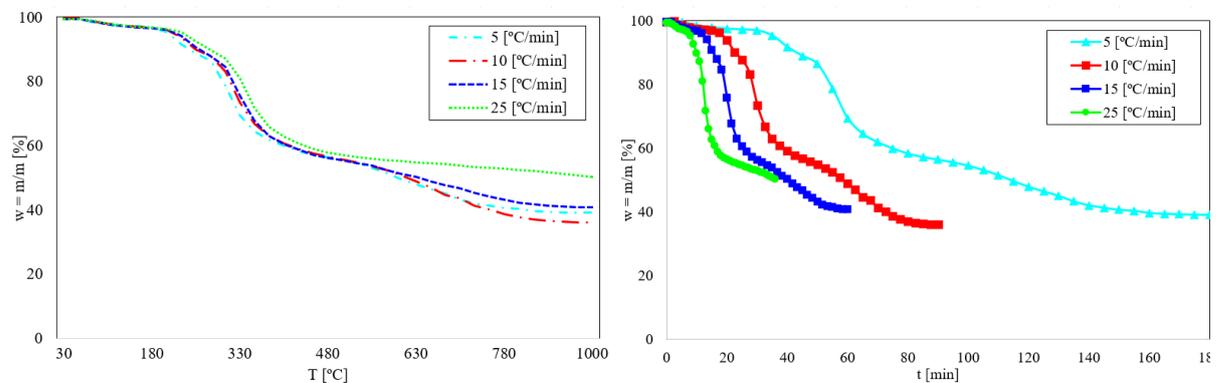


Figura 3-10- Curvas de TG para a tinta sob diferentes taxas de aquecimentos em atmosfera de ar.

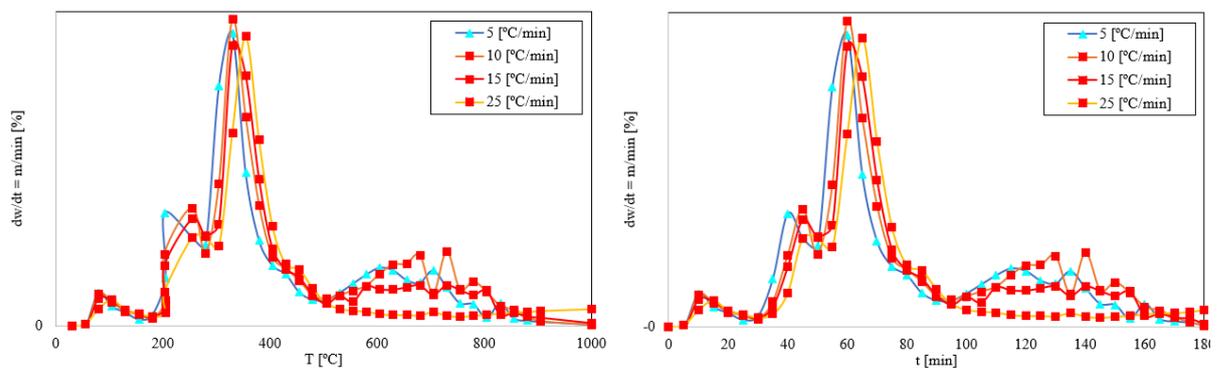


Figura 3-11- Curvas experimentais de DTG da tinta intumescente para diferentes taxas de aquecimento em atmosfera de ar.

O resultado do teste de termogravimetria indica para a presença de várias reações no processo de decomposição, definido pelos picos existentes no gráfico de curvas diferenciais. Nota-se, portanto, 3 etapas bem definidas: a primeira delas ocorre por volta dos 200 °C ou 40 minutos, caracterizada pela ativação da tinta. Na segunda etapa, ocorre a degradação do polímero, início da formação dos componentes carbonosos, por volta dos 360 °C ou 60 minutos. Por fim, a última fase, ocorrida após os 650 °C, ilustra o processo de decomposição da matéria carbonosa e oxidação dela. Esta etapa é onde ocorre a alteração da cor da camada carbonosa de branco para preto, como será evidenciado nas imagens resultantes dos ensaios. A análise da tinta intumescente determinou um valor médio para o resíduo carbonoso igual a 41,37%.

O resultado do ensaio TG comparativo em atmosfera de nitrogênio é ilustrado pela Figura 3-12. É possível observar que a terceira fase, em que ocorre a oxidação, é inexistente na amostra com atmosfera de nitrogênio. Isso confirma a importância do oxigênio para a degradação térmica da tinta.

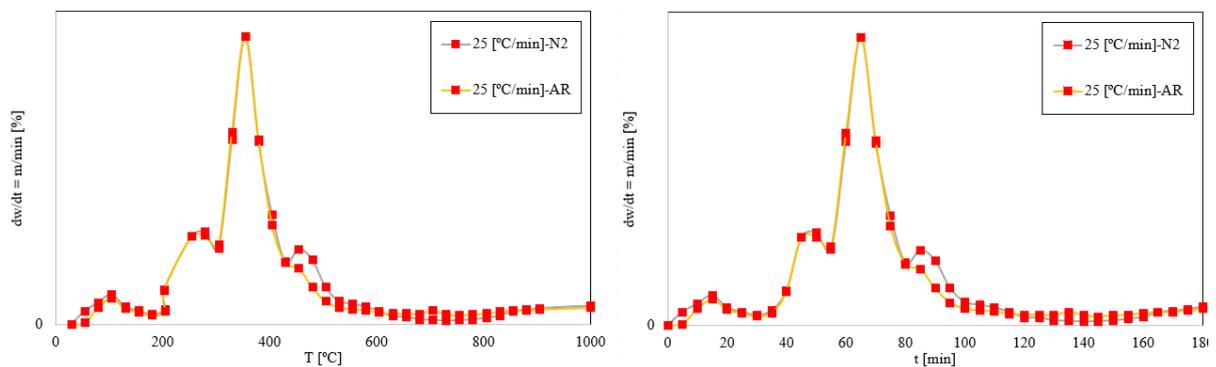


Figura 3-12- Curvas de DTG para taxa de aquecimento de 25°C/min para atmosferas diferentes

A Tabela 3-5 ilustra os resultados obtidos pelos ensaios de termogravimetria, com os valores da variação de massa e de massa residual por amostra ensaiada, bem como as temperaturas em que ocorre cada etapa.

Tabela 3-5- Resultado dos ensaios de termogravimetria

	5°C/min	10°C/min	15°C/min	25°C/min	25°C/min-N2
Temp. 1 (°C)	191,4	208,0	215,3	226,6	222,4
Temp. 2 (°C)	306,3	319,1	327,3	336,6	339,4
Temp. 3 (°C)	604,3	612,8	643,5	705,1	-
Varição de massa (%)	-60,19	-63,53	-58,29	-49,24	-52,05
Massa residual (%)	38,97	36,03	40,67	49,81	47,97

Nos testes de calorimetria diferencial de varredura, cujo resultado é ilustrado pela Figura 3-13, pode-se notar o início da degradação térmica por volta de 180-200°C, com a reação endotérmica da matriz polimérica. Em seguida, ocorre com pico próximo aos 350°C a reação de formação da camada carbonosa que se mantém até o final do ensaio.

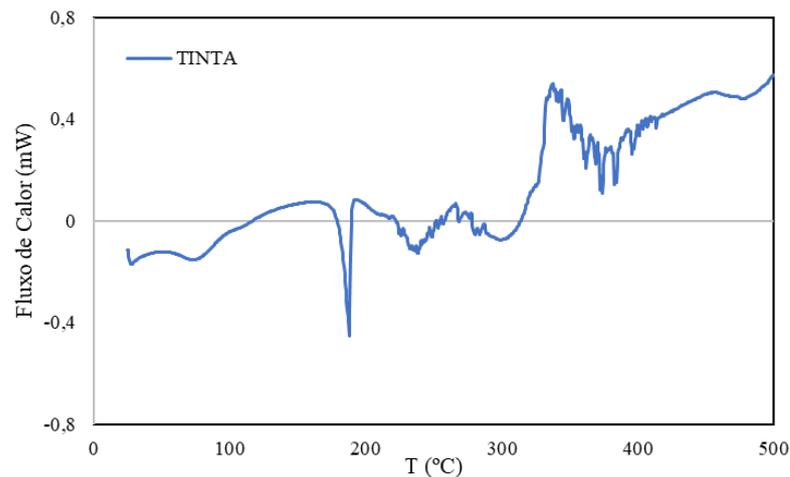


Figura 3-13- Análise DSC da tinta intumescente ensaiada.

Deste modo, podem-se observar os picos de temperatura onde iniciam os processos de degradação térmica, bem como as porcentagens de massa consumida e residuais geradas em cada processo. Observa-se também pela Figura 3-13 as reações com liberação de calor e absorção de calor, explicitadas pelo eixo das ordenadas, do fluxo de calor em mW. Portanto, a fase final de degradação térmica da tinta, caracterizada pela formação do composto espumífero é exotérmica.

3.3 Considerações finais

Esta seção abordou os principais ensaios utilizados para caracterização da tração em temperatura ambiente dos aços utilizados nos perfis estruturais ensaiados. Além disso, foi feito

o cálculo da curva de degradação das propriedades mecânicas do aço diante da evolução da temperatura, conforme estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2013. Com estes valores de resistência mecânica, podem-se compreender os efeitos físicos ocorridos nos ensaios em cada faixa de temperatura.

Além disso, este capítulo trouxe os resultados experimentais obtidos nos ensaios de termogravimetria da tinta intumescente utilizada para proteção térmica dos elementos metálicos. Este ensaio consiste na determinação da perda mássica em função da variação de temperatura, que pode ser feita empregando diferentes taxas de aquecimento, em um ambiente atmosférico manipulável, de ar, nitrogênio, vácuo e entre outros. Uma vez compreendida a faixa de atuação e os níveis de perda mássica da tinta em função da temperatura, pode-se analisar o comportamento da viga em cada estágio do ensaio. Também foi executado o ensaio de calorimetria diferencial, executado para distinguir as reações endotérmicas das reações exotérmicas. Isso se faz necessário para compreender o que ocorre na superfície metálica durante cada fase de atuação da tinta intumescente, em níveis de temperatura.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PERFIS CURTOS PROTEGIDOS

4.1 Considerações Gerais

Segundo Mesquita (2015), quando o material polimérico da tinta intumescente é submetido a um fluxo de calor em uma de suas superfícies, inicia-se a sua degradação térmica. Com a liberação dos gases voláteis e dependendo da constituição molecular em fase sólida, pode-se ter a conversão total do material sólido em gás e/ou dar origem a uma nova camada de material na vizinhança da zona aquecida. Esta nova camada, formada por material carbonoso e espumífero, possui estrutura celular, caracterizado por bolhas geradas durante a etapa de aquecimento e liberação de gases.

Este processo, seguido das interações e reações químicas que ocorrem entre os componentes ativos presentes na formulação das tintas intumescentes são observadas em ensaios experimentais com protótipos em pequena escala. Os mecanismos de reação, modelos de comportamento e parâmetros cinéticos são obtidos com base nestes modelos. Deste modo, pode-se dividir a avaliação do comportamento ao fogo em dois tipos de ensaio, nomeadamente o de resistência ao fogo e o de reação ao fogo.

O ensaio de resistência ao fogo é utilizado para a caracterização de elementos construtivos em situação de incêndio. Nestes casos, avalia-se o comportamento do material submetido a ação de um carregamento mecânico externo, além da ação térmica. Os modos de flambagem, deformações globais da estrutura e temperaturas críticas de falha são obtidas nestes modelos de ensaio.

No caso dos ensaios de reação ao fogo, objetiva-se avaliar o comportamento do material para a propagação e desenvolvimento do incêndio, tanto em termos de elevação de temperaturas como na produção de fumaça. A depender do aparato experimental implementado, pode-se avaliar nestes casos parâmetros como a inflamabilidade, taxa de liberação de calor e as taxas de liberação de gases tóxicos da superfície protegida. O perfil da camada intumescente formado após a queima de uma tinta intumescente pode também ser um dos parâmetros analisados em ensaios de reação ao fogo.

4.2 Premissas Adotadas

Para caracterização do comportamento da tinta intumescente aplicada a perfis estruturais, optou-se pela realização de ensaios de reação ao fogo, devido à complexidade de execução do carregamento mecânico aliado à ação térmica nos laboratórios da UFMG. Feitas as adaptações necessárias impostas perante as limitações físicas e de infraestruturas, os ensaios tiveram como referências as prescrições normativas da ABNT NBR 5628:2001 e da norma LPS 1107:2014.

Deste modo, foram executados ensaios em perfis curtos de quarenta centímetros de comprimento em um forno elétrico do laboratório de concreto e argamassas do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção – DEMC da UFMG, ilustrado pela Figura 4-1. Este forno possui resistência em todas as paredes laterais, inclusive na porta, o que possibilita um aquecimento mais uniforme da seção. Além disso, o forno é equipado com controlador tipo CC405 da empresa Linn High Therm®, que auxiliou no controle das taxas de aquecimento e temperatura. As medidas internas do forno utilizado para ensaio eram de 60x60x60 cm.



Figura 4-1- Forno elétrico utilizado nos ensaios de reação ao fogo.

A proposta experimental do presente trabalho consistiu na avaliação de protótipos de perfis metálicos de diferentes fatores de massividade e seção transversal protegidos com tinta intumescente de espessuras de proteção variáveis, definidas em função do fator de massividade e do tempo requerido de resistência ao fogo, como ilustrado na Tabela 4-1. Variou-se também a seção transversal das amostras, de modo a avaliar o efeito de borda e a influência do fator de massividade na resposta a ação do fogo. Para cada tipo de seção, foram ensaiadas amostras com

espessura para TRRF de 30 minutos e amostras com espessura para TRRF de 60 minutos, conforme recomendado na carta do fabricante da tinta intumescente. Quanto a definição das seções, utilizou-se a bitola W150X13, que possui fator de massividade (forma) elevado e assim permitiria a aplicação de maiores espessuras de revestimento intumescente e a bitola W200x31,3 com fator de massividade inferior a nível de 57% em relação ao W150X13. Isso permite a avaliação do desempenho da tinta intumescente em função do fator de massividade. O perfil TQ100X4,75, de seção quadrada, permite a avaliação do comportamento intumescente em uma seção com 4 arestas vivas, além de possuir fator de massividade próximo ao do perfil W200X31,3. As seções adotadas foram adquiridas pela empresa HCM Engenharia e doadas sem custo a UFMG para a execução dos ensaios experimentais descritos neste trabalho.

Tabela 4-1- Perfis ensaiados e suas características

Seções transversais	Representação esquemática da seção	Fator de massividade (cm/cm ²)	Espessura de tinta intumescente (µm)
W150X13		404	130/500
W200X31,3		231	130/300
TQ100X4,75		219	130/275

A curva de aquecimento utilizada para estes ensaios foi uma rampa com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, devido às limitações do forno disponível para realização dos ensaios para reproduzir maiores taxas de aquecimento. Deste modo, a taxa de aquecimento promovida foi menor do que a taxa de aquecimento imposta pela curva padrão ISO834-1:1999, estabelecida como valor de referência para ensaios de resistência ao fogo. A evolução do aquecimento foi linear ao longo do tempo até a temperatura de 600°C, para possibilitar a observação do efeito de espumificação da camada intumescente.

No que diz respeito ao condicionamento das amostras, todas as barras passaram pelo processo de decapagem para remoção de óleos, graxas e oxidações provenientes do processo de laminação. Em seguida, foi aplicada uma tinta primária epóxi poliamida de baixa espessura para regularização da superfície, conforme apresentada na Figura 4-2. A espessura da camada primária aplicada foi de 75 µm, aferida com medidor de espessura úmida, durante o processo de aplicação feito com máquina de pintura *airless*.



Figura 4-2- Procedimento de pintura dos perfis com tinta primer epóxi.

Após a cura da tinta primária, foi executada a pintura dos perfis com a camada de tinta intumescente apropriada para cada amostra. Para conferência da espessura de tinta aplicada, utilizou-se o medidor de espessura úmida em todas as faces da seção transversal, medindo a espessura ao longo de todo o comprimento do perfil, a exemplo do que está ilustrado na Figura 4-3. Ao todo, foram aferidos 12 pontos de medição e obtido a média desses pontos, constatou-se que os valores não variaram mais de 15% em relação a espessura média. Dessa forma, garantiu-se a uniformidade da aplicação.

Após a cura da tinta, foi aplicada uma camada de tinta esmaltada de poliuretano para finalização da superfície. Este procedimento é recomendado pelo próprio fabricante da tinta intumescente e garante maior resistência mecânica a impactos e ao efeito das intempéries.



Figura 4-3- Aferição da espessura de tinta aplicada.

Dado o exposto, após a cura de 5 dias para o primeiro ensaio, os perfis estavam aptos à realização dos ensaios de reação ao fogo. Devido às limitações de tempo de resfriamento do forno e horário do laboratório para execução dos testes, foram realizados 2 ensaios por dia.

4.3 Metodologia para a Realização dos Ensaios

4.3.1 Descrição dos ensaios e instrumentação

Para realização dos ensaios, foi preestabelecida a execução de uma amostra por vez devido ao volume interno do forno elétrico, de modo a manter condições uniformes de aquecimento na superfície do aço. Ao todo, foram realizadas 7 rotinas de ensaios de perfis curtos, sendo uma rodada de testes realizada para calibração da curva de aquecimento e para testar a metodologia implementada. A Tabela 4-2 apresenta as espessuras médias de cada amostra ensaiada.

Tabela 4-2- Espessuras médias de cobertura aplicada

Amostras	Bitola mm x kg/m	Fator de Forma (m ⁻¹)	Espessura de Cobertura Intumescente (µm)
P1	W 150 x 13,0	404	130
P2	W 150 x 13,0	404	500
P3	W 200 x 31,3	231	130
P4	W 200 x 31,3	231	300
P5	TQ100X4,75	219	130
P6	TQ100X4,75	219	275

Junto ao controlador do forno, foi definido uma curva de aquecimento de 20°C/min, até atingir a temperatura de 600°C, totalizando aproximadamente 30 minutos para a fase de aquecimento.

Em seguida, a fase de resfriamento foi de cerca de 30 minutos, sendo o resfriamento natural, sem o auxílio de ventiladores mecânicos ou similares. Dessa forma, a duração média de cada ensaio foi de 60 minutos.

Para coleta dos dados dos ensaios, foi utilizado o sistema de aquisição de dados ADS2002, equipado com condicionador AI2164, da empresa LINX Tecnologia. Foram utilizados 3 termopares Tipo K, revestidos fibra de vidro, para aferição da temperatura do forno. De notar que estes foram termopares adicionais e de que o forno já tinha os seus termopares de controle. Os termopares foram posicionados em diferentes pontos do interior do forno à meia altura, com auxílio de uma haste metálica para fixá-los na posição desejada. Estes termopares foram nomeados com o prefixo TMPS, para facilitar a identificação nos resultados.

Para aferição da temperatura da superfície protegida, foram soldados com solda capacitiva 3 termopares de fio do tipo K, em diferentes pontos ao longo da seção transversal e do comprimento do perfil, nomeados com o prefixo TMPV, conforme a Figura 4-4. Esta solda foi executada com a máquina de solda EW-800, fornecida pela empresa VMV Costa.

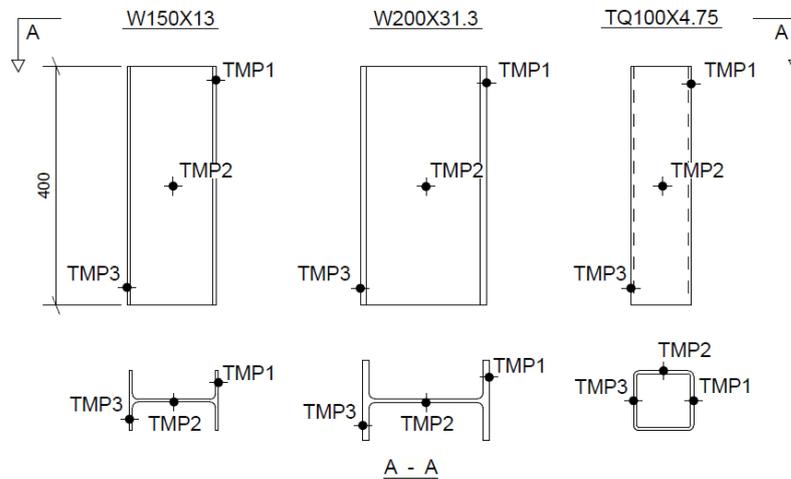


Figura 4-4- Posição dos termopares TMPV soldados nos diferentes perfis ensaiados.

O posicionamento dos fios de termopar foi realizado por meio de uma abertura na parte superior do forno, de diâmetro igual a 10 mm. A montagem do aparato experimental é ilustrada pela Figura 4-5.



Figura 4-5- Sistema experimental para ensaios de perfis curtos.

Os perfis foram posicionados alinhados em seu centro com o centro do forno, assentados sobre uma base refratária cerâmica. Assim, todas as 4 faces foram expostas ao programa de aquecimento desejado. Durante todo o ensaio, a porta do forno permaneceu fechada para concentração do calor.

Ao final de cada ensaio, foram anotadas as medidas do desenvolvimento da camada carbonosa formada na queima e após o resfriamento do forno até a temperatura ambiente, repetiu-se a rotina experimental para outro corpo de prova.

4.4 Resultados Obtidos

Para cada ensaio, são apresentadas a seguir as curvas de tempo *vs.* temperatura medida pelos termopares posicionados no interior do forno, TMS, e dos termopares soldados ao substrato dos perfis metálicos, TMP.

4.4.1 Temperatura do forno e do perfil protegido

A seguir serão apresentadas, inicialmente, os resultados obtidos dos níveis de temperatura atingidos para o perfil P1, de seção W150X13, com espessura de cobertura intumescente aplicada de 130 μm , na Figura 4-6.

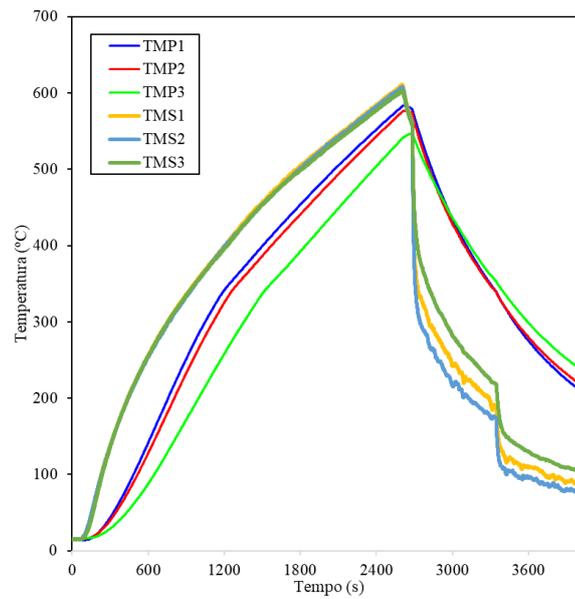


Figura 4-6 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P1-W150x13.

Na Figura 4-7, têm-se os resultados das curvas de temperatura obtidas para o ensaio do perfil P2, de seção W150X13 com espessura seca de proteção igual a 500 μm .

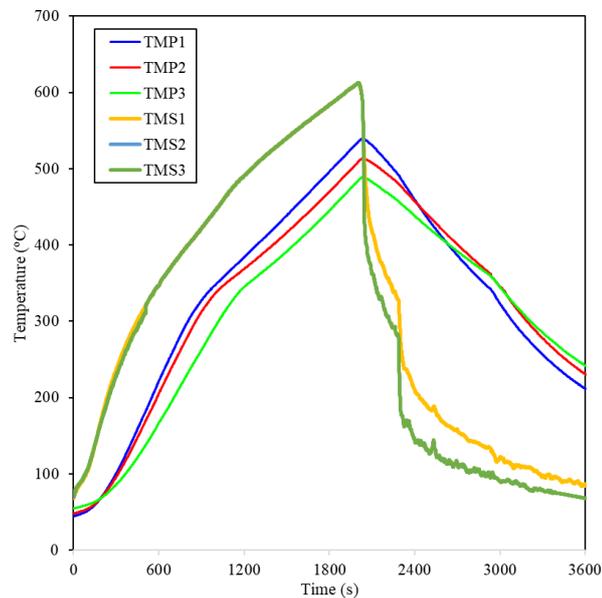


Figura 4-7 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P2-W150x13.

Comparando os corpos de prova P1-W150X13 e P2-W150X13, ambos com seção W150X13, nota-se que as curvas de temperatura dos perfis de aço protegidos apresentaram comportamento semelhante. O TMP1, localizado no topo do perfil apresentou temperatura elevada em relação ao TMP2 e TMP3. A temperatura máxima do gás de 600 °C, no ensaio P1-W150X13, foi

atingida 2.400 segundos após o início do ensaio, enquanto no ensaio P2-W150X13, a temperatura mais alta do gás foi registrada 1.900 segundos após o início do experimento.

A temperatura mínima registrada no perfil de aço foi apresentada no TMP3, localizado próximo a base do forno. Isto ocorreu em ambos os ensaios e é explicado pelo fato de haver trocas de calor por condução entre o perfil e a base refratária do forno. Além disso, a tendência de concentração dos gases quentes na parte superior do forno fez com que os termopares TMP1 e TMP2 registrassem os maiores valores de temperatura. A temperatura máxima na superfície protegida foi de 570°C e 514°C medida pelo TMP1, nos ensaios P1-W150X13 e P2-W150X13. Este pico de temperatura foi atingido aos 2640 e 2040 segundos após o início do ensaio, respectivamente.

Portanto, concluiu-se que o aumento da espessura seca da tinta intumescente contribuiu para evitar o aquecimento do perfil de aço, reduzindo a temperatura do aço protegido em 9,8% comparando os ensaios com 60 e 30 minutos de TRRF.

Na Figura 4-8, têm-se os resultados das curvas obtidas para o ensaio do perfil P3, de seção transversal W200X31.3 com espessura seca de proteção intumescente igual a 130 µm.

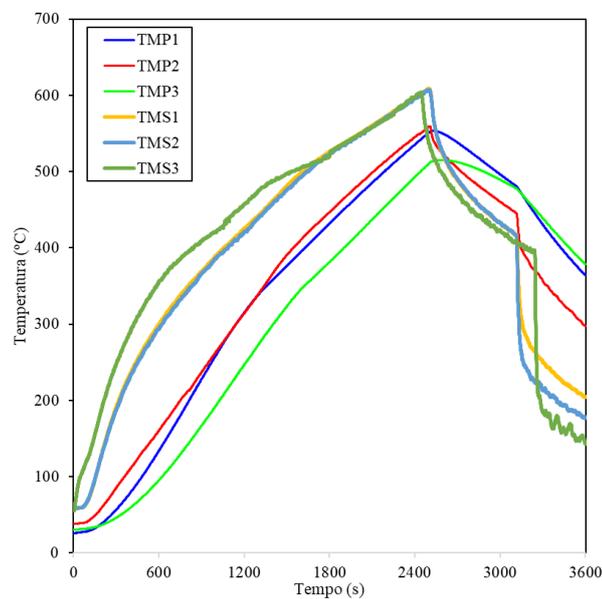


Figura 4-8 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P3-W200x31.3.

Na Figura 4-9, têm-se resultados das curvas obtidas para o ensaio do perfil P4, de seção transversal W200X31,3 com espessura seca de proteção intumescente igual a 300 µm.

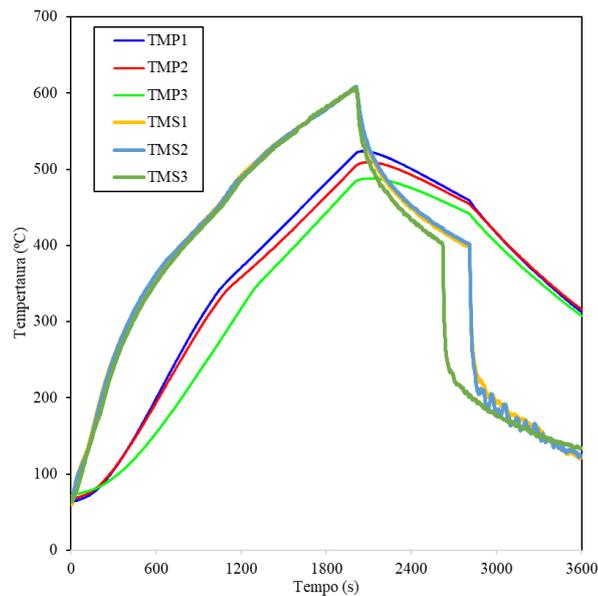


Figura 4-9 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P4-W200x31.3.

Os resultados para os corpos de prova P3-W200X31.3 e P4-W200X31.3 mostram uma tendência de diminuição da temperatura média da superfície de aço protegida. A curva de temperatura do gás, no ensaio P3-W200X31.3, atingiu 600 °C aos 2600 segundos após o início do ensaio, enquanto no ensaio P2 a temperatura máxima do gás foi atingida aos 2000 segundos após o início do experimento. Assim como ocorreu nos corpos de prova P1-W150X13 e P2-W150X13, a temperatura mínima registrada no perfil de aço foi apresentada no TMP3, localizado na parte inferior do perfil, junto à base do forno. A temperatura máxima na superfície protegida foi de 540°C e 506°C medida pelo TMP1, nos ensaios P3-W200X31.3 e P4-W200X31.3. Este pico de temperatura foi atingido aos 2.460 e 2.040 segundos após o início do ensaio, respectivamente.

O TMP1 e o TMP2, localizados no topo do perfil e ponto médio do perfil, respectivamente, apresentaram temperaturas elevadas em comparação ao TMP3 como nos outros ensaios. Portanto, concluiu-se que o aumento da espessura seca da tinta intumescente contribuiu para evitar o aquecimento do perfil de aço, reduzindo a temperatura do aço protegido em 6,3%, comparando os ensaios utilizando 60 e 30 minutos de TRRF.

Na Figura 4-10, têm-se os resultados das curvas obtidas para o ensaio do perfil P5, com seção transversal igual a TQ100X4,75 e espessura seca de proteção intumescente igual a 130 µm.

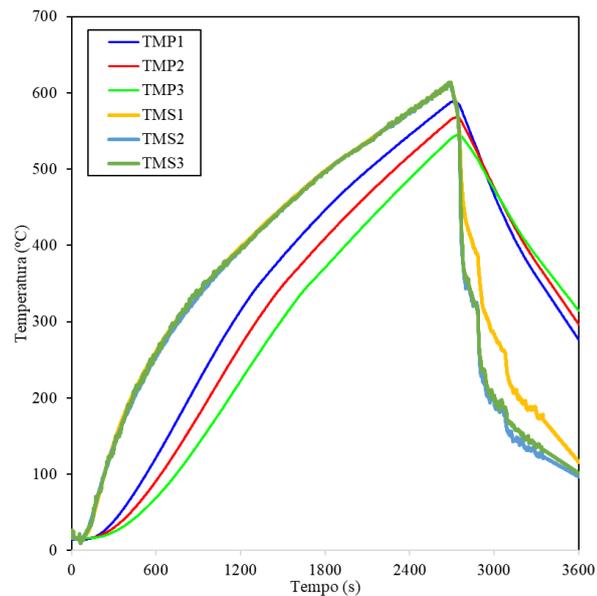


Figura 4-10 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P5-TQ100x4.75.

Na Figura 4-11 , têm-se os resultados das curvas obtidas para o ensaio do perfil P6, com seção TQ100X4,75 e espessura seca de proteção igual a 275 μm .

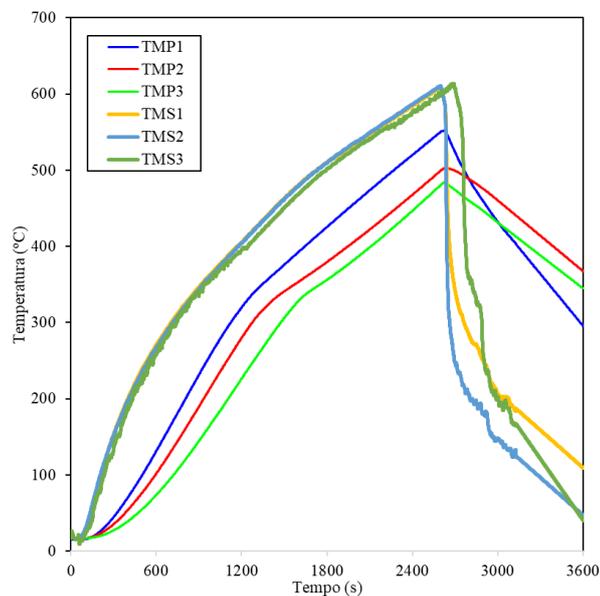


Figura 4-11 - Temperaturas durante o ensaio do perfil P6-TQ100x4.75.

Ao comparar os resultados obtidos para os corpos de prova P5-TQ100X4,75 e P6-TQ100X4,75, com seção transversal tubular quadrada, foi observada diferença significativa na temperatura do substrato de aço protegido entre as espessuras de tinta intumescente de 130 μm e 275 μm . Inicialmente, deve-se notar que as curvas de temperatura dos perfis de aço protegidos apresentaram comportamento semelhante. O TMP1, localizado no topo do perfil apresentou

maior temperatura em relação ao TMP2 e TMP3. A curva de temperatura do gás, no ensaio P5-TQ100X4.75, atingiu 600°C, aos 2.600 segundos, após o início do ensaio, enquanto no ensaio P6-TQ100X4.75, a temperatura máxima do gás foi atingida aos 2.500 segundos após o início do experimento.

A temperatura mínima registrada no perfil de aço foi apresentada no TMP3, localizado próximo a base do forno. Isso ocorre nos dois ensaios e mostra que o perfil aquece mais na parte superior, devido a tendência de elevação dos gases quentes. A temperatura máxima na superfície protegida foi de 563°C e 508°C medida pelo TMP1, nos ensaios P5-TQ100X4,75 e P6-TQ100X4,75. A temperatura máxima foi atingida aos 2760 e 2580 segundos após o início do ensaio, respectivamente. Portanto, concluiu-se que o aumento da espessura seca da tinta intumescente aplicada aos corpos de prova, relacionada com a mudança do TRF de 30 para 60 minutos, reduziu a temperatura do aço protegido em 9,7% nas seções com proteção para 60 minutos.

4.4.2 Comportamento expansivo da tinta intumescente

Após o ensaio, foram feitas fotografias dos corpos de prova ensaiados, com o objetivo de se avaliar o desenvolvimento da camada intumescente e comparar com os outros cenários executados. A Figura 4-12 a seguir ilustram o estado final do perfil metálico P1-W150X13 após o ensaio, por diferentes ângulos.



(a) Frontal

(b) Superior

(c) Perspectiva

Figura 4-12 – Perfil P1-W150X13 com 130µm após ensaio.

A Figura 4-13 ilustra o desenvolvimento da camada intumescente no perfil P2-W150X13 após a realização do ensaio.

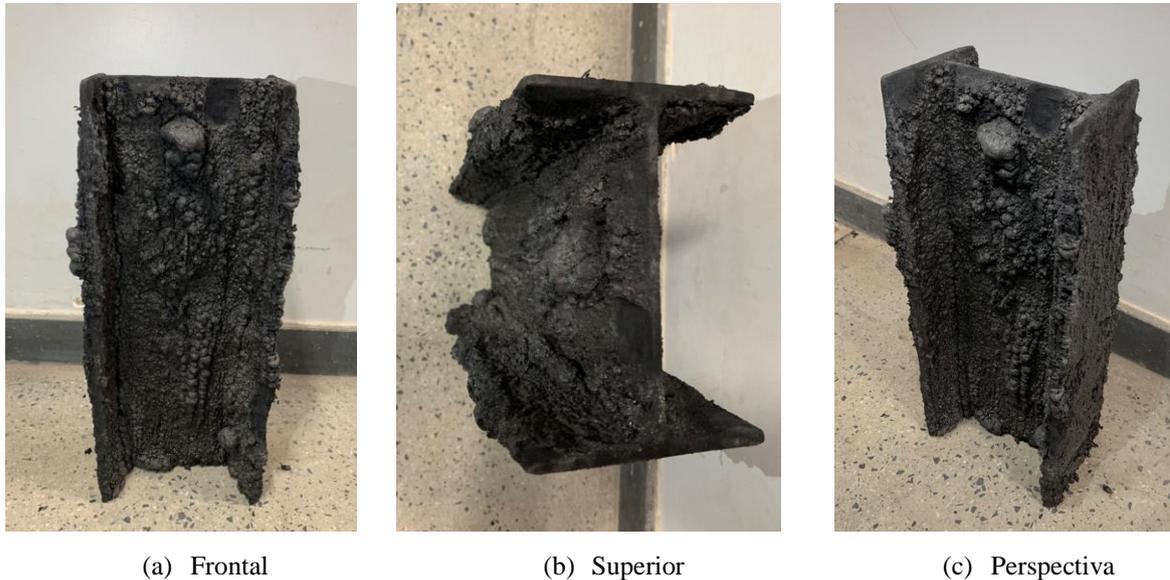


Figura 4-13 - Perfis P2-W150X13 com 500 μ m após ensaio.

Comparando os resultados, o corpo de prova P2-W150X13, utilizando filme de espessura seca de 500 μ m, apresentou desenvolvimento mais significativo da camada carbonácea com formação de bolhas volumosas do que o corpo de prova P1-W150X13 com filme de espessura seca de 130 μ m. Medido manualmente com o auxílio de um paquímetro, foi observado o desenvolvimento da camada intumescente de 2 a 6 mm de espessura nos corpos de prova P1-W150X13. A camada intumescente formada no P2-W150X13 teve espessura medida variando de 5 a 25 mm. Da mesma forma, pode-se observar maior ocorrência do efeito de retração da tinta nas regiões de borda nos corpos de prova P2-W150X13. Ressalta-se que quando a espessura aumentou, o desenvolvimento da camada intumescente mostrou-se mais aleatório, conforme observado na Figura 4-13. O aumento da espessura do filme seco aplicado garantiu maior eficiência no desenvolvimento da temperatura no substrato metálico protegido, visto que os corpos de prova P2-W150X13 protegidos com TRF de 60 minutos apresentaram temperaturas médias 9,8% mais baixas do que os corpos de prova P1-W150X13, protegidos para TRF de 30 minutos.

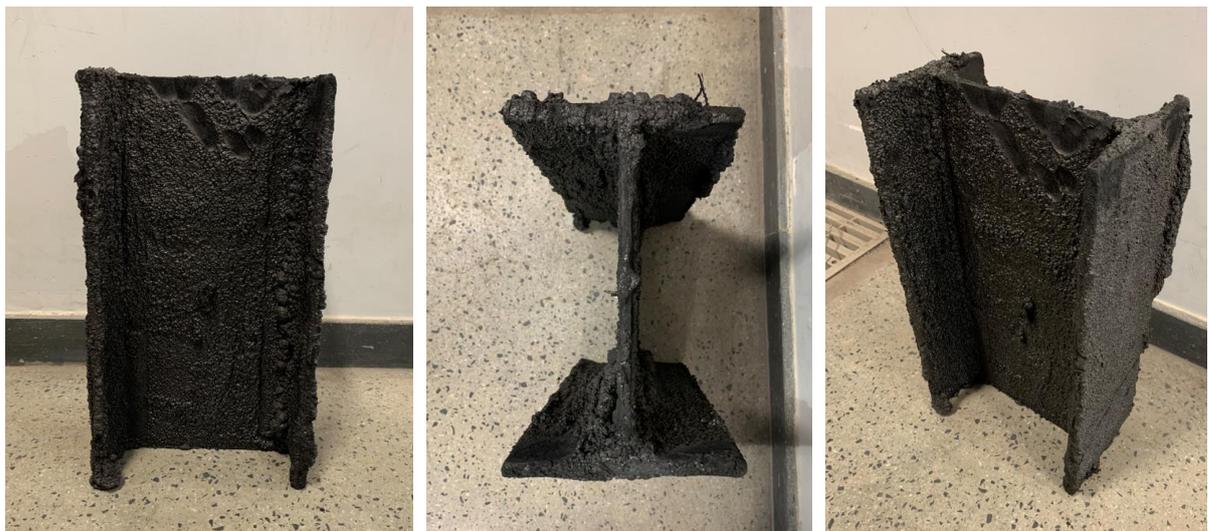
A Figura 4-14 e Figura 4-15 mostram a diferença na formação da camada intumescente no corpo de prova P3-W200x31,3 e no corpo de prova P4-W200x31,3.



(a) Frontal

(b) Superior

(c) Perspectiva

Figura 4-14 - Perfis P3-W200X31.3 com 130 μ m após ensaio.

(a) Frontal

(b) Superior

(c) Perspectiva

Figura 4-15 - Perfil P4-W200X31.3 com 300 μ m após ensaio.

É possível observar que os dois corpos de prova não apresentaram bolhas muito grandes formadas após o ensaio devido ao baixo fator de massividade do perfil e espessura seca do filme aplicado em ambos os casos. No entanto, as amostras de 300 μ m apresentaram uma camada de carbono residual ligeiramente superior às amostras de 130 μ m, o que explica o bom comportamento de retenção de temperatura.

Medido manualmente com o auxílio de um paquímetro, foi observado o desenvolvimento da camada intumescente de 1 a 5 mm de espessura nos corpos de prova P3-W200x31,3. No P4-W200x31,3 foram observadas bolhas medindo de 1 a 10 mm de altura. Foi possível observar

fissuras na região dos cantos dos perfis, o que pode ser explicado pelo efeito da retração da pintura. É importante ressaltar que este aparecimento de fissuras é condicionado pela espessura seca aplicada, que é um fator crítico para o dimensionamento da espessura. A imposição de espessuras secas elevadas pode promover maior aparecimento de fissuras na camada de espuma.

O aumento da espessura do filme seco garantiu maior eficiência no revestimento intumescente frente ao aquecimento, uma vez que a superfície protegida do aço P4-W200x31.3 ficou 6,3% mais fria que o corpo de prova P3-W200x31.3. O comportamento semelhante da camada carbonácea corrobora a baixa diferença de temperatura observada nos perfis W200x31,3.

A Figura 4-10 e a Figura 4-11 mostra a situação dos perfis P5-TQ100X4.75 e P6-TQ100X4.75 após o ensaio no forno elétrico.

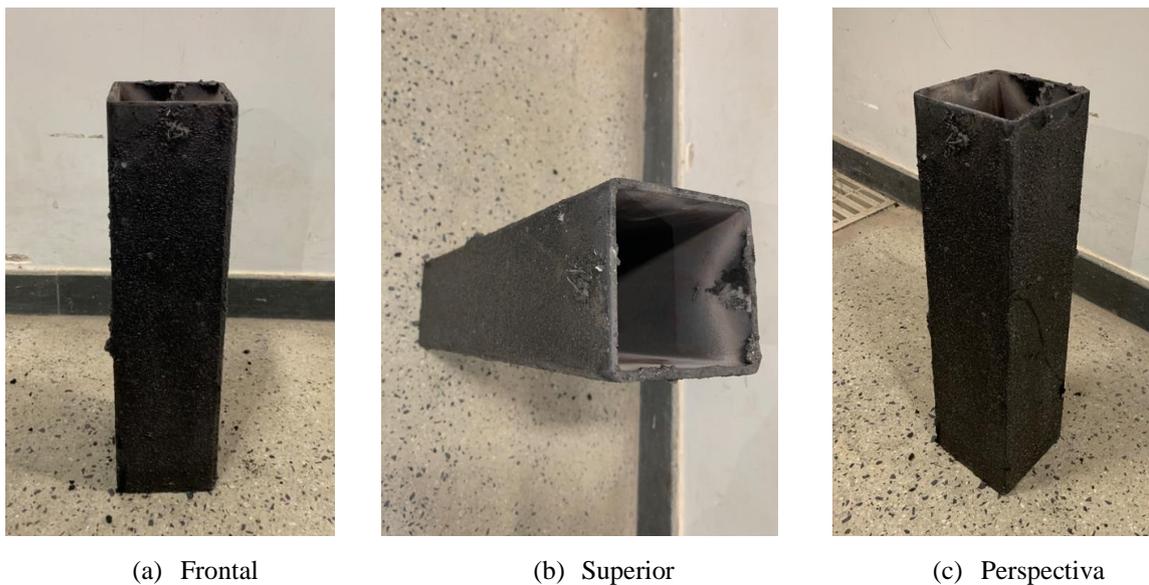


Figura 4-16 – Perfil P5-TQ100x4,75 com 130 μ m após ensaio.



(a) Frontal

(b) Superior

(c) Perspectiva

Figura 4-17 - Perfil P6-TQ100x4,75 com 275 μ m após ensaio.

Comparando os resultados de temperatura e as fotos registradas, o corpo de prova P6-TQ100x4,75, utilizando filme de espessura seca de 275 μ m, apresentou desenvolvimento mais significativo da camada carbonácea com a formação de bolhas volumosas do que o corpo de prova P5-TQ100x4,75 com filme de espessura seca de 130 μ m. Um fator importante a ser observado neste tipo de seção transversal foi o aparecimento de grandes fissuras na camada carbonácea na região dos cantos. As fissuras foram mais relevantes nos corpos de prova de 275 μ m e, como dito anteriormente, estão relacionadas ao processo de aplicação e ao efeito de retração da tinta durante o processo de cura.

Medido manualmente, foi observado o desenvolvimento da camada intumescente de 1 a 4 mm de espessura nos corpos de prova P5-TQ100x4,75. No P6-TQ100x4,75 foram observadas bolhas medindo de 5 a 18 mm de altura. Ressalta-se que quando a espessura aumentou, o desenvolvimento da camada intumescente mostrou-se mais aleatório ao longo da seção transversal, conforme observado na Figura 4-17. Mesmo com essa distribuição aleatória do processo de formação de bolhas, o aumento da espessura da tinta intumescente garantiu maior eficiência para frear o aquecimento do perfil de aço, uma vez que os resultados de temperatura da amostra P6-TQ100x4,75 eram 9,7% mais baixos que os resultados da amostra P5-TQ100x4,75.

4.4.3 Condutividade térmica da tinta intumescente

Com base nos resultados de temperatura do substrato metálico protegido e da temperatura dos gases do forno elétrico, além dos parâmetros cinéticos e geométricos dos materiais utilizados nos ensaios, pode-se obter as curvas de variação da condutividade térmica ao longo do tempo, descritas pelas equações (2-8) e (2-11), extraídas das metodologias empregadas por Dai (2009) e por Mesquita (2015). A Figura 4-18 ilustra o comportamento da condutividade térmica para o ensaio do perfil P1-W150x13 protegido com 130 μm de espessura filme seco de tinta intumescente.

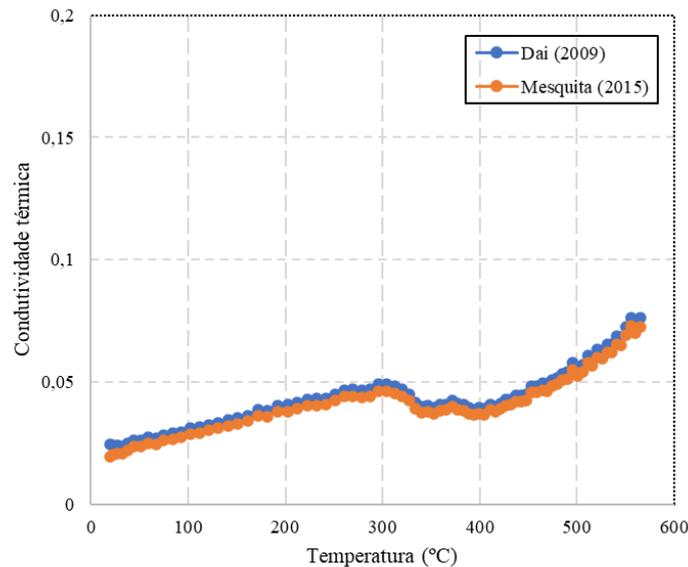


Figura 4-18 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P1-W150X13 - 130 μm

Semelhante ao explicitado para o primeiro modelo, pode-se obter as curvas de variação da condutividade térmica ao longo do tempo para o perfil P2. A Figura 4-19 ilustra o comportamento da condutividade térmica para este ensaio.

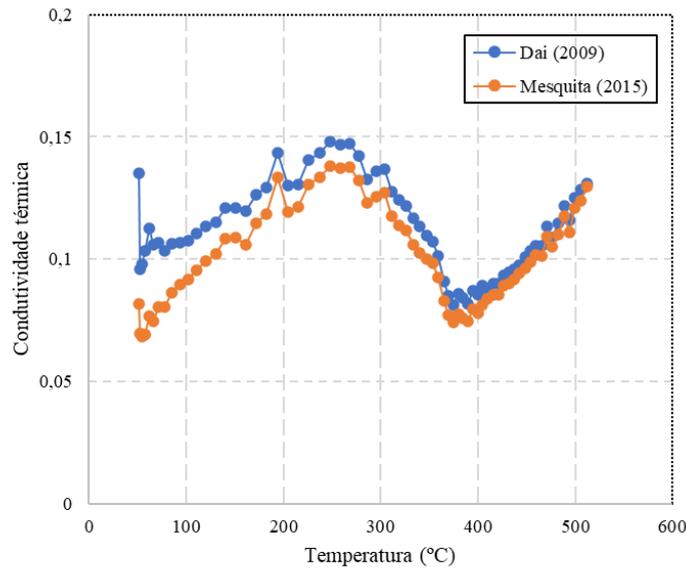


Figura 4-19 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P2-W150X13 - 500µm

A condutividade térmica calculada para os ensaios com a seção W150X13 também corrobora os resultados de temperatura obtidos. Quando a matriz polimérica da tinta intumescente é ativada devido ao aquecimento, inicia-se o comportamento retardador da tinta. A condutividade térmica diminui, reduzindo a transferência de calor do forno a gás para o perfil de aço. Quando a temperatura chega a 400°C, todo o material de proteção é consumido, a condutividade térmica da tinta aumenta e com apenas uma camada residual remanescente na superfície, a tinta já não contribui para a resistência ao fogo. Analisando os gráficos da curva da condutividade térmica, nota-se nos corpos de prova P1-W150X13 que a ativação da tinta intumescente ocorre próximo a 280°C, quando a condutividade térmica começa a diminuir. A 420°C o efeito retardante da tinta começa a se perder, devido ao consumo da camada polimérica e então as curvas de condutividade térmica começam a crescer. Ao analisar os resultados dos corpos de prova P2-W150X13, é importante observar que a condutividade térmica apresenta maior variação com o aumento da temperatura em relação ao corpo de prova P1-W150X13. Como a ativação da tinta intumescente ocorreu mais cedo em relação ao corpo de prova P1-W150X13, em torno de 240°C, ambos os casos apresentaram comportamento semelhante. A queda da condutividade térmica até os 420°C evidencia o comportamento retardador deste material. Ao comparar o P1-W150X13 e o P2-W150X13, pode-se ressaltar que a redução de 53% no valor da condutividade térmica nos resultados do P2-W150X13 foi o que proporcionou maior proteção térmica aos perfis. Da mesma forma, a amostra P1-W150X13 apresentou uma redução de 20% na condutividade térmica na fase de ativação.

A Figura 4-20 mostra o comportamento da condutividade térmica para o ensaio do perfil P3-W200X31,3 com espessura de proteção de 130 μm .

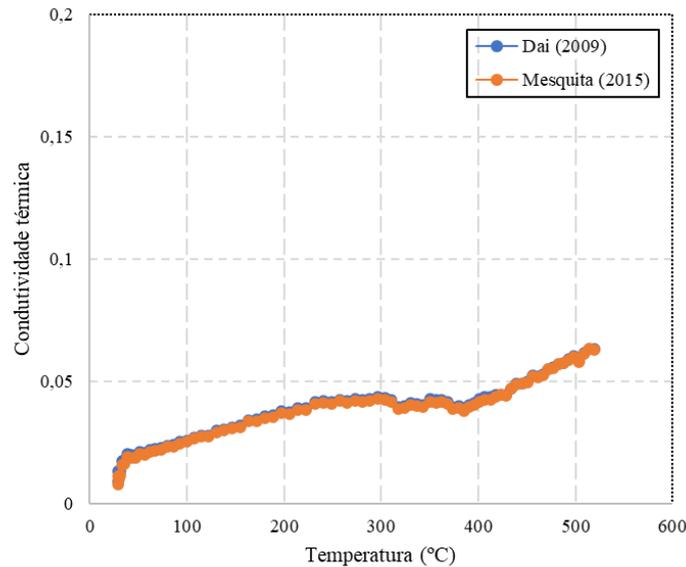


Figura 4-20 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P3-W200X31.3 - 130 μm

A Figura 4-21 ilustra o comportamento da condutividade térmica da tinta intumescente para o ensaio do perfil P4-W200X31,3, com espessura de proteção igual a 300 μm .

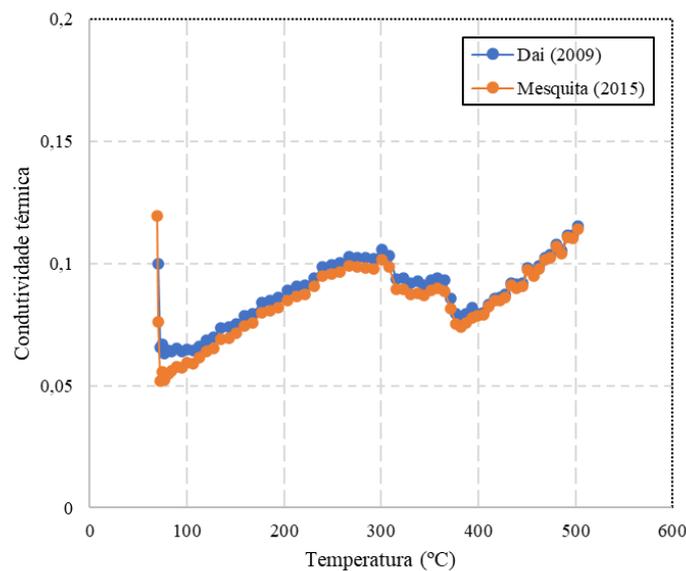


Figura 4-21 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P4-W200X31.3 - 300 μm

A condutividade térmica calculada para estes casos também corrobora os resultados de temperatura obtidos. Nos corpos de prova P3-W200X31,3, a ativação da tinta intumescente

ocorre próximo a 300°C, quando a condutividade térmica começa a diminuir suavemente. A 390°C o efeito retardante da tinta começa a se perder, devido ao consumo da camada polimérica e então as curvas de condutividade térmica começam a crescer. A curta duração do efeito da tinta pode ser explicada pela fina espessura da tinta intumescente aplicada. Analisando os resultados do corpo de prova P4-W200X31.3, deve-se notar que a condutividade térmica apresentou maior variação à medida que a temperatura aumenta. Com a ativação da tinta intumescente, ocorrendo no mesmo ponto em relação ao corpo de prova P3-W200X31.3, em torno de 300°C, ambos os casos apresentaram comportamento semelhante. A queda da condutividade térmica até os 380°C evidencia o comportamento retardador deste material. Ao comparar o P3-W200X31.3 com o P4-W200X31.3, pode-se ressaltar que a redução de 28% no valor da condutividade térmica nos resultados do P4-W200X31.3 foi o que conferiu a proteção térmica aos perfis. Da mesma forma, a amostra P3-W200X31.3 apresentou uma redução de apenas 7% na condutividade térmica na fase de ativação. Isto explica o comportamento suave da formação de inchaço nas amostras W200x31,3.

A Figura 4-22 ilustra o comportamento da condutividade térmica da tinta intumescente para o ensaio do perfil P5-TQ100X4,75, com espessura de proteção igual a 130 μm .

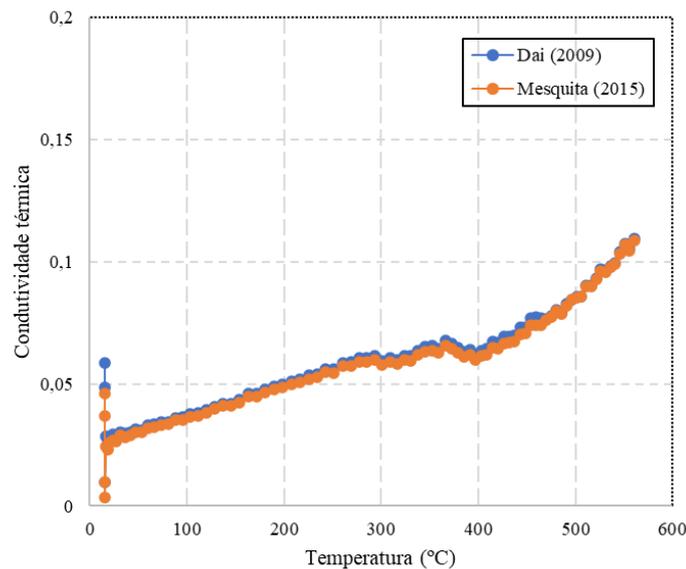


Figura 4-22 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P5-TQ100X4,75 - 130 μm

A Figura 4-23 mostra o comportamento da condutividade térmica da tinta intumescente para o ensaio do perfil P6-TQ100X4,75, com espessura de proteção igual a 275 μm .

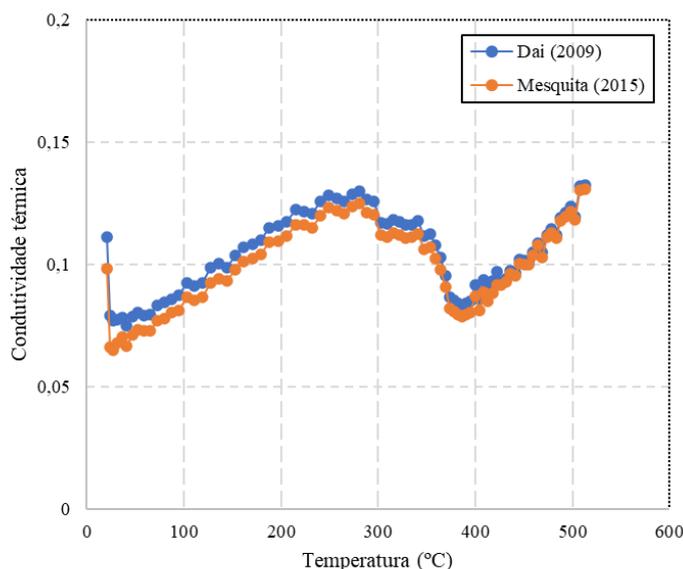


Figura 4-23 - Determinação da condutividade térmica em W/mK do perfil P6-TQ100X4,75 - 275µm.

No corpo de prova P5-TQ100X4.75, a ativação da tinta intumescente ocorre próximo a 290°C, quando a condutividade térmica começa a diminuir. A 400°C o efeito retardador da tinta começa a se perder, devido ao consumo da camada polimérica e então as curvas de condutividade térmica começam a crescer. Analisando os resultados do corpo de prova P6-TQ100X4.75, nota-se que a condutividade térmica apresentou maior variação à medida que a temperatura aumenta. Como a ativação da tinta intumescente ocorreu mais cedo, em relação ao corpo de prova P5-TQ100X4.75, em torno de 230°C, ambos os casos apresentaram comportamento semelhante. A queda da condutividade térmica até os 400°C evidencia o comportamento retardador deste material. Ao comparar o corpo de prova P5-TQ100X4.75 com o P6-TQ100X4.75, pode-se ressaltar que a redução de 36% no valor da condutividade térmica nos resultados do P6 foi o que proporcionou maior proteção térmica aos perfis. Da mesma forma, corpo de prova P5-TQ100X4.75 apresentou uma redução de 5% na condutividade térmica na fase de ativação. A queda na condutividade térmica foi menor na seção transversal com menor espessura de proteção, o que explica o maior valor médio de temperatura encontrado.

4.5 Discussão dos Resultados

O ensaio de perfis curtos protegidos se mostrou uma boa estratégia para o estudo e análise do desenvolvimento da temperatura na superfície protegida por tintas intumescentes, bem como para obtenção de parâmetros cinéticos. Com este ensaio, pode-se avaliar o comportamento do

processo expansivo para diferentes espessuras secas de filme intumescente aplicado, escolhidas com base na carta de recomendação do fabricante da tinta para um TRRF de 30 e 60 minutos.

A metodologia implementada se dispôs a avaliar a influência do fator de massividade e da composição geométrica dos perfis no desenvolvimento da camada intumescente, ao utilizar seções de diferentes bitolas de aço estrutural. Sobretudo, a curva de aquecimento adotada infere grande responsabilidade nos resultados, uma vez que o efeito da ação térmica no forno elétrico mantém uma razão uniforme de crescimento. Além disso, o ambiente do forno confere ao protótipo ensaiado uma uniformidade no aquecimento, por aquecer igualmente em todos os lados da parede do forno. Essa situação não é observada em incêndios reais, que por muitas vezes promove a ação localizada do fogo nos elementos metálicos.

Para comparação e discussão dos resultados, inicialmente são comparados os corpos de prova P1 e P2, que pertencem a mesma bitola, W150x13. Ao utilizar a mesma tinta, mesmo procedimento de aplicação e as mesmas taxas de aquecimento do forno, observou-se uma diferença significativa na temperatura do substrato protegido entre as amostras com 130 μ m e 500 μ m. A temperatura média máxima na superfície protegida foi de 570°C e 514°C, com o pico de temperatura atingido quando decorridos 44 minutos e 34 minutos do início do ensaio, respectivamente. Diante disso, concluiu-se que de fato o aumento da espessura seca de filme intumescente contribuiu para o impedimento do avanço da temperatura na superfície. As imagens ilustradas pelas Figura 4-12 e Figura 4-13 mostram a diferença da formação da camada intumescente, onde é visto que o perfil pintado com 500 μ m teve maior formação de espuma, com bolhas se destacando ao longo da seção transversal. O comportamento da condutividade térmica calculada também corrobora com os resultados obtidos de temperatura. Pode-se observar valores de condutividade térmica compatíveis com a curva de temperatura do aço protegido nas amostras com 500 μ m, onde há uma tendência de diminuição da condutividade térmica quando se inicia o processo de espumificação atingindo valores próximos a 0,07 W/mK. Quando há a consumação do material, a condutividade térmica volta a crescer, visto que a camada residual pouco contribui para a resistência ao fogo.

Nas análises dos resultados provenientes dos ensaios dos corpos de prova P3 e P4, perfis de seção W200x31,3, pode-se observar novamente a tendência de diminuição da temperatura média da superfície protegida nos casos protegidos para um TRRF de 60 minutos. A temperatura média máxima na superfície protegida foi de 540°C para o corpo de prova com

espessura seca de 130 μm . Este valor foi atingido quando decorridos 41 minutos do início do ensaio. Já para o corpo de prova com espessura seca de 300 μm , a temperatura média máxima foi de 506°C, com o pico de temperatura atingido quando decorridos 34 minutos do início do ensaio. Diante disso, concluiu-se que de fato o aumento da espessura seca de filme intumescente contribuiu para o impedimento do avanço da temperatura na superfície. As imagens ilustradas pelas Figura 4-14 e Figura 4-15 mostram a diferença da formação da camada intumescente. É possível observar que os dois corpos de prova não tiveram bolhas muito volumosas após o ensaio. No entanto, os corpos de prova com 300 μm de tinta intumescente apresentavam camada carbonosa residual levemente superior aos com 130 μm , que justificam o bom comportamento de retenção da temperatura. Foi possível observar fissuras na região das arestas dos perfis, que podem ser explicados pelo efeito de retração da tinta. É importante observar que esse surgimento de trincas está condicionado a espessura seca aplicada, sendo este fator crítico para o dimensionamento da espessura. A imposição de espessuras secas elevadas, pode promover maior aparecimento de trincas na camada espumífera. O comportamento da condutividade térmica calculada também corrobora com os resultados obtidos de temperatura. Pode-se observar valores de condutividade térmica próximos a 0,02-0,05 W/mK nos corpos de prova com 130 μm , contra os valores de 0,06-0,1 W/mK nos corpos de prova com 300 μm , compatíveis com a curva de temperatura do aço protegido. Nota-se a tendência de diminuição da condutividade térmica quando se inicia o processo de espumificação e em seguida de crescimento, após todo material reagente ser consumido.

Ao comparar os resultados obtidos para os corpos de prova P5 e P6, de seções transversais tubulares quadradas TQ100x4,75, observou-se uma diferença significativa na temperatura do substrato protegido entre os protegidos com 130 μm e 275 μm de tinta intumescente. A temperatura média máxima na superfície protegida foi de 563°C e 508°C, com o pico de temperatura atingido quando decorridos 46 minutos e 43 minutos do início do ensaio, respectivamente. Diante disso, concluiu-se que de fato o aumento da espessura seca de filme intumescente contribuiu para o impedimento do avanço da temperatura na superfície. As imagens ilustradas pelas Figura 4-16 e Figura 4-17 mostram a diferença da formação da camada intumescente, onde é visto que o perfil pintado com 275 μm teve maior formação de espuma, com bolhas se destacando ao longo da seção transversal. Um fator importante de se observar neste tipo de seção transversal foi o surgimento de grandes trincas na camada carbonosa na região das arestas. As trincas apresentaram maior relevância nos corpos de prova com 275 μm

de tinta intumescente e como dito anteriormente, tem relação com o processo de aplicação e com o efeito de retração da tinta durante o processo de cura. O comportamento da condutividade térmica calculada também corrobora com os resultados obtidos de temperatura. Podem-se observar valores de condutividade térmica compatíveis com a curva de temperatura do aço protegido nas amostras com 275 μ m, em que há uma tendência de diminuição da condutividade térmica quando se inicia o processo de espumificação atingindo valores próximos a 0,03-0,07 W/mK. As amostras com 130 μ m apresentaram condutividade térmica próximas a 0,07-0,12 W/mK. Em ambas, o comportamento da curva foi semelhante. Quando há a consumação do material, a condutividade térmica volta a crescer, visto que a camada residual pouco contribui para resistência ao fogo. A queda da condutividade térmica foi menor na seção transversal com menor espessura de proteção, que explica o maior valor de temperatura média encontrada. A Tabela 4-3 traz um resumo dos resultados obtidos por cada ensaio.

Tabela 4-3 - Resultados dos ensaios de perfis curtos protegidos

Seção	Perfil	Am/V	Espessura seca (μ m)	Temperatura média máxima ($^{\circ}$ C)	Tempo (min)	Condutividade térmica (W/mK)
P1	W150x13	404	130	570	44	0,025-0,075
P2	W150x13	404	500	514	34	0,07-015
P3	W200x31,3	231	130	540	41	0,02-0,05
P4	W200x31,3	231	300	506	34	0,06-0,10
P5	TQ100x4,75	219	130	563	46	0,03-0,07
P6	TQ100x4,75	219	275	508	43	0,07-0,12

Observa-se, portanto, que ao adotar diferentes valores de espessura seca de proteção intumescente relacionadas ao TRRF de 30 e 60 minutos, a variação média da temperatura máxima do substrato protegido foi de 48 $^{\circ}$ C entre as amostras de mesmo fator de massividade. A condutividade térmica diminuiu, como era esperado, para as amostras com maior espessura de tinta intumescente aplicada, além do fato da curva de variação da condutividade térmica ao longo do avanço da temperatura ter apresentado um padrão em todos os casos.

Ao se compararem os resultados obtidos no que diz respeito ao fator de massividade, pode-se observar que os perfis W150x13, que possuem maior fator de massividade quando comparados aos perfis W200x31,3, tiveram maior variação de temperatura média máxima. Em relação ao desenvolvimento da intumescência em perfis de diferentes composições geométricas,

observou-se que nas arestas das mesas dos perfis laminados e nas arestas do perfil tubular quadrado houve grande efeito de retração da tinta intumescente, como ilustrado na Figura 4-24. Conseqüentemente, quando formada a espuma, a trinca se mostrou como um ponto crítico de aquecimento do corpo de prova.



Figura 4-24 - Trinca na camada expansiva da tinta intumescente

4.6 Considerações finais

Este capítulo apresenta o conjunto de ensaios realizados em perfis metálicos curtos protegidos com diferentes espessuras de proteção intumescente, submetidas a ação térmica em um forno elétrico. O primeiro conjunto de ensaios foi feito com espessuras secas de proteção para TRRF de 30 minutos, envolvendo 3 tipos de seção transversal diferentes. O segundo conjunto de ensaios foi feito com espessuras secas de proteção para TRRF de 60 minutos, utilizando as mesmas seções transversais do primeiro conjunto. O forno elétrico utilizado foi configurado para promover um aquecimento com taxa igual a 20°C por minuto. Este valor diverge da curva padrão ISO834-1:1999, mas se faz necessário para análise do efeito intumescente.

A partir dos ensaios de perfis curtos, pode-se observar com clareza os efeitos físicos ocorridos durante a exposição ao calor dos materiais protegidos com tintas intumescentes. Com a metodologia implementada, foi possível observar a influência da forma da seção transversal, do fator de massividade e da espessura seca de proteção intumescente em cada um dos casos, além de relacioná-los na medida do possível.

A metodologia criada foi considerada eficaz, uma vez que apresentou resultados válidos de temperatura e condutividade térmica. Os resultados dos ensaios comprovaram a eficácia da proteção intumescente, principalmente para seções com maior fator de massividade. Ressalta-se ainda o cuidado necessário com a aplicação da tinta nas regiões de arestas, dado a observação de trincas e fissuras na camada carbonosa formada após o ensaio nessas regiões.

5 ENSAIOS DE INCÊNDIO NATURAL EM VIGAS AÇO PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE

5.1 Considerações Gerais

Neste capítulo, será abordado o desenvolvimento dos materiais e métodos utilizados para execução dos ensaios em escala real de vigas metálicas protegidas com tinta intumescente, submetidas ao incêndio natural e à flexão simples. Estes ensaios foram realizados nas instalações da Academia do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (CBMMG), no município de Contagem-MG, em um container metálico utilizado pela corporação para a simulação de incêndios naturais em ambiente controlado, adaptado para as condições do ensaio (Figura 5-1).



Figura 5-1- Container metálico utilizado nos ensaios de resistência ao fogo de vigas protegidas.

Buscou-se por meio destes ensaios de resistência ao fogo, observar o comportamento dos fenômenos físicos de variação da temperatura na superfície protegida, as taxas de expansão da camada intumescente, o comportamento quanto às flambagens locais no perfil em incêndio, bem como a obtenção da condutividade térmica da tinta para situação de incêndio natural. Deste modo, foram executados 3 ensaios de vigas em escala real, que serão descritos detalhadamente ao longo desta seção.

É importante ressaltar que a metodologia empregada não é normativa, sendo estes ensaios realizados com o objetivo de obter parâmetros numéricos e visuais a respeito do comportamento da tinta intumescente em estruturas metálicas.

5.2 Premissas Adotadas

Foram ensaiados protótipos de vigas de aço com 5 metros de comprimento, submetidas a uma condição de carregamento de flexão pura uniforme na região entre apoios. As seções transversais possuem as mesmas bitolas dos perfis ensaiados em pequena escala em fornos elétricos. Desta vez, as vigas foram submetidas à variação de temperatura e carregamento de flexão uniforme, correspondente a 30% do momento fletor resistente de cálculo em temperatura ambiente, calculado conforme prescrito no item 2.4. A aplicação desse carregamento solicitante foi executada com o posicionamento de duas cargas pontuais em cada uma das extremidades dos perfis, por meio de blocos pré-moldados de concreto. O modelo teórico dos esforços solicitantes na viga para a carga de 1 tf atuante nas extremidades é ilustrado pela Figura 5-2. Pode-se observar o momento fletor uniforme atuante na região entre apoios, que coincide com a região submetida à variação de temperatura.

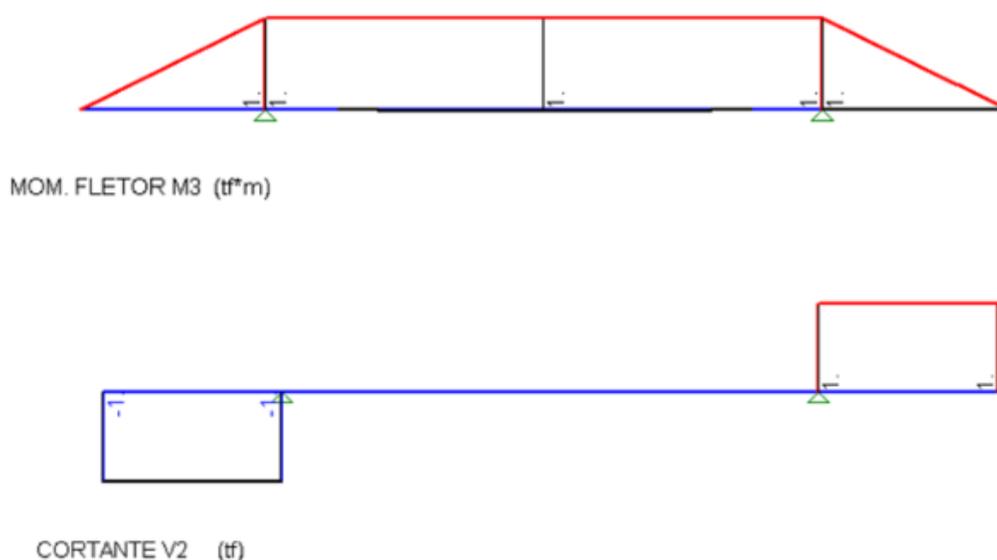


Figura 5-2- Modelo teórico dos esforços atuantes na viga para carga unitária.

Este modelo de diagrama apresenta similaridade com o de uma viga metálica principal em um nível de piso, recebendo vigas secundárias ao longo do seu comprimento, representado neste caso pelos apoios simples. No modelo de ensaio, há apenas a inversão do diagrama de momento

fletor, que seria positivo para o caso de vigas de piso. Logo, no modelo de ensaio proposto, tem-se compressão na mesa inferior e tração na mesa superior do perfil.

Dito isso, os protótipos protegidos com tinta intumescente receberam espessura seca de proteção característica para TRRF igual a 60 minutos, definidos em função do fator de massividade e da temperatura limite da superfície protegida do aço, ilustrados na Tabela 5-1. Estes valores foram pré-definidos pela carta do fabricante da tinta intumescente. Conforme descrito no item 2.5.2, o EN 1993-1-2:2010 estabelece como temperatura limite de projeto para vigas é de 550°C. Neste caso, utilizou-se 600°C para obter valores que possam indicar a temperatura crítica de falha. Entendeu-se nestes ensaios por temperatura crítica de falha, a temperatura aferida no tempo em que o protótipo apresentava alguma condição de instabilidade, fosse ela global ou local observada durante o ensaio. Variou-se também a seção transversal dos corpos de prova, de modo a avaliar o efeito de borda e a influência do fator de massividade na resposta a ação do fogo. Para organização dos resultados, os perfis foram nomeados de acordo com suas características geométricas, definidas na Tabela 5-2.

Tabela 5-1 - Dados dos perfis estruturais ensaiados e suas características.

Nome	Perfil	Representação esquemática da seção	Fator de massividade (cm/cm ²)	Espessura de tinta intumescente (µm)	Carregamento aplicado na extremidade (kN)	Temperatura limite de projeto (°C)
V1	TQ100X4,75		219	275	4,0	600
V2	W150X13		404	500	4,0	600
V3	W200X31,3		231	300	9,8	600

Tabela 5-2 - Propriedades geométricas dos perfis estruturais ensaiados.

Nome	Perfil	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _r (mm)	A _g (cm ²)	u (cm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
V1	TQ100X4,75	100	100	4,8	4,8	18,3	40	274	274
V2	W 150 x 13,0	148	100	4,3	4,9	16,6	67	635	82
V3	W 200 x 31,3	210	134	6,4	10,2	40,3	93	3168	410

Quanto a carga de incêndio utilizada nos ensaios, foram utilizados *pallets* de madeira tipo *pinus elliottii*, com densidade de 480 kg/m³. Com base na ABNT NBR 14323:2001, foi definida como

base o valor de carga de incêndio específica para ocupações típicas residenciais, com carga de incêndio, q_{fi} , igual a 300 MJ/m². Como ilustrado no item 3.2, a tinta intumescente utilizada nos ensaios é ativada em temperaturas próximas a 200°C e após os 600°C tem toda sua massa consumida e transformada em massa residual. Tendo em vista o objetivo de análise do comportamento intumescente, seus aspectos de espumificação e expansão carbonosa, não se justificaria a adoção de carga de incêndio específica superiores nesta proposta de ensaio, que promoveriam a degradação instantânea do material de proteção, dificultando as análises em função das curvas de temperatura medida pelos termopares.

No que diz respeito ao condicionamento das amostras, todas as vigas passaram pelo mesmo processo de pintura dos perfis de pequena escala, processo este descrito em 4.2. Após a cura da tinta intumescente aplicada, os perfis foram ensaiados seguindo o modelo teórico ilustrado pela Figura 5-3. Para aferição da temperatura da superfície protegida, foram soldados fios de termopar tipo K, em diferentes pontos, ao longo da seção transversal e do comprimento da viga, procedimento semelhante ao realizado com os perfis curtos ensaiados no capítulo 4. Esta solda foi executada com a máquina de solda EW-800, fornecida pela empresa VMV Costa. Vale ressaltar que o processo de solda dos termopares foi executado antes da pintura inicial dos perfis com a tinta primária de base epóxi.

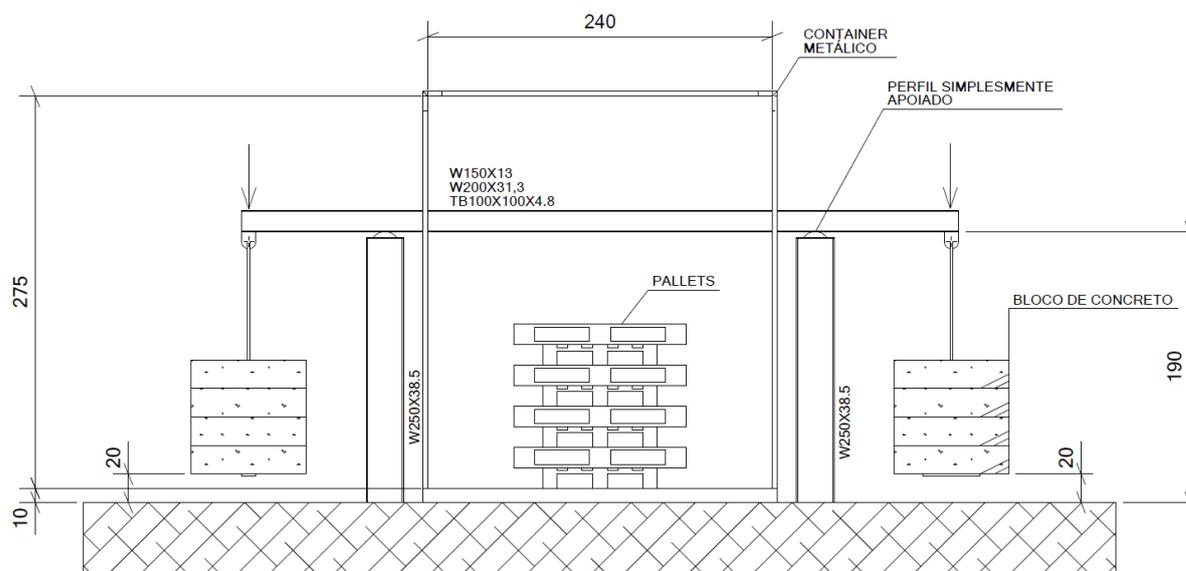


Figura 5-3- Modelo experimental de vigas protegidas.

5.3 Metodologia para Realização dos Ensaios

5.3.1 Descrição dos procedimentos de ensaio

Inicialmente, para calibração do ensaio, foi realizado um ensaio teste para verificar os níveis de temperatura dos gases dentro do compartimento e garantir que durante a execução dos ensaios com as vigas, as temperaturas atingiriam os patamares pretendidos. Com o posicionamento dos termopares de sonda para aferição da temperatura do compartimento durante o incêndio, foi colocada a carga de incêndio a ser utilizada nos ensaios de viga e iniciada a queima. Dado o sucesso da operação, foram iniciados os ensaios dos perfis de vigas protegidas com a curva de incêndio desejada.

Para adequação do ambiente de ensaio, foram feitas aberturas de 30cm x 50cm na parede lateral do container para possibilitar o posicionamento das vigas na configuração desejada. Durante a execução do ensaio, a abertura foi fechada com manta de lã cerâmica para concentração do calor dentro do ambiente de ensaio, evitando possíveis perdas de calor. Os perfis das vigas foram simplesmente apoiados em pilares metálicos W250x38.5, ancorados no solo. Este tipo de apoio foi definido para liberação do deslocamento longitudinal e a rotação do perfil durante o ensaio, causado pela dilatação térmica. Para isso, foram soldadas no topo dos pilares uma chapa curva, conforme ilustrado pela Figura 5-4.

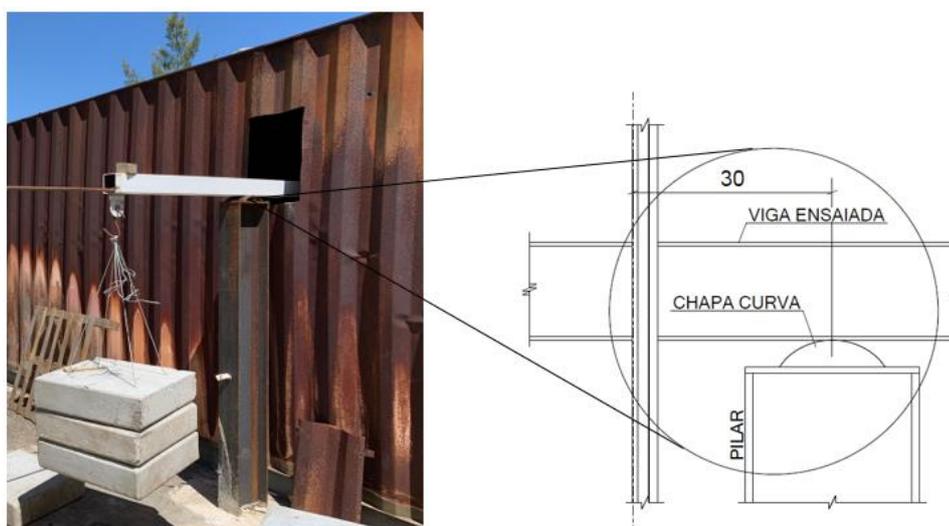


Figura 5-4- Adaptações necessárias para execução dos ensaios.

Utilizou-se por ensaio aproximadamente 9 *pallets*, conferindo peso total de 140 kg de madeira, pesado *in loco* em condição natural de umidade (aproximadamente 20% de teor de umidade).

Toda a carga de incêndio foi mantida em ambiente seco e arejado até a execução do ensaio. Antes dos ensaios, os *pallets* foram desmontados para promover uniformidade na carga de incêndio e facilitar a ignição do fogo, uma vez que os *pallets* utilizados possuíam diferentes composições de peso e geometria. As peças possuíam dimensões aproximadas de 120x12x5cm (comprimento x largura x espessura). Para ignição do fogo, foi utilizada álcool em gel (isopropanol) apropriado para a ignição de churrasqueiras e fornalhas, tipo 70%. Para ignição por completo da carga de incêndio, quatro pilhas de material comburente eram dispostas conforme a Figura 5-6. Além disso, foram posicionadas canaletas de 1 metro de comprimento por debaixo das pilhas, com manta de lã cerâmica encharcadas de álcool para dar continuidade a chama inicial e facilitar o procedimento de ignição do fogo sem riscos para a equipe.

Inicialmente, posicionou-se a viga nas aberturas laterais criadas no container com o auxílio de um caminhão Munck e guincho hidráulico móvel. Em seguida, foram içados os pesos e colocados nos olhais soldados à extremidade da viga, conforme definido na Tabela 5-1 e visualizado na Figura 5-5.



Figura 5-5- Montagem do *set-up* de ensaio com auxílio de caminhão Munck.

Após essa etapa, a carga de incêndio era pesada com o auxílio de uma balança e depois era posicionada no interior do container em quatro pilhas, de maneira uniformemente distribuída na área, conforme a Figura 5-6.



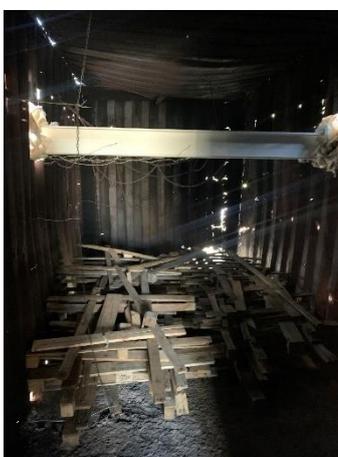
Figura 5-6- Carga de incêndio posicionada para início do ensaio.

Foram tomados cuidados para que a chama não incidisse diretamente na superfície protegida, evitando danos localizados na estrutura. O incêndio localizado pode comprometer o comportamento da tinta intumescente, conforme mostraram as pesquisas desenvolvidas por Xu *et al* (2021).

A configuração final do ensaio montado pode ser vista na Figura 5-7 e foi repetida para todos os ensaios, alterando apenas a carga das extremidades conforme a Tabela 5-1. É possível observar o posicionamento das mantas de lã cerâmica fechando a abertura das janelas e protegendo os fios de termopar da radiação do calor durante o ensaio. Todas essas medidas cautelares foram adotadas como preventivas para evitar danos aos equipamentos e instrumentação de medição.



(a) Lado esquerdo



(b) Parte interna



(c) Lado direito

Figura 5-7- Configuração final da montagem do ensaio de vigas protegidas.

5.3.2 Instrumentação dos corpos de prova e do ambiente de ensaio

Para o ensaio das vigas protegidas submetidas a flexão simples, foram posicionados 10 termopares do tipo K distribuídos ao longo da altura do compartimento (árvores de termopares) e da área para aferição uniforme da temperatura dos gases do incêndio. Os termopares, designados por TMPS, foram inseridos dentro do ambiente cerca de 50 centímetros e 100 centímetros, conforme pode ser visto pelos esquemas ilustrados na Figura 5-8 e Figura 5-9. Todos os fios termopares eram revestidos com fibra de vidro, com proteção garantida para temperaturas de até 1200°C, evitando erros nas medições durante os ensaios.

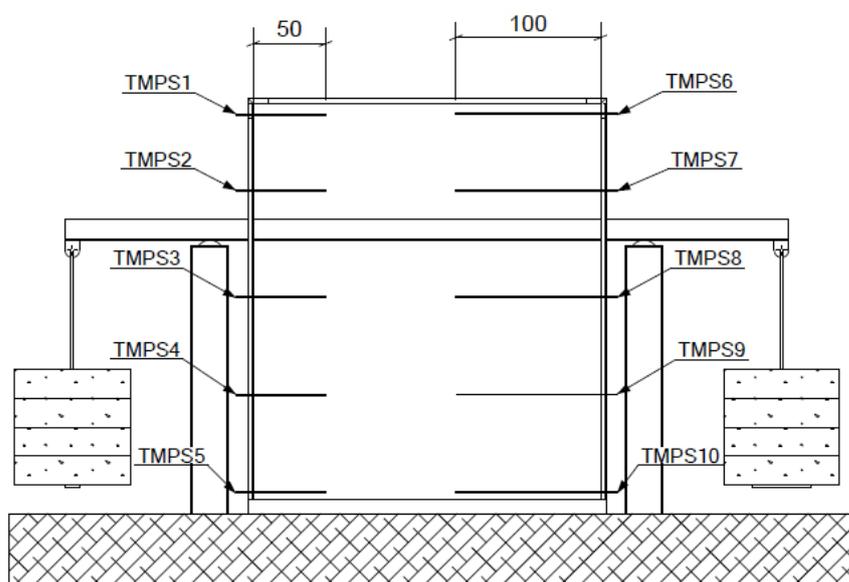


Figura 5-8- Posição em corte dos termopares de sonda para aferição da temperatura no compartimento.

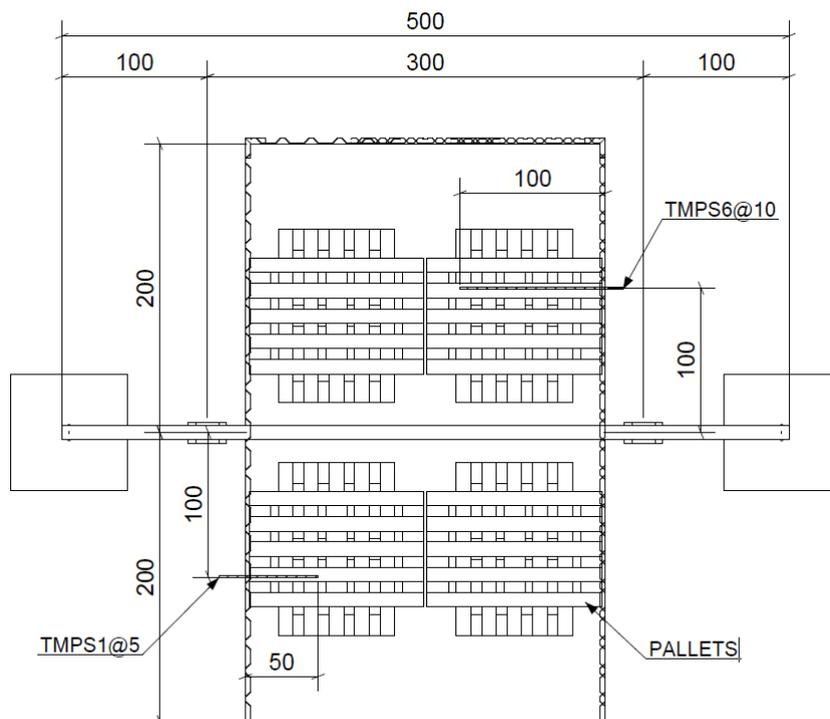


Figura 5-9- Posição em planta dos termopares de sonda para aferição da temperatura no compartimento

Para evitar o deslocamento da ponta do fio termopar pela movimentação dos gases durante o incêndio, foram colocadas correntes de aço do teto até o chão do container e os termopares foram presos com arame cozido. A condição realista do ensaio, no que diz respeito à instrumentação para aferição da temperatura dos gases do incêndio é ilustrada pela Figura 5-10.

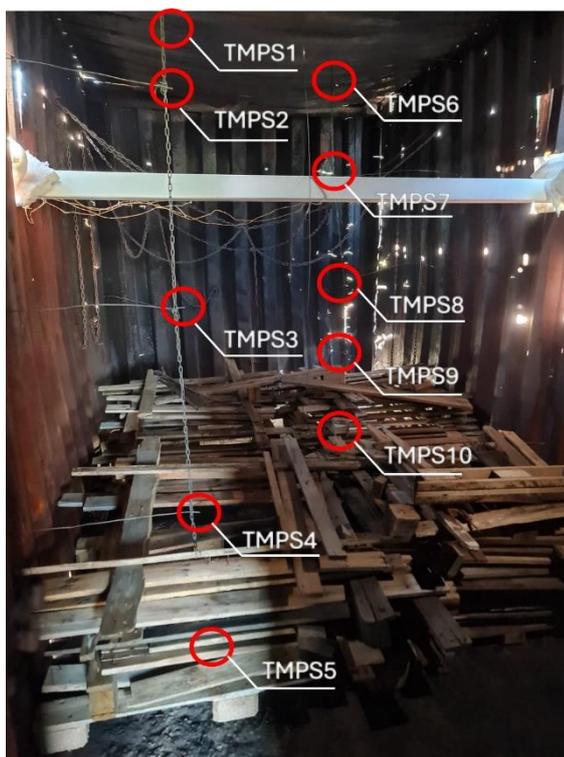


Figura 5-10- Fixação dos termopares de sonda TMPS dentro do ambiente de ensaio.

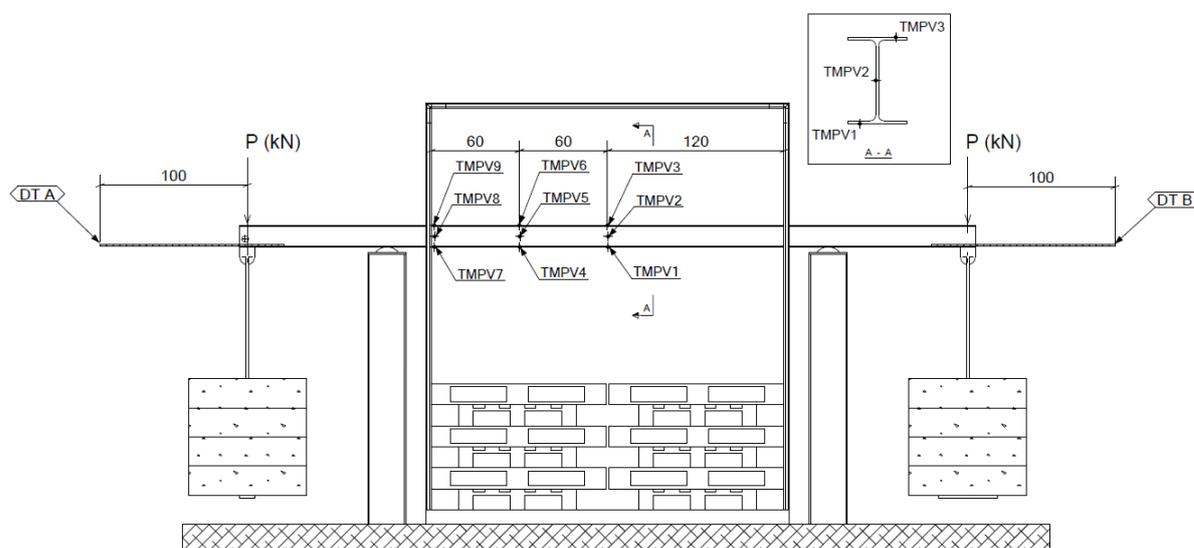


Figura 5-11- Posição e nomeação dos termopares e LVDT's para instrumentação da viga.

Quanto à medição da temperatura da superfície protegida da viga, 9 termopares tipo K nomeados de TMPV1 a TMPV9 foram soldados na mesa e na alma dos perfis laminados. Para o perfil tubular TQ100x4,75, foram soldados 6 termopares tipo K nas faces superior, lateral e inferior. Estes foram nomeados de TMPV1 a TMPV6. Quanto à posição longitudinal, os termopares foram posicionados a meio vão ($L=1/2.L$), um quarto do vão ($L=1/4.L$) e na

interface entre a face do container e o ambiente externo ($L=0$), como pode ser visto na Figura 5-11. Estes termopares foram soldados através de um sistema de solda capacitiva de 3 fios, em diferentes pontos ao longo da seção transversal e comprimento do perfil. Este processo de soldagem foi executado utilizando uma máquina de solda EW-800 da marca VMV Costa. A soldagem foi feita previamente à pintura dos perfis com primer à base de epóxi.

A aquisição de dados nos ensaios foi feita com um sistema de aquisição de dados ADS2002 equipado com condicionador AI2164 da LINX Technology. Os transdutores de deslocamentos, nomeados como DTA e DTB, foram dispostos nas extremidades da viga com a adaptação de uma haste metálica que prolongava o ponto de medição em 1 metro. Na Figura 5-7 é possível ver a configuração real da posição do ponto de medição do LVDT, em consonância com o modelo teórico apresentado na Figura 5-11. Foi necessária essa adaptação com um tripé metálico para que o equipamento LVDT não sofresse com o superaquecimento provocado pela radiação de calor proveniente da superfície metálica do container, durante a simulação do incêndio. Os LVDT's foram suspensos com o auxílio de um tripé de alumínio e conectados ao sistema de aquisição de dados. Após o final do ensaio, foram efetuadas medições manuais dos deslocamentos da viga, com o auxílio de trena metálica. Estes valores foram comparados ao deslocamento registrado pelo LVDT. Na Figura 5-12, os pontos de medição rotulados como h1, h2, h3, h4 e h5 foram destacados como pontos para registrar o deslocamento vertical.

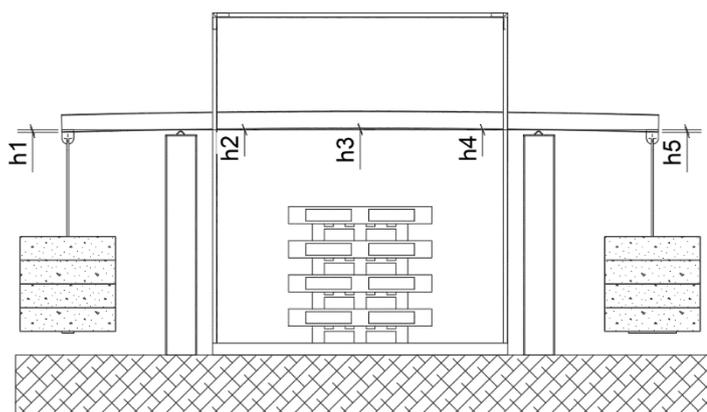
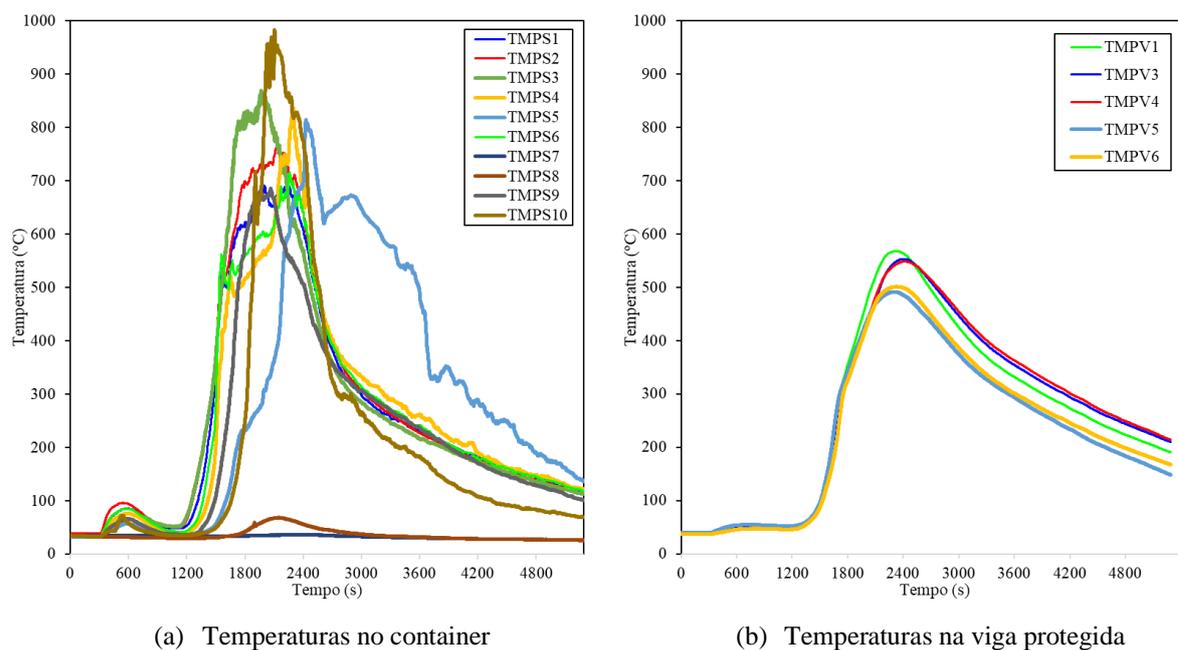


Figura 5-12 - Pontos de aferição da medida de deslocamento manual após o ensaio

5.4 Resultados Obtidos

5.4.1 Temperatura dos gases e do perfil protegido

A partir das aferições feitas pelos termopares tipo K, apresentam-se a seguir os resultados das curvas de temperatura obtidas para os três ensaios da viga protegidas em escala real, submetidas à condição de incêndio natural. Na Figura 5-13, têm-se os perfis de temperatura obtidos para a viga V1, com perfil TQ100X4,75 com espessura de proteção igual a 275 μm .



(a) Temperaturas no container

(b) Temperaturas na viga protegida

Figura 5-13 – Temperaturas atuantes durante o ensaio da viga V1- TQ100X4,75.

Na Figura 5-13, o gráfico mostra que os maiores valores de temperatura da câmara de combustão foram medidos pelos termopares TMPS3 e TMPS10. Todas as unidades apresentaram valores consistentes conforme o esperado, exceto os termopares TMPS7 e TMPS8 que apresentaram erros durante o ensaio. O pico de temperatura foi atingido cerca de 1800 segundos após o início do ensaio. Ao analisar o gráfico que representa a temperatura do substrato de aço protegido para V1-TQ100x4,75, ficou evidente que todos os termopares apresentaram curvas com temperatura máxima próxima a 2400 segundos.

Posicionados no ponto médio do vão, os termopares rotulados como TMPV1, TMPV3 e TMPV4 registraram as temperaturas médias mais altas. O TMPV2 acusou erro durante o ensaio e, portanto, foi excluído dos resultados. Situados na extremidade próxima à janela do contêiner, TMPV5 e TMPV6 apresentaram as menores temperaturas registradas, como esperado.

Na Figura 5-14, têm-se os perfis de temperatura obtidos para a viga V2, com perfil W150X13, com espessura de proteção igual a 500 μm .

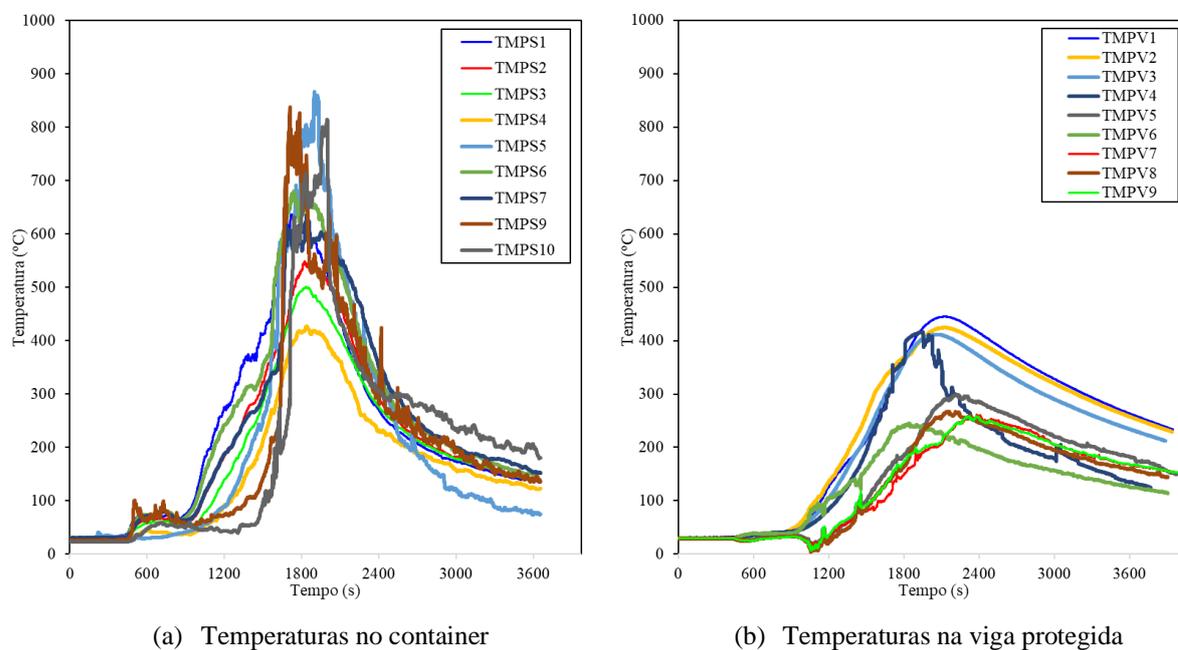


Figura 5-14 – Temperaturas atuantes durante o ensaio da viga V2- W150X13.

Analisando o gráfico ilustrado na Figura 5-14, o TMPS8 apresentou erro durante o ensaio e foi excluído dos resultados. Como esperado, os valores máximos foram registrados pelo TMPS5 e TMPS10, localizados na parte superior do contêiner, onde o gás proveniente da queima eleva a temperatura. A temperatura máxima foi atingida cerca de 1850 segundos após o início do ensaio. Em relação à temperatura média da viga protegida, é possível notar que TMPV1, TMPV2 e TMPV3, localizados no centro do perfil, registraram as temperaturas mais elevadas. O TMPV4, localizado na parte inferior do perfil, a 60 cm do ponto médio, mediu temperaturas próximas às registradas pelos termopares localizados no centro do perfil. Isso mostra a variação de temperatura obtida entre a face superior e inferior da seção transversal, bem como a diferença entre pontos ao longo do comprimento e é justificado pelo TMPV4 estar na face inferior e sofrer com o aquecimento mais direto que nos outros pontos da seção. As temperaturas mais baixas, assim como no ensaio V1-TQ100X4.75, foram obtidas por termopares localizados próximos à janela do contêiner. Nenhum termopar soldado ao substrato de viga protegido apresentou erro durante o ensaio.

Na Figura 5-15, têm-se os perfis de temperatura obtidos para a viga V3, com perfil W200x31,3 com espessura de proteção igual a 300 μm .

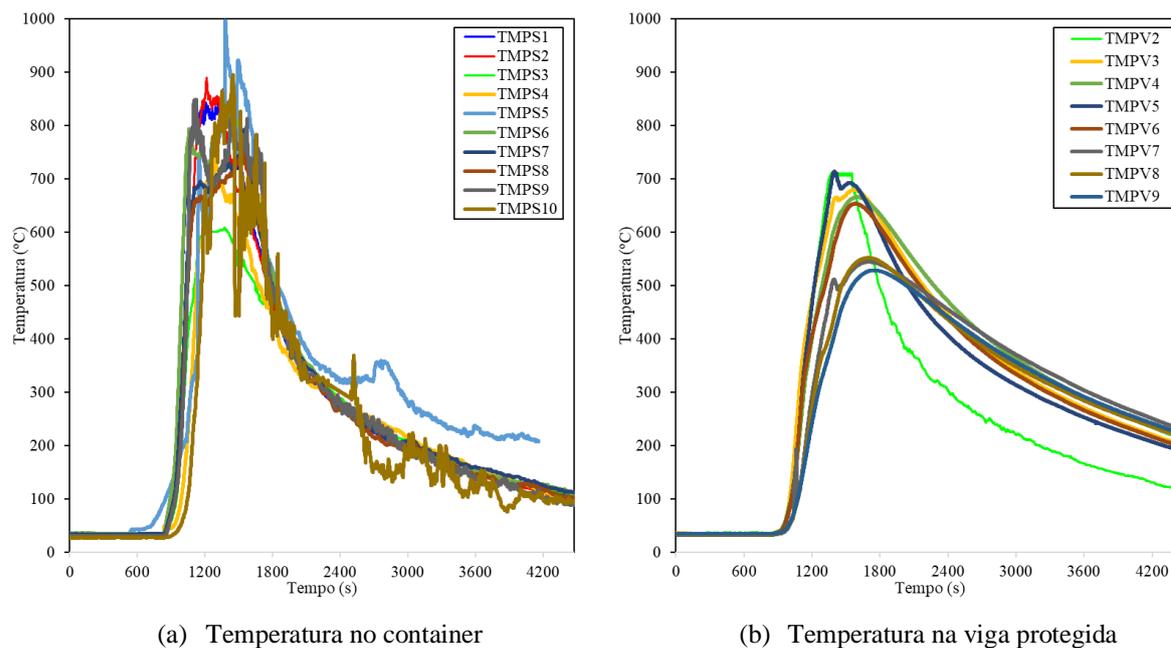


Figura 5-15 – Temperaturas durante o ensaio da viga V3- W200X31,3.

Na Figura 5-15, é possível observar que o pico de temperatura de incêndio foi atingido mais cedo em relação às vigas V1-TQ100X4.75 e V2-W150X13, aproximadamente aos 1200 segundos. Neste ensaio, pode-se observar que a taxa de aquecimento foi maior do que nos dois primeiros ensaios, fato confirmado pela inclinação das curvas de temperatura da Figura 5-15. As temperaturas máximas foram registradas pelo TMPS5 e TMPS10, localizados na parte superior do contêiner, onde o concentrado de gases provenientes do incêndio eleva a temperatura. Nenhum termopar posicionado na câmara de combustão apresentou erro durante o ensaio. Em relação à temperatura média da viga protegida, o TMPV1 apresentou erro durante o ensaio e foi excluído dos resultados. Mesmo assim, é possível notar que TMPV2 e TMPV5, localizados na alma do perfil, registraram as temperaturas mais elevadas. As temperaturas mais baixas, como nos ensaios V1-TQ100X4.75 e V2-W150X13, foram obtidas por termopares localizados próximos à janela do contêiner.

As temperaturas da câmara de combustão mostradas pelos gráficos de cada ensaio permitem calcular a temperatura média dos gases de incêndio ao longo do tempo. Esta temperatura média foi utilizada para comparar com a temperatura da viga protegida em aço. Utilizando média ponderada para calcular a temperatura média com base na área de influência de cada ponto de medição, foi calculado a temperatura média atuante em cada seção aferida dos perfis. Com base nos resultados apresentados nos gráficos acima, têm-se as temperaturas do substrato protegido pelo aço em cada ponto de medição: meio do vão ($L=1/2 \cdot L$); um quarto de vão ($L=1/4 \cdot L$);

extremidade da janela do container ($L=0$). Com base nisso, foram criados os gráficos que resumizam os resultados obtidos, conforme as Figura 5-16, Figura 5-17 e Figura 5-18.

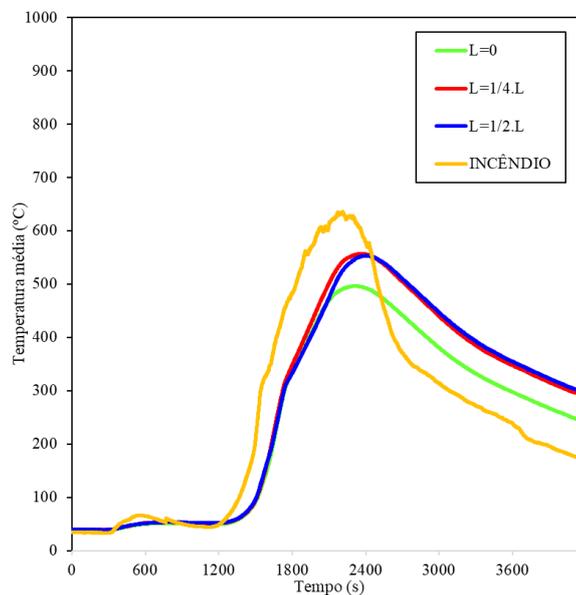


Figura 5-16 - Temperatura média do compartimento e da viga V1- TQ100X4,75, protegida.

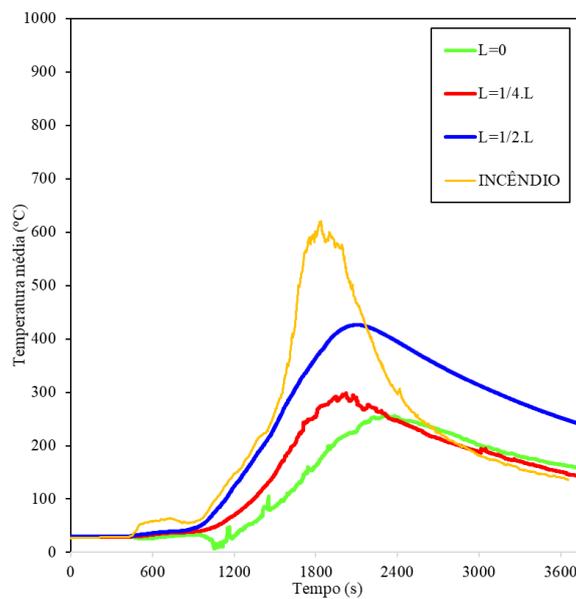


Figura 5-17 - Temperatura média do compartimento e da viga V2- W150X13 protegida.

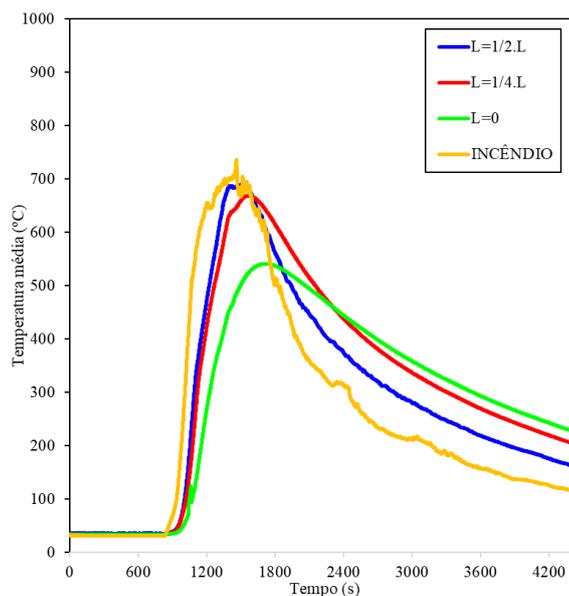


Figura 5-18 - Temperatura média do compartimento e da viga V3- W200X31,3 protegida.

Comparando os resultados de diferentes corpos de prova, o desempenho da tinta intumescente na viga V2-W150X13 foi notável. Conforme estudado por Billota (2016), perfis com alto fator de massividade sofrem maior evolução de temperatura no aço e por isso necessitam de maior espessura de proteção. Com fator de massividade maior, foi aplicada uma espessura seca de tinta intumescente equivalente a 500 μ m, garantindo proteção térmica mais eficiente das seções de aço em comparação às vigas V1-TQ100X4.75 e V3-W200X31.3. A Figura 5-17 ilustra que a temperatura média no aço protegido foi menor na viga V2-W150X13 do que nas demais vigas. Em todos os casos, a temperatura média do aço protegido foi menor no ponto de medição próximo à janela. Essa diferença pode ser atribuída à perda de calor para o ambiente externo, apesar da utilização de mantas de lã cerâmica cobrindo a abertura. Comparando a diferença entre a temperatura média da câmara de combustão e a temperatura média do aço protegido, o V2-W150X13 demonstrou que a tinta intumescente é mais eficaz neste cenário. A viga V3-W200X31.3 foi o único ensaio em que a tinta intumescente não teve o desempenho esperado, pois a temperatura média do aço protegido foi semelhante à temperatura média da câmara de combustão em pontos de medição específicos no meio e em um quarto da viga. Analisando o fator de massividade em relação aos resultados obtidos, pode-se deduzir que nos perfis com maior fator de massividade, a tinta intumescente apresentou melhor eficiência na proteção contra incêndio, como visto no corpo de prova V2-W150X13.

5.4.2 Comportamento expansivo da tinta intumescente

Após o resfriamento do ambiente de ensaio, o desempenho da espuma carbonosa da tinta intumescente foi avaliado e registrado por fotografias, conforme as Figura 5-19, Figura 5-20 e Figura 5-21. Por meio do registro fotográfico, pode-se estabelecer correlações entre a formação da camada intumescente e das curvas de temperatura, uma vez que o bom comportamento da tinta intumescente está diretamente associado ao bom desempenho na proteção contra o fogo.



(a) (b)
Figura 5-19 - Expansão da tinta intumescente na viga V1-TQ100X4,75.

Na Figura 5-19 é mostrada a evolução da camada intumescente do corpo de prova V1-TQ100x4,75, indicando um desenvolvimento proporcional da intumescência nas faces. Porém, devido ao efeito de retração da tinta durante o processo de secagem, as bordas tornam-se um ponto crítico ao calor do perfil de aço, conforme observado também nos ensaios em perfis curtos. A tensão superficial da tinta em seu estado líquido faz com que durante o processo de secagem, a tinta se acumule nas regiões planas, fazendo com que na região da aresta, a tinta sofra com uma redução da espessura média aplicada. Estes resultados são compatíveis com a observação feita por Mesquita (2015) nos seus ensaios de resistência ao fogo. Neste caso, o autor observou que o desenvolvimento da camada intumescente foi maior nas regiões da face com menor expansão nas regiões de vértice da seção transversal. Sendo assim, com base nas medições realizadas após o resfriamento da viga, constatou-se que o inchamento da camada porosa variou de 5 a 8 mm em toda a seção. O desenvolvimento da fissura na camada intumescente ao longo de toda a borda do perfil foi contínuo, como pode ser observado na Figura 5-19. Além disso, o deslocamento vertical da viga induziu fissuras na face da camada intumescente.



(a) (b)
Figura 5-20 - Expansão da tinta intumescente na viga V2-W150X13

Na Figura 5-20 é ilustrada a evolução da camada intumescente durante o ensaio de fogo, que devido ao elevado fator de massividade, o perfil de aço foi protegido com espessura de $500\mu\text{m}$. O desenvolvimento da intumescência foi bom e uniforme, com formação de bolhas e espuma densa ao longo da seção transversal. Este efeito está em linha com as temperaturas da superfície protegida, apresentando uma maior diferença nas temperaturas dos gases de incêndio. Vale ressaltar que não foi observada formação de fissuras nas regiões de borda do perfil. Porém, conforme observado por Mesquita (2015), o desenvolvimento da camada espumífera nas almas foi maior do que nas mesas do perfil, isso é explicado pelo fato do aquecimento na alma ocorrer de forma mais lenta do que nos banzos, favorecendo a formação de camada de espuma. Esse aquecimento lento ocorre devido ao efeito de condução térmica com as regiões adjacentes do ponto de medição.

Medições feitas após o resfriamento da viga indicaram que o desenvolvimento da camada espumífera variou de 10 a 20 mm. Como o deslocamento vertical da viga V2-W150X13 foi pequeno, isso não provocou o aparecimento de fissuras na camada intumescente, como observado na viga V1-TQ100X4.75.



(a)

(b)

Figura 5-21 - Expansão da tinta intumescente na viga V3-W200X31,3

A Figura 5-21 mostra a evolução da camada intumescente durante o incêndio para este caso, onde o desenvolvimento da camada intumescente não foi satisfatório no processo de formação de bolhas. Isso pode ser atribuído à curva de aquecimento mais severa, conforme observado e constatado nos gráficos da Figura 5-15.

Conforme observado em ensaios termogravimétricos realizados em laboratório, para corpos de prova com taxas de aquecimento de $25^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, fase final responsável pela formação de o espumoso apresentou menor variação de massa em comparação aos corpos de prova com taxas mais baixas. Isso explica a formação limitada de bolhas no ensaio da viga V3-W200X31.3. Ao longo de todo o trecho, o desenvolvimento da camada intumescente foi baixo, medindo aproximadamente 1 a 3 milímetros.

Ao comparar os resultados dos ensaios das três vigas, observa-se uma relação direta entre o bom desenvolvimento da camada intumescente e a curva de temperatura do substrato metálico protegido. A viga V2-150X13 apresentou o desenvolvimento mais significativo da camada intumescente entre os 3 ensaios. Em termos de temperatura, houve uma diferença maior entre a temperatura média dos gases na câmara de combustão e a temperatura média do substrato de aço protegido.

5.4.3 Condutividade térmica da tinta intumescente

Com base nos resultados de temperatura do substrato metálico protegido e da temperatura dos gases do interior do container, além dos parâmetros cinéticos e geométricos dos materiais

utilizados nos ensaios, pode-se obter as curvas de variação da condutividade térmica ao longo do tempo, descritas pelas equações (2-8) e (2-11), extraídas das metodologias empregadas por Dai (2009) e por Mesquita (2015). Essa metodologia é uma alternativa sugerida pelo Anexo E da norma EN13381-3:2010, para materiais de proteção com variação de espessura, como é o caso das tintas intumescentes.

A Figura 5-22 ilustra o comportamento da condutividade térmica para o ensaio do perfil V1-TQ100x4,75, protegido com 275 μm de espessura filme seco de tinta intumescente. A Figura 5-23 mostra a curva para o ensaio da viga V2-W150X13 e a Figura 5-24 ilustra o comportamento da curva para o ensaio da viga V3-W200X31.3.

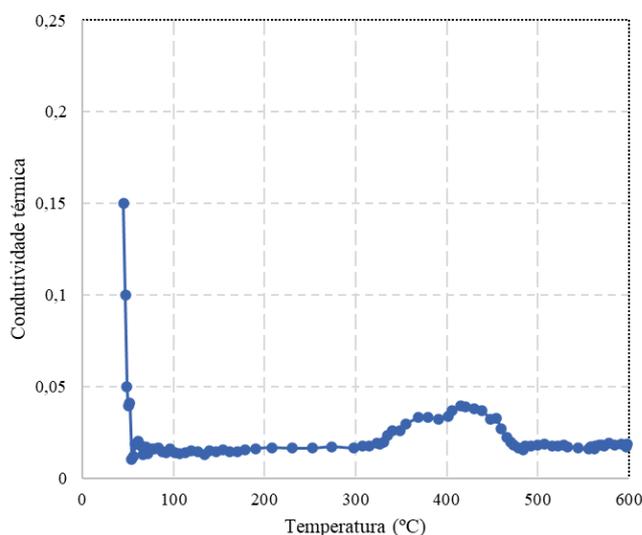


Figura 5-22 - Condutividade térmica da viga V1-TQ10X4,75 – 275 μm

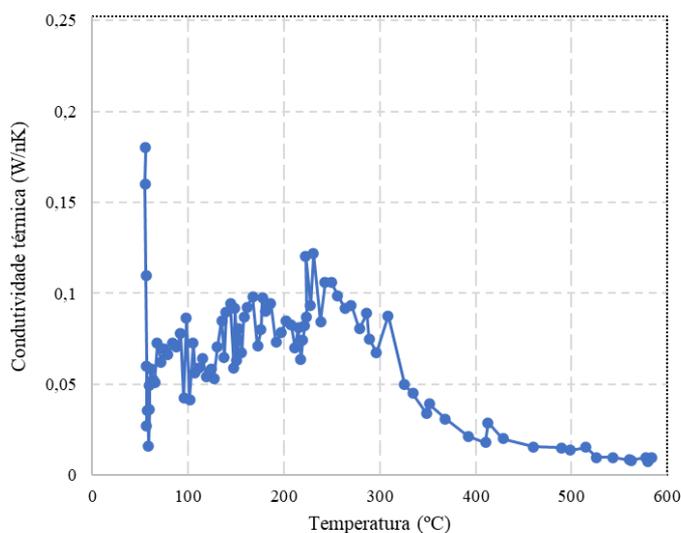


Figura 5-23 - Condutividade térmica da viga V2-W150X13 – 500 μm

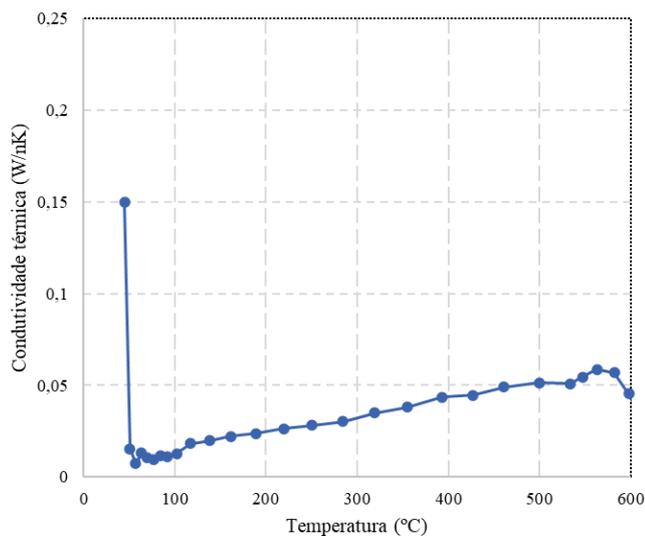


Figura 5-24 - Condutividade térmica da viga V3-W200X31.3 – 300 µm

Para a viga V1-TQ100X4.75, a condutividade térmica calculada na Figura 5-22 suporta os resultados de temperatura obtidos, apresentando valores consistentes com a curva de temperatura média do aço protegido para os três ensaios. Devido ao comportamento reativo ao fogo, a curva de condutividade térmica da tinta intumescente apresenta não linearidade com o aumento da temperatura. Para os três ensaios a variação permaneceu entre 0,005 e 0,15 W/mk. Para a viga V1-TQ100X4.75, é perceptível uma tendência de variação da condutividade térmica da tinta à medida que a formação da camada carbonosa se inicia, próximo à temperatura de 300°C, atingindo valores próximos a 0,039 W/mK. O início do processo de espumificação é determinado com base nos ensaios de TG e no comportamento da curva de temperatura da Figura 5-16, que mostra um distanciamento da temperatura do aço protegido da temperatura dos gases de incêndio, causado pelo início da formação de espuma. Portanto, o início da reação de formação de espuma leva a uma diminuição na condutividade térmica e na temperatura.

A Figura 5-23 mostra a condutividade térmica em função da temperatura para a viga V2-W150x13, protegida com espessura de tinta intumescente de 500 µm. Este resultado foi semelhante à curva de condutividade térmica obtida por Krishnamoorthy (2011) em sua pesquisa. Com a grande variação até o limite de 0,122 W/mK antes do início da expansão volumétrica, a curva apresenta uma queda acentuada após a reação da tinta intumescente ao fogo, o que comprova o comportamento protetor do perfil de aço. Os baixos valores de condutividade térmica observados quando a temperatura ultrapassa os 300°C são o que garante a proteção contra incêndio.

A Figura 5-24 mostra a condutividade térmica em função da temperatura para a viga V3-W200X31.3, revestida com uma película seca de tinta intumescente de 300 μm de espessura. Neste caso, os valores de condutividade térmica apresentam divergências com relação aos resultados de temperatura obtidos. Como visto nos gráficos de temperatura e na observação do desenvolvimento da camada intumescente, a viga V3-W200X31.3 não apresentou resultados satisfatórios nessa etapa, no entanto a curva de condutividade térmica apresenta resultados baixos, indicando bom comportamento da tinta, o que não é observado na realidade. Uma comparação com outros resultados de ensaios revela que neste caso foram observados os maiores valores de condutividade térmica quando a temperatura excedeu 300°C, indicando que a proteção contra o incêndio oferecida pela tinta intumescente não foi tão eficaz como nos ensaios V1-TQ100X4.75 e V2-W150X13. Percebe-se que há tendência crescente nos valores de condutividade térmica, em torno de 0,007 W/mK durante a fase inicial da reação de formação de espuma e 0,058 W/mK na fase final. À medida que ocorre a reação expansiva da tinta intumescente, espera-se que a condutividade térmica comece a diminuir, promovendo a proteção contra o aquecimento do aço, mas isso não foi observado neste ensaio.

Dessa forma, pode-se concluir que a equação implementada para cálculo da condutividade térmica carece de implementações para abordagem de curvas de aquecimento mais rápidas, como foi o caso do ensaio da viga V3-200X31.3.

Comparando os resultados obtidos nos três ensaios, observa-se que a condutividade térmica da tinta intumescente converge com os resultados de temperatura e observação visual no desempenho da formação de espuma nos ensaios das vigas V1-TQ100X4.75 e V2-W150X13. A viga V2-W150X13 exibiu a menor condutividade térmica e temperaturas, ao mesmo tempo que exibiu a formação de bolhas mais uniforme e espessa entre todos os ensaios.

5.4.4 Deslocamentos verticais nas extremidades

Como descrito na metodologia de instrumentação dos ensaios, para os deslocamentos e modos de flambagem globais foram utilizados os transdutores de deslocamento e trena metálica. Após o resfriamento da viga, as medidas de deslocamento final foram realizadas manualmente com fita métrica nos pontos designados indicados na Figura 5-12. Os valores obtidos para cada ensaio estão apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 - Deslocamentos verticais medidos manualmente após o ensaio

Seções	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h5 (mm)	LVDT (mm)
TQ100X4,75	-27	-11	-33	-10	-24	38,8
W150X13	-3	-4	-5	-3	-2	5,2
W200X31,3	-2	-5	-7	-5	-3	10,4

A Figura 5-25 traz o resultado aferido pelos medidores de deslocamentos posicionados nas extremidades da viga para os três ensaios realizados. Estas medições foram feitas em tempo real, durante o ensaio, nos pontos de extremidade das vigas.

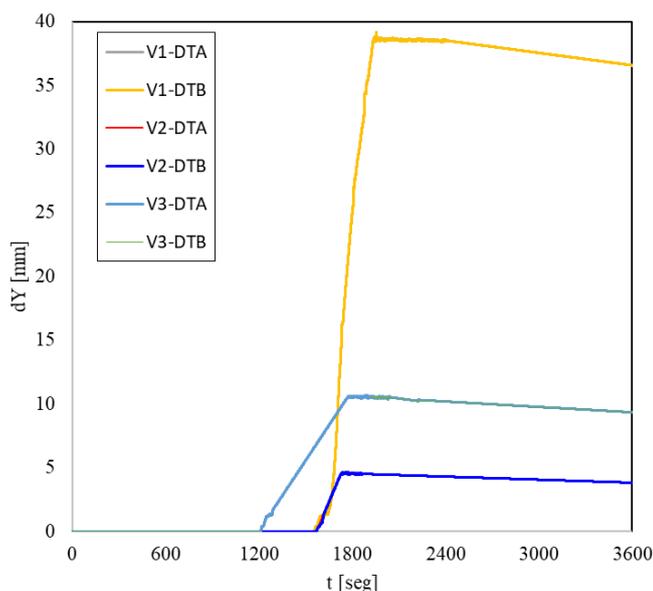


Figura 5-25 - Deslocamentos verticais medidos nas vigas no decorrer do tempo

Em relação aos deslocamentos e modos de flambagem globais e locais observados, pode-se concluir que os valores apresentaram coerência com as temperaturas no substrato metálico e com o momento de inércia da seção, uma vez que a temperatura do perfil metálico protegido não ultrapassou os limites necessários para induzir a flambagem local na viga. Em relação à flambagem global das vigas, maiores deslocamentos verticais foram observados na viga V1-TQ100X4.75, perfil tubular quadrado com menor momento de inércia em comparação às demais vigas ensaiadas. Outra observação importante diz respeito ao tempo dos deslocamentos máximos na viga V1-TQ100X4.75, medido pelo LDVT. Enquanto a média das temperaturas máximas registradas na viga foi atingida aos 37 minutos, o deslocamento máximo foi observado aos 34 minutos.

No ensaio V2-W150X13, o desempenho eficiente da tinta intumescente evitou que a viga atingisse altas temperaturas, impedindo a degradação de suas propriedades mecânicas de

resistência ao escoamento e módulo de elasticidade. Por outro lado, o corpo de prova V3-W200X31.3, com sua alta inércia, resistiu às cargas e temperaturas impostas sem sofrer flambagem local e global, mesmo que a tinta intumescente não tivesse o desempenho esperado. Os valores de deslocamento obtidos desempenharão um papel crucial na calibração de um próximo modelo numérico baseado nos dados de ensaio.

5.5 Discussão dos Resultados

O ensaio de vigas protegidas foi executado com o objetivo de se avaliar o desempenho das tintas intumescentes em uma situação de incêndio real, com a ocorrência dos efeitos de aquecimento localizado e condições térmicas de radiação e transferência de calor distintas das encontradas em um ambiente de um forno elétrico em laboratório. Baseado nos parâmetros e resultados obtidos, a metodologia adotada foi considerada eficaz para o estudo e análise do desenvolvimento da temperatura na superfície protegida por tintas intumescentes nas condições mencionadas. Com este ensaio, pode-se avaliar o comportamento do processo expansivo da tinta intumescente para TRRF de 60 minutos e carga de incêndio característica residencial igual a 300 MJ/m².

A metodologia implementada se dispôs a avaliar a influência do fator de massividade e da composição geométrica dos perfis no desenvolvimento da camada intumescente, ao utilizar seções de diferentes bitolas de aço estrutural. Também foi possível avaliar os modos de flambagem globais e locais das vigas ensaiadas, observando possíveis pontos de entrada de calor por fissuras e/ou trincas que poderiam surgir na superfície da camada espumífera da tinta intumescente. Sobretudo, a curva de incêndio adotada infere grande responsabilidade nos resultados, uma vez que o efeito da ação térmica no forno elétrico mantém uma razão uniforme de crescimento, ao contrário da curva de aquecimento obtida para o ensaio real de vigas. Desta forma, o ambiente do forno confere ao protótipo ensaiado uma uniformidade no aquecimento, por aquecer igualmente em todos os lados da parede do forno. Essa situação não é observada em incêndios reais, que por muitas vezes promove a ação localizada do fogo nos elementos metálicos e com taxas de aquecimento variáveis em função do tempo.

Para discussão dos resultados, seguindo a ordem em que foram executados os ensaios no campo, será feita uma análise dos resultados obtidos para a viga V1, com perfil TQ100x4,75. Com as curvas de temperatura obtidas para a temperatura dos gases do ambiente incendiado e temperatura do substrato metálico protegido, pode-se observar uma diferença significativa entre

a temperatura máxima média dos gases do incêndio, próxima a 635°C e a temperatura máxima média medida no aço, equivalente a 556°C. O pico de temperatura foi atingido quando decorridos 37 minutos do início do ensaio. Diante disso, concluiu-se que de fato o aumento da espessura seca de filme intumescente contribuiu para o impedimento do avanço da temperatura na superfície.

Além disso, pode-se observar o efeito de expansão da tinta intumescente na seção. As imagens ilustradas pela Figura 5-19 mostram a evolução da camada intumescente no incêndio, onde é visto que o desenvolvimento da espuma nas faces teve uma proporcionalidade, enquanto nas arestas, pelo efeito de retração da tinta também observado nos ensaios de perfis curtos, faz com que este local seja um ponto crítico de entrada de calor na estrutura. Coerente com o resultado obtido por Mesquita (2015), houve um melhor desenvolvimento da camada espumífera nas faces em relação as arestas do perfil, fato explicado pelo efeito de retração provocado pela tensão superficial da tinta intumescente durante o processo de secagem.

O comportamento da condutividade térmica calculada também corrobora com os resultados obtidos de temperatura. Pode-se observar valores de condutividade térmica compatíveis com a curva de temperatura do aço protegido, onde há uma tendência de diminuição da condutividade térmica quando se inicia o processo de espumificação atingindo valores próximos a 0,012 e 0,039 W/mK.

Nas análises dos resultados provenientes dos ensaios da viga V2, com perfil de seção W150x13, as curvas de temperatura obtidas para a temperatura dos gases do incêndio e a temperatura da superfície metálica protegida ilustram a eficiência do material intumescente. A diferença significativa entre a temperatura máxima média dos gases do incêndio, próxima a 620°C e a temperatura máxima média medida no aço no meio do vão, equivalente a 426°C. O pico de temperatura foi atingido quando decorridos 35 minutos do início do ensaio. Diante disso, concluiu-se que de fato o aumento da espessura seca de filme intumescente contribuiu para o impedimento do avanço da temperatura na superfície.

As imagens ilustradas pela Figura 5-20 mostram a evolução da camada intumescente no incêndio. Neste corpo de prova, devido ao fator de massividade elevado, o perfil foi protegido com espessura de 500µm, logo, o desenvolvimento da camada intumescente foi bom, com formação de bolhas e espumas densas ao longo da seção transversal. Este efeito corrobora com os valores de temperatura da superfície protegida, que teve um distanciamento maior da

temperatura dos gases do incêndio. O comportamento da condutividade térmica calculada também condiz com os resultados obtidos de temperatura, com o comportamento da curva semelhante a curva obtida por Krisnamoorthy (2011) e Dai (2009). Pode-se observar valores de condutividade térmica muito baixos após a formação da camada espumífera, que atestam a proteção contra o incêndio promovida pela tinta intumescente. Neste caso, observa-se uma tendência decrescente do valor da condutividade térmica após os 300°C, com valores próximos a 0,007 W/mK.

Ao analisar os resultados obtidos com o ensaio da amostra V3, de seção W200x31,3, as curvas de temperatura obtidas para a temperatura dos gases do ambiente incendiado e temperatura do substrato metálico protegido se mostraram próximas. Isso se explica devido ao fato de neste ensaio, a taxa de aquecimento ter sido mais severa, visível pela inclinação da curva ilustrada no gráfico da Figura 5-15. A temperatura máxima média dos gases do incêndio ficou próxima a 770°C e a temperatura máxima média medida no aço, equivalente a 694°C. O pico de temperatura foi atingido quando decorridos 21 minutos do início do ensaio. Diante disso, constata-se o mau comportamento do material de proteção passiva, uma vez que a diferença entre a temperatura da câmara de combustão e do substrato protegido se mantiveram próximas. Este efeito pode ser explicado com base nos resultados dos ensaios de termogravimetria, que indicam que em taxas de aquecimento elevadas, a formação da camada espumífera fica comprometida e isso faz com que o desempenho da tinta intumescente não seja satisfatório.

As imagens ilustradas pela Figura 5-21 mostram a evolução da camada intumescente no incêndio. Neste caso, o desenvolvimento da camada intumescente não foi satisfatório, no que diz respeito a formação de bolhas. Isso se explica pela curva de aquecimento ter sido mais rigorosa. Como visto nos ensaios de termogravimetria realizados em laboratório, para as amostras com taxas de 25°C/min, a fase final responsável pelo processo de formação da camada espumífera teve menor variação mássica em relação as amostras com taxas menores. Isso valida a condição de pouca formação de bolhas no ensaio da viga V3.

O comportamento da condutividade térmica calculada também corrobora com os resultados obtidos de temperatura. Foi possível observar valores de condutividade térmica compatíveis com a curva de temperatura do aço protegido, onde há uma tendência de crescimento da condutividade térmica após o processo de espumificação atingindo valores próximos a 0,058 W/mK na fase final. Ao longo do avanço da temperatura, é constatado que a curva de

condutividade térmica apresenta uma tendência de crescimento, o que neste caso não promove nenhuma proteção adicional ao perfil metálico contra o incêndio, atestando o mau comportamento da tinta nessa situação.

As Tabela 5-4 e Tabela 5-5 reúnem os valores destacados em texto para facilitar a análise e comparação dos resultados para os três corpos de prova ensaiados.

Tabela 5-4 - Resultados dos ensaios de vigas de aço protegidas

Seção	A_m/V	Espessura seca (μm)	Temperatura média máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo (min)	Condutividade térmica (W/mK)
V1 – TQ100x4,75	219	275	598	37	0,012-0,039
V2 – W150x13	404	500	423	35	0,007-0,122
V3 – W200x31,3	231	300	664	21	0,007-0,058

Tabela 5-5 – Temperaturas médias máximas dos ensaios de vigas

Seção	Temperatura máxima dos gases do incêndio	Temperatura máxima da viga protegida no meio do vão	$\theta_g - \theta_a$ ($^{\circ}\text{C}$)
	θ_g ($^{\circ}\text{C}$)	θ_a ($^{\circ}\text{C}$)	
V1 – TQ100x4,75	635	556	79
V2 – W150x13	620	426	194
V3 – W200x31,3	770	694	76

Observa-se, portanto, que ao adotar as espessuras de proteção intumescente relacionadas ao TRRF 60 minutos, a variação média da temperatura máxima do substrato protegido foi de 79, 194 e 76 $^{\circ}\text{C}$ entre as vigas V1, V2 e V3, respectivamente. Isso atesta o bom comportamento da proteção intumescente aplicada nas vigas V1 e V2, relacionando os resultados de temperatura, desempenho da camada espumífera e da condutividade térmica da tinta intumescente calculada. Analisando a condutividade térmica, pode-se observar que para os três ensaios, os valores da condutividade térmica se mantiveram dentro do intervalo de 0,007 a 0,12 W/mK , caracterizando um padrão comportamental da tinta, que é fundamental para a parametrização de estudos futuros. Além do fato de que a curva que descreve a variação da condutividade térmica ao longo do avanço da temperatura ter apresentado o mesmo padrão nos ensaios das vigas V1 e V2.

No âmbito da relação entre o fator de massividade e a progressão das temperaturas nas seções transversais, pode-se observar que os perfis V2-W150x13, que possuem maior fator de

massividade quando comparados aos perfis V3-W200x31,3, tiveram maior variação de temperatura média máxima dos gases e da superfície protegida. Isso se explica pelo fato de ter sido utilizado maior espessura seca de proteção, determinada pelo TRRF. Em relação ao desenvolvimento da intumescência em perfis de diferentes composições geométricas, observou-se que nas arestas das mesas dos perfis laminadas e nas arestas do perfil tubular quadrado houve grande efeito de retração da tinta intumescente, como ilustrado na Figura 5-19. Conseqüentemente, quando formada a espuma, a trinca se mostrou como um ponto crítico de aquecimento da viga. As regiões de arestas devem ser destacadas como pontos críticos na etapa de projeto e aplicação da tinta, requerendo maior controle tecnológico para garantia de que a espessura seca definida em projeto seja atendida ao longo de todo comprimento da peça.

Com relação aos valores de deslocamentos medidos e os modos de flambagem observados, pode-se concluir que os valores apresentaram valores coerentes com os dados de temperatura atuantes no substrato metálico e de inércia da seção geométrica. Com isso, pode-se observar deslocamentos verticais maiores na viga V1, perfil tubular quadrado com menor momento de inércia. A Figura 5-26 ilustra o deslocamento vertical positivo em relação a posição inicial da viga antes do incêndio. Outra observação importante diz respeito ao tempo em que ocorreram os deslocamentos máximos medidos na viga V1. Enquanto a temperatura máxima média na viga foi atingida com 37 minutos, o deslocamento máximo foi registrado aos 34 minutos.



Figura 5-26 – Deformada da viga V1-TQ100x4,75 após ensaio

A viga V2, apesar de possuir pouca inércia, a temperatura atuante no aço ficou abaixo das demais, com isso, não houve degradação da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade suficiente para promover flambagens locais e globais relevantes. Por isso, os valores de deslocamento foram baixos e a formação da camada carbonosa intumescente protegeu a viga, como pode ser visto na Figura 5-27.



Figura 5-27 - Deformada da viga V2-W150X13 após ensaio

Já a viga V3-W200X31.3, por possuir muita inércia, resistiu aos esforços solicitantes de carregamento e temperatura sem apresentar flambagens locais e globais significativas, conforme Figura 5-28. Os valores de deslocamentos obtidos serão fundamentais para a calibração do modelo numérico a ser criado com os dados obtidos por meio os ensaios.



Figura 5-28 - Deformada da viga V3-W200X31.3 após ensaio

5.6 Considerações finais

Nesta seção, foi apresentada a metodologia usada para a experimentação de vigas de aço protegidas com tintas intumescentes. Este estudo visa a compreensão do comportamento intumescente em situação de incêndio natural, observando a influência do fator de massividade, da seção transversal e do carregamento externo de flexão aplicado. O sistema experimental criado não é normativo, no entanto, foi executado de forma a possibilitar a obtenção de parâmetros de temperatura e deslocamentos que permitem a análise física e visual do comportamento da tinta intumescente durante o tempo do ensaio.

Utilizou-se nestes ensaios as mesmas seções transversais que foram ensaiadas em pequena escala no forno elétrico, e a mesma tinta intumescente foi aplicada. Contudo, neste caso, observou-se uma curva de aquecimento mais rigorosa do que a obtida nos ensaios em laboratório e isso resultou em valores de temperatura do substrato metálico e condutividade térmica da tinta diferentes para os dois cenários. Apesar disso, como nos ensaios em perfis curtos, observou-se que as vigas W150X13 com maiores fatores de massividade apresentaram melhor resposta ao fogo, com maior desenvolvimento da camada intumescente e conseqüentemente, menor temperatura atuante na seção transversal.

A análise em nível de flambagem global, aferida principalmente pela percepção dos deslocamentos verticais das seções, apresentou resultados coerentes com os valores de temperatura obtidos. Constatou-se que a viga V1-TQ100X4.75 registrou maiores

deslocamentos verticais na região do vão central da viga, justificado pelos valores de temperatura atingidos e pelo fato da seção ter menor inércia quando comparada com as outras vigas ensaiadas.

Em relação ao efeito de espumificação, observou-se que as regiões de arestas apresentavam trincas e fissuras na camada carbonosa nos corpos de prova V1-TQ100X4.75 e V3-W200X31.3, sendo esta região um ponto crítico para absorção de calor pela seção transversal. Dessa forma, ressalta-se a importância de uma atenção no processo de aplicação e verificação da espessura seca de cobertura da tinta intumescente nestas regiões.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A segurança contra incêndio se faz cada vez mais necessária para a diminuição dos números de casos fatais associados ao colapso de estruturas em decorrência do incêndio. Isso faz com que o desenvolvimento de trabalhos e pesquisas baseadas nessa temática apresentem grande relevância no cenário atual da engenharia. Por meio desta pesquisa, foi possível avaliar os aspectos do comportamento da pintura intumescente em vigas metálicas de diferentes seções transversais, a influência do incêndio natural no processo de expansão volumétrica da camada espumífera e o seu desenvolvimento não uniforme.

Nos ensaios experimentais de perfis curtos protegidos, as principais premissas consideradas foram de que amostras de seções metálicas de diferentes composições geométricas seriam protegidas com espessura seca recomendada pelo fabricante da tinta intumescente para TRRF igual a 30 e 60 minutos. A taxa de aquecimento implementada no forno elétrico foi de 20°C/min. Todas as amostras foram equipadas com três termopares tipo K soldados na superfície antes da execução dos procedimentos de pintura.

Como resultado, observou-se que o aumento da espessura seca das amostras de TRRF igual a 30 para 60 minutos melhorou o desempenho das amostras no que diz respeito a temperatura média máxima da superfície metálica protegida. Destaca-se o desempenho das vigas W150x13, que apresentaram boa formação da camada carbonosa, com bolhas ao longo de toda a seção transversal. Um ponto negativo observado foi o aparecimento de trincas e fendas nas arestas dos perfis, principalmente os tubulares quadrados. Isso ressalta a importância de um bom processo de aplicação, que garanta o atendimento a espessura seca nessa região. Pelo efeito de retração da tinta durante a secagem, deve-se garantir que essa região não se torne um ponto crítico para o aquecimento da seção. No que diz respeito aos valores de condutividade térmica, o equacionamento utilizado nas metodologias implementadas por Dai (2009) e Mesquita (2015) apresentaram valores satisfatórios e coerentes com o desempenho da tinta com o avanço da temperatura.

Para o ensaio das vigas protegidas, as principais premissas adotadas foram a de que os perfis seriam protegidos com espessura seca recomendada para TRRF igual a 60 minutos. Quanto à

carga de incêndio utilizada nos ensaios, foram utilizados *pallets* de madeira tipo *pinus elliottii*, com densidade aproximada de 480 kg/m³ e teor de umidade de 20%. Com base na ABNT NBR 14323:2001, foi definida como base o valor de carga de incêndio específica para ocupações tipo residencial, com carga de incêndio, q_{fi} , igual a 300 MJ/m². Considerando o potencial calorífico de madeiras de *pallets*, foi necessário 140 kg de madeira por ensaio. Para aferição dos dados, foram utilizados termopares tipo K para medição da temperatura dos gases do incêndio e do substrato metálico protegido das vigas. Além disso, foram posicionados dois medidores de deslocamento LVDT nas extremidades e após o resfriamento, foram feitas medições manuais do deslocamento global da estrutura.

A partir dos resultados, pode-se concluir que o comportamento da tinta intumescente foi semelhante em todos os ensaios, permanecendo entre 150 e 200°C abaixo da temperatura dos gases do incêndio. Isto demonstra a eficácia da tinta na proteção do perfil metálico, como pode ser visto em comparações com o perfil metálico desprotegido. Quanto aos deslocamentos, apenas a viga TQ100x4,75 ultrapassou os limites permitidos em termos de flecha máxima observada após o ensaio, aferindo no vão central valores próximos a 38,8 milímetros de deslocamento vertical.

Quanto à formação de expansão da tinta, pode-se observar que a tinta não teve um desempenho adequado nas bordas do perfil TQ100x4,75, região crítica para absorção de calor do perfil. Recomenda-se, portanto, um maior controle tecnológico sobre os processos de aplicação nestas áreas para garantir que a espessura seca recomendada seja alcançada. Para o perfil W150x13, que possui maior fator de massividade, foi aplicada uma camada mais espessa de tinta intumescente indicada pela carta de recomendação do fabricante da tinta, e neste caso observou-se um excelente comportamento de expansão do processo de pintura. No caso do perfil W200x31,3 o processo de expansão volumétrica foi insatisfatório, uma vez que a taxa de aquecimento mais rápida, conforme visto na inclinação das curvas de temperatura dos gases do incêndio em comparação com os outros testes foi um dos fatores que contribuíram para este resultado. A avaliação da condutividade térmica dos perfis ensaiados foi coerente para todos os corpos de prova, o que possibilita a criação do modelo numérico paramétrico para validação dos resultados experimentais.

Portanto, pode-se concluir que os resultados dos experimentos foram satisfatórios para o objetivo pretendido, permitindo a análise dos resultados e a obtenção de parâmetros que serão

cruciais para a criação de um modelo numérico para simular o comportamento de tintas intumescentes em estruturas metálicas.

6.2 Sugestões para Estudos Futuros

Como o tema do presente trabalho ainda é pouco estudado a nível mundial e principalmente brasileiro, sugerem-se alguns temas pertinentes que podem ser objeto de estudo de outros trabalhos futuros. Como complemento a este trabalho experimental realizado, pode-se com os resultados coletados desenvolver um estudo numérico paramétrico. Com as curvas de temperatura e o resultado da condutividade térmica obtido para os dois modelos de ensaios, pode-se obter uma parametrização que descreva o comportamento das tintas intumescentes quando aplicadas em vigas de aço estrutural.

No âmbito dos estudos numéricos, visando aprofundar em temáticas não estudadas neste presente trabalho, destacam-se os principais tópicos de interesse no estudo do comportamento intumescente:

- O estudo numérico do comportamento de tintas intumescentes com condições não-homogêneas;
- Modelo numérico para simulação das condições do ensaio real de vigas de aço protegidas com tintas intumescentes;
- Parametrização dos resultados experimentais para os diversos casos de aplicação de tinta intumescente.

No âmbito da realização de estudos experimentais, existem lacunas a serem preenchidas no entendimento do comportamento intumescente no âmbito dos seguintes itens:

- O estudo do comportamento de tintas intumescentes de base solvente sob condições de aquecimento prescritas por curvas rápidas, como as de hidrocarbonetos;
- O estudo comparativo do desempenho de tintas intumescentes de base aquosa e de base solvente;
- O estudo do efeito de intemperismo acelerado em vigas protegidas com tintas intumescentes;

- O estudo do desenvolvimento de falhas na superfície protegida por tinta intumescente, decorrente de impactos mecânicos nas etapas de transporte e manuseio dos elementos estruturais no canteiro de obras;
- O estudo do desenvolvimento da camada intumescente quando da existência de obstáculos físicos que influenciem no processo de formação da camada intumescente, aplicável a pilares metálicos confinados por alvenarias e outros elementos.

Além dos ensaios experimentais e numéricos propostos, é necessário que com os resultados obtidos nestas propostas de estudos sejam tratados de modos a desenvolverem novos métodos de cálculo, ábacos e tabelas que permitam o dimensionamento de elementos estruturais de aço protegidos com tintas intumescentes, para implementação nas normas brasileiras. O desenvolvimento da temperatura nas seções de aço protegidas por tintas intumescentes deve ser adaptado pelas formulações normativas, com base nos valores de condutividade térmica da tinta intumescente em função da temperatura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. ANSI/AISC 360-16 – *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *ASTM E8 / E8M – 21. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Pennsylvania, Estados Unidos, 2021.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. Rio de Janeiro, 2013.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*. Rio de Janeiro, 2013.

ARAÚJO, A. H. M. [et al]. *Projeto de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço*. 1. Ed – Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2016.

BERALDO, C. H.M.; SILVEIRA, M. R. da S.; BALDISSERA, A. F.; FERREIRA, C. A.. *Fire protection of ultraviolet-aged intumescent coatings containing polyhedral oligomeric silsesquioxanes*. Progress In Organic Coatings, v. 149, dez. 2020.

BILOTTA, A.; SILVA, D. de; NIGRO, E.. *Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures*. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 121, p. 410-422, set. 2016.

CAGLIOSTRO, D. E; RICCITIELLO, S.R.; CLARK, K. J.; SHIMIZU, A. B.. *Intumescent coating modeling*. Journal of Fire and Flamability, Vol. 6, p. 205.

CHEN, C.-K.; ZENG, J.-W.; SHEN, B.-Y.. *Experimental investigation on performance of intumescent coating for steel plate at elevated temperature*. Journal of Central South University, [S.L.], v. 22, n. 8, p. 3151-3158, ago. 2015.

DAI, X.; WANG, Y.; BAILEY, C.. *A Simple Method to Predict Temperatures in Steel Joints with Partial Intumescent Coating Fire Protection*. Fire Technology, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 19-35, 20 mar. 2009.

DIAS, J. V. F. *Flambagem lateral com distorção de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio: análise experimental e numérica e proposta de procedimento de cálculo*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil, 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1991-1-2:2002. *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*. Brussels, 2002

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1993-1-1:2004. *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings*. Brussels, 2005

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1993-1-2:2005. *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: general rules – structural fire design*. Brussels, 2005

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EN 13381-8 – *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied reactive protection to steel members*. Brussels, 2007.

FAKURY, R. H., CALDAS, R. B., CASTRO E SILVA, A. L. R. *Dimensionamento básico de elementos estruturais de e aço e mistos de aço e concreto*. 1. Ed – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

GILLET, M.; PEREZ, L.; AUTRIQUE, L.. *A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design*. Fire Safety Journal, [S.L.], v. 110, dez. 2019.

HAN, J.; LI, G.-Q.; WANG, Y. C.; XU, Q.. *An experimental study to assess the feasibility of a three-stage thermal conductivity model for intumescent coatings in large space fires*. Fire Safety Journal, [S.L.], v. 109, out. 2019.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 834-1:1999. Fire Resistant Tests – Elements of Building Construction – Part 1: General Requirements*. Geneva, Suíça, 1999.

KANG, S.; CHOI, J.; CHOI, S.. *Mechanism of Heat Transfer through Porous Media of Inorganic Intumescent Coating in Cone Calorimeter Testing*. Polymers, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 221, 29 jan. 2019.

KOLSEK, J.; ČELAREK, P.. *Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3*. Journal of Constructional Steel Research, [S.L.], v. 104, p. 91-103, jan. 2015.

KRISHNAMOORTHY, R. R. *The analysis of partial and damaged fire protection on structural steel at elevated temperature*. Thesis (Doctor degree). University of Manchester – England, 2011. 246p.

LOSS PREVENTION STANDARD – LPS 1107: Issue 1.1. *Requirements, tests, and methods of assessment of passive fire protection systems for structural steelwork*. England, 2014.

LUCHERINI, A.; LAM, H. Y.; JIMENEZ, M.; SAMYN, F.; BOURBIGOT, S.; MALUK, C.. *Fire Testing of Intumescent Coatings: comparison between bench-scale furnace and radiant panels experimental methodologies*. Fire Technology, [S.L.], v. 58, n. 3, p. 1737-1766, 6 mar. 2022.

LUCHERINI, A.; HIDALGO, J. P.; TORERO, J. L.; MALUK, C.. *Influence of heating conditions and initial thickness on the effectiveness of thin intumescent coatings*. Fire Safety Journal, [S.L.], v. 120, mar. 2021.

LUCHERINI, A.; MALUK, C.. *Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: a review*. Journal of Constructional Steel Research, [S.L.], v. 162, nov. 2019.

MESQUITA L. M. R. *Estudo experimental e numérico do comportamento de um material intumescente na proteção passiva de elementos estruturais submetidos a incêndio*. Tese (Pós-Doutorado). Universidade do Porto – Portugal, 2015. 342p.

NØRGAARD, K. P.; DAM-JOHANSEN, K.; CATALÀ, P.; KIIL, S.. *Investigation of char strength and expansion properties of an intumescent coating exposed to rapid heating rates*. Progress in Organic Coatings, [S.L.], v. 76, n. 12, p. 1851-1857, dez. 2013.

RODRIGUES, J. P. C., OLIVEIRA, R. L. G. *Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio: segundo as normas brasileiras*. 1. Ed – São Paulo: Oficina de textos, 2021.

SONG, Q.-Y.; HAN, L.-H.; ZHOU, K.; FENG, Y.. *Fire resistance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) column protected by intumescent coating*. Journal Of Constructional Steel Research, [S.L.], v. 147, p. 154-170, ago. 2018.

SONG, Q.-Y.; HAN, L.-H.; YUAN, F.; ZHOU, K.. *Temperature rise distribution of circular concrete-filled steel tubular cross-sections with intumescent coating*. Journal of Constructional Steel Research, [S.L.], v. 168, may 2020.

XU Q.; LI G-Q.; WANG, Y. C.. *A simplified method for calculating non-uniform temperature distributions in thin-walled steel members protected by intumescent coatings under localized fires*. Thin-Walled Structures, 2021, vol 162. 14p.

WANG, J.; ZHAO, M. *Study on the effects of aging by accelerated weathering on the intumescent fire-retardant coating for steel elements*. Engineering Failure Analysis, [S.L.], v. 118, dez. 2020.

ZHANG, Y.; WANG, Y.C.; BAILEY, C.G.; TAYLOR, A. P.. *Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions*. Fire Safety Journal, [S.L.], v. 50, p. 51-62, maio 2012.