

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Basso

**PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
DESEMPENHO DE PINTURAS INTUMESCENTES**

Porto Alegre
julho 2016

GUILHERME BASSO

**PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
DESEMPENHO DE PINTURAS INTUMESCENTES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre
junho 2016

GUILHERME BASSO

**PROTEÇÃO PASSIVA EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
DESEMPENHO DE PINTURAS INTUMESCENTES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de julho de 2016

Profa. Ângela Gaio Graeff
PhD pela Universidade de Sheffield
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela Universidade de Sheffield

Eng. Civil Jacinto M. A. de Almeida (UFRGS)
Mestre pela Universidade de Coimbra

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho a meus pais e irmã, Valdir, Josefina e
Letícia Basso, que são a base de tudo e sempre estiveram
presentes quando necessitei, especialmente durante o
período do meu Curso de Graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a profa. Ângela Gaio Graeff, orientadora deste trabalho, por todo o auxílio que foi fundamental para que fosse possível existir este trabalho e também pela sua empolgação com o tema.

Agradeço ao LEME por ceder as instalações para que pudessem ser feitos os testes e todos seus funcionários, bolsistas, mestrandos e doutorandos que ajudaram no projeto, em especial Lucas Reginato e Julia Menegon.

Agradeço ao LaPol, em especial o prof. Carlos Arthur Ferreira e o doutorando Mauro Silveira, por apoiar o trabalho tanto com ideias para o teste como fornecer uma das tintas, que foi essencial para o trabalho. Espero que os frutos deste trabalho possam ajudar nas pesquisas do LaPol sobre tintas intumescentes.

Agradeço à CKC por apoiar este projeto fornecendo uma das tintas que foram testadas, em especial ao Rogério Lin, sem este apoio o trabalho não seria tão representativo como foi.

Are you ready for a good time.

Angus McKinnon Young

RESUMO

A utilização de perfis metálicos no Brasil ainda é tímida frente à versatilidade que este tipo de material pode trazer, porém aos poucos o mercado vem dando espaço para o seu emprego nas obras. Diferente das estruturas de concreto armado convencionais, as estruturas metálicas necessitam de uma maior proteção contra a ação de altas temperaturas e, na área de segurança contra incêndios, a proteção às estruturas de uma edificação é extremamente importante. O principal motivo desta necessidade de proteção é que o metal é um material que quando exposto a altas temperaturas sem proteção nenhuma eleva sua temperatura rapidamente e, em função disto, perde suas propriedades de material apto para suportar grandes cargas, comprometendo a segurança. A proteção que as tintas intumescentes conferem às estruturas metálicas ainda é um assunto pouco difundido em âmbito nacional, tanto que não existe uma Norma Brasileira que regulamente sua aplicação. Para este trabalho foram testadas, através de ensaios em laboratório, duas tintas intumescentes em dois tipos de perfis metálicos (perfil U e perfil cantoneira) que receberam além da carga de incêndio, uma carga axial de compressão correspondente a 20 % da carga máxima de suporte de cada perfil. Foram testados também corpos de prova sem nenhum tipo de proteção a fim de poder comparar os efeitos da utilização de tintas intumescentes. Os resultados dos ensaios mostram que utilizar tintas intumescentes é uma solução eficiente na proteção contra incêndios, principalmente quando comparado com perfis não protegidos, mas que também deve se tomar cuidados no momento da escolha da tinta e no dimensionamento da camada de proteção pois como o trabalho apontou, os resultados são diferentes conforme o perfil utilizado, a espessura utilizada e o fabricante.

Palavras-chave: Segurança Contra Incêndio. Estruturas Metálicas.
Tintas Intumescentes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das etapas do trabalho	16
Figura 2 – Mecanismo de ignição de combustíveis sólidos	19
Figura 3 – Mecanismo de ignição de combustíveis líquidos	19
Figura 4 – Mecanismo de ignição de combustíveis gasosos	20
Figura 5 – Temperatura x tempo em um incêndio	21
Figura 6 – Alongamento x temperatura conforme NBR 14323	29
Figura 7 – Calor específico x temperatura conforme NBR 14323.....	31
Figura 8 – Condutividade térmica x temperatura conforme NBR 14323.....	32
Figura 9 – Perfil cantoneira utilizado no trabalho	42
Figura 10 – Perfil “U” utilizado no trabalho	43
Figura 11 – Procedimento de aplicação da tinta B nos corpos de prova	45
Figura 12 – Aparência dos corpos de prova após o preparo inicial e pintura intumescente	46
Figura 13 – Perfil de aço com chapas planas soldadas nas extremidades	47
Figura 14 – Desenho esquemático da posição dos maçaricos ao longo da altura dos perfis	52
Figura 15 – Disposição dos termopares	53
Figura 16 – Perfil durante a realização do ensaio, com os maçaricos já posicionados	56
Figura 17 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil cantoneira sem tinta	57
Figura 18 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira sem tinta	57
Figura 19 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira sem tinta	58
Figura 20 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira sem tinta	58
Figura 21 – Temperatura no perfil cantoneira sem tinta segundo câmara termográfica ..	59
Figura 22 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil “U” sem tinta	60
Figura 23 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” sem tinta	60
Figura 24 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil “U” sem tinta	61
Figura 25 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” sem tinta	61
Figura 26 – Temperatura no perfil “U” sem tinta segundo câmara termográfica	62
Figura 27 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta A	63
Figura 28 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta A	63
Figura 29 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta A	64

Figura 30 – Temperatura no perfil cantoneira com tinta A segundo câmara termográfica	64
Figura 31 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” com tinta A	65
Figura 32 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil “U” com tinta A	66
Figura 33 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil “U” com tinta A	66
Figura 34 – Temperatura no perfil “U” com tinta A segundo câmara termográfica	67
Figura 35 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta B	68
Figura 36 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta B	68
Figura 37 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta B	69
Figura 38 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta B	69
Figura 39 – Temperatura no perfil cantoneira com tinta B segundo câmara termográfica	70
Figura 40 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil “U” com tinta B	71
Figura 41 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” com tinta B	71
Figura 42 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil “U” com tinta B	72
Figura 43 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil “U” com tinta B	72
Figura 44 – Temperatura no perfil “U” com tinta B segundo câmara termográfica.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores de redução	30
Quadro 2 – Comparativo dos resultados	75

LISTA DE SIGLAS

NBR – Norma Brasileira

TRRF – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivo secundário	14
2.3 HIPOTESE	15
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
3 FOGO E OS GRANDES INCÊNDIOS	18
3.1 FOGO E OS INCÊNDIO	18
3.2 GRANDES INCÊNDIOS	22
3.3 AS MUDANÇAS NA LEGISLAÇÃO	24
4 ESTRUTURAS DE AÇO	27
4.1 COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS DO AÇO	27
4.2 PROTEÇÃO DAS ESTRUTURAS DE AÇO	34
5 TINTAS INTUMESCENTES	37
6 PLANO EXPERIMENTAL	41
6.1 MÉTODO EXPERIMENTAL	41
6.2 DESCRIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	41
6.2.1 Perfil cantoneira	41
6.2.2 Perfil “u”	42
6.3 DESCRIÇÃO DAS TINTAS INTUMESCENTES	43
6.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA	44
6.5 MÉTODO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO	46
6.5.1 Etapa 1 – Aplicação de carga axial de compressão	47
6.5.1.1 Cálculo da carga crítica do perfil cantoneira	48
6.5.1.2 Cálculo da carga crítica do perfil “U”	49
6.5.1.2.1 <i>Flambagem elástica por flexão, N_{e_y}</i>	49
6.5.1.2.2 <i>Flambagem elástica por flexo torção, $N_{e_{xz}}$</i>	50

6.5.2	Etapa 2 – Aplicação da carga de incêndio	51
6.5.3	Resumo dos procedimentos de ensaio para o método proposto	53
7	RESULTADOS	55
7.1	CORPOS DE PROVA SEM NENHUMA TINTA	56
7.1.1	Perfil cantoneira sem tinta	56
7.1.2	Perfil “U” sem tinta	59
7.2	CORPOS DE PROVA PINTADOS COM TINTA A	62
7.2.1	Perfil cantoneira com tinta A	62
7.2.2	Perfil “U” com tinta A	64
7.3	CORPOS DE PROVA PINTADOS COM TINTA B	67
7.3.1	Perfil cantoneira com tinta B	67
7.3.2	Perfil “U” com tinta B	70
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Enquanto que em países mais desenvolvidos economicamente como os Estados Unidos, houve grandes desastres com incêndios desde o início do século XX, o Brasil só foi enfrentar um evento notável desta natureza nos anos 1960. Seguindo os passos dos países mais desenvolvidos, apenas após passar por uma situação calamitosa que o País se atentou para o fato de que são necessárias medidas preventivas nas construções e ferramentas preventivas que minimizam ou até mesmo anulam as chances de perdas com incêndios. Ou seja, pode-se dizer que a área da Segurança Contra Incêndios no Brasil é relativamente recente em comparação com os Estados Unidos, por exemplo.

Nos anos 1970, diversos desastres provocados pela negligência em se tomar medidas anti-incêndio culminaram em uma profunda mudança na legislação vigente da época que era praticamente inexistente. Porém, mesmo com todas as normas e leis que versam sobre o tema, recentemente ocorreu o incêndio na boate Kiss, em Santa Maria, no Rio Grande do Sul, no qual mais de 240 pessoas perderam a vida. Novamente a história se repetiu e apenas após uma tragédia é que surgiram mudanças para melhorar as condições de prevenção e combate contra incêndio, ainda que restritas ao Estado do Rio Grande do Sul.

Um dos pontos chave destas mudanças na legislação do Rio Grande do Sul diz respeito à estrutura da edificação e o comportamento desta frente a um sinistro. Ela deve ser capaz de suportar determinado tempo antes de entrar em colapso possibilitando assim a evacuação de quem está dentro ou nas proximidades da edificação. A exigência deste tempo varia conforme o tipo de edificação. Considerando que, diferentes materiais se comportam de maneiras distintas e, para assegurar que não ocorra um colapso, alguns destes materiais necessitam de uma proteção que retarde os efeitos do fogo.

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

O metal é um material que quando em altas temperaturas em um primeiro momento gera tensões indesejadas devido a sua expansão térmica e, após aumentar a temperatura, tende a se plastificar, perdendo suas propriedades como elemento estrutural. Conhecendo este comportamento é que se faz necessária uma proteção contra a ação do fogo, tendo em vista que sua negligência pode acarretar desastres. Pinturas intumescentes podem ser utilizadas como proteção passiva de estruturas metálicas, porém são exemplos de que não existem estudos mais aprofundados sobre o tema, pois se sabe que retardam o efeito do fogo, porém nem todas as marcas possuem a especificação de por quantos minutos conseguem retardar tal processo.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar a eficiência de pinturas intumescentes que são encontradas no mercado e também utilizadas para fim acadêmicos, em elementos de estruturas metálicas com a finalidade de verificar a eficiência das mesmas em uma condição específica de ensaio, que simula a ação conjunta de carga axial de compressão e carga de incêndio.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: comparativamente a situação sem pintura, qual o efeito da exposição ao fogo dos perfis estudados com proteção de tintas intumescentes, durante um incêndio?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é avaliar experimentalmente o desempenho da proteção contra incêndio que tintas intumescentes fornecem em dois tipos de perfis metálicos.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é comparar as situações com e sem proteção de tintas intumescentes, apresentando os tempos que os corpos de prova resistiram até ocorrer uma ruptura, assim como a carga de compressão e a temperatura que estes perfis apresentavam neste momento.

2.3 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese do trabalho que a diferença de tempo entre um corpo de prova com e outro sem o revestimento com tinta intumescente é 10 minutos em um ensaio simulando uma situação de incêndio conforme a descrita no plano experimental. Ainda tem-se como hipótese que a diferença da temperatura máxima entre estes corpos de prova é de 200 °C no momento de ruptura.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de incêndio com corpos de prova de perfis metálicos U e cantoneira e tratamentos de superfícies com pinturas intumescentes com as tintas A e B.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) perfil U com bitola de 3 polegadas, 4,32 milímetros de espessura da alma e 80 cm de comprimento;
- b) perfil cantoneira com abas iguais de 2 polegadas (5,08 cm), 3/16 polegadas de espessura e 80 cm de comprimento;
- c) espessura da camada das tintas conforme a recomendação do fornecedor;
- d) ensaios realizados considerando apenas a aplicação de cargas de compressão uniaxiais paralelas ao eixo longitudinais no perfil;
- e) simulação de incêndio considerando um tempo de exposição máximo de 30 minutos;
- f) utilização de apenas duas tintas intumescentes de diferentes fabricantes e composições.

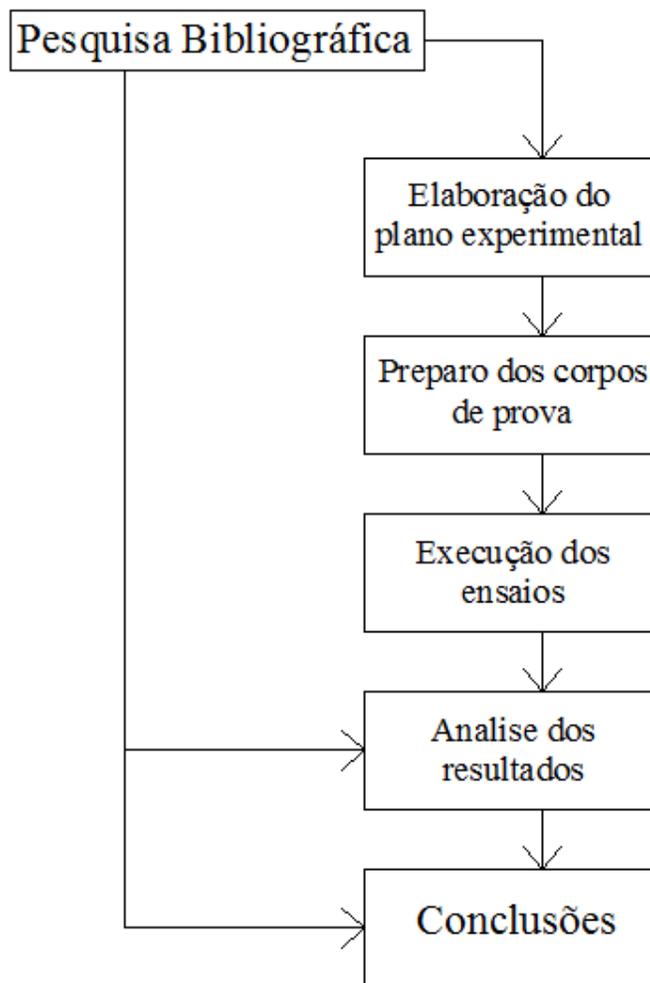
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) elaboração do plano experimental;
- c) preparo dos corpos de prova com pintura intumescente;
- d) execução dos ensaios;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões.

Figura 1 – Representação das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica foi a primeira e mais duradoura etapa, perdurando até praticamente o final do trabalho. Ela serviu de base teórica para todo o trabalho e foi constante, pois sempre era necessário o aprofundamento de assuntos ao longo do trabalho. Em seguida foi elaborado o plano experimental no qual foram definidos os detalhes do trabalho como tamanhos dos corpos de prova e seleção das marcas de tinta a serem usadas. Ainda nesta etapa também

foram descritos como serão os testes, duração da simulação do incêndio, posição dos medidores termopares, cargas a serem aplicadas no corpo de prova e demais detalhes.

A terceira etapa do trabalho consistiu no preparo dos corpos de prova com as pinturas intumescentes. Foram seguidas as recomendações do fabricante para a aplicação da pintura e sua espessura bem como o tipo de *primer* a ser utilizado. O preparo do corpo de prova antes da pintura, ou seja, a remoção de sujeiras ou defeitos da fabricação foi feita conforme recomendação da pesquisa bibliográfica. A sequência do trabalho se deu com a execução dos ensaios, é a etapa na qual se colocou em prática os procedimentos que foram descritos na elaboração do plano experimental. Cuidados foram tomados para assegurar que tudo ocorra conforme o descrito a fim de diminuir possíveis variabilidades decorrentes do processo e também para assegurar a segurança uma vez que o risco de danos era alto caso aconteça algo.

Realizados os ensaios, foi então feita uma análise dos resultados. É nesta etapa que pode ser gerada a tabela comparativa com as diferentes tintas e também em relação aos testes em que não foi usado nenhum tipo de proteção no corpo de prova. A sexta e última etapa teve por objetivo apresentar as conclusões do trabalho através da análise dos resultados e avaliação dos objetivos alcançados.

3 FOGO E OS GRANDES INCÊNDIOS

3.1 FOGO E INCÊNDIO

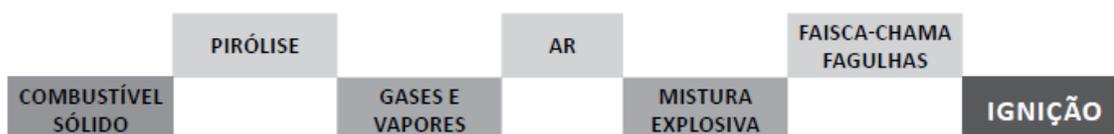
O fogo é estudado como ciência a quase trinta anos e a primeira teoria foi a do Triângulo do Fogo que diz que os 3 componentes do triângulo, combustível, comburente e calor, devem coexistir ligados para que o fogo se mantenha. A extinção do fogo é feita através da retirada de um dos 3 elementos. A evolução desta teoria após descobertas resultou na teoria do Tetaedro do Fogo. Basicamente o que mudou é que além dos 3 elementos do Triângulo do Fogo, foi adicionado um quarto chamado reação em cadeia. Da mesma forma que a antiga teoria, no Tetaedro do Fogo os quatro elementos devem coexistir ligados para que o fogo se mantenha. (SEITO, 2008, p. 35-36).

Segundo Seito (2008, p. 36), “Uma vez iniciado o fogo deve-se levar em conta o mecanismo de transmissão da energia, ou seja, condução do calor, convecção do calor e radiação de energia.”. Ele ainda afirma que a condução do calor é quando a energia é transmitida através de um material sólido. Convecção do calor é quando a transmissão é dada pela movimentação do líquido ou gás aquecido e radiação através de ondas eletromagnéticas. Os modos de transmissão influenciam na manutenção e transmissão do fogo e considerando o mesmo material combustível, o tempo de queima é diferente conforme o posicionamento do material e da chama. Para um mesmo tempo de queima, o tamanho da chama é diferente conforme o posicionamento.

Os materiais combustíveis podem ser de consistência sólida, líquida ou gasosa, porém os mecanismos de ignição são diferentes entre si. Segundo Seito (2008, p. 37), o combustível sólido “Quando exposto a um determinado nível de energia (calor ou radiação) sofre um processo de decomposição térmica, denominado pirólise, e desenvolvem produtos gasosos (gás e vapor), que, com o oxigênio do ar, forma a mistura inflamável (ou mistura explosiva)”. Adicionando uma fonte de energia para ativar, esta mistura inflama e a continuidade desta combustão se dá quando existe calor suficiente para continuar formando a pirólise. Geralmente o calor gerado da combustão do material sólido já é o suficiente para a

continuidade da combustão. As exceções à regra são os materiais pirofóricos e materiais sujeitos a combustão instantânea, que são sólidos, porém não seguem o mecanismo de ignição dos combustíveis sólidos que é apresentado na figura 2.

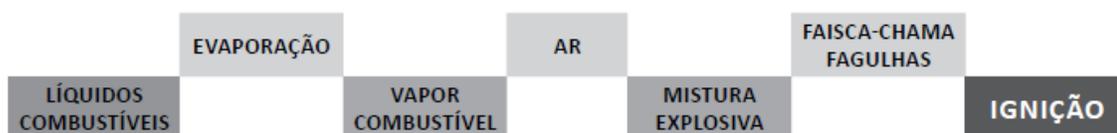
Figura 2 – Mecanismo de ignição dos combustíveis sólidos



(fonte: SEITO, 2008, p. 37).

O mecanismo de ignição dos materiais combustíveis líquidos inicia com a evaporação. Quando este vapor se junta com o ar é criada uma mistura inflamável que, quando entra em contato com uma fonte de energia (calor), inicia a combustão. Caso o líquido atinja sua temperatura de combustão, a queima continuará, caso contrário, se extingue. A taxa de evaporação varia de um líquido combustível para outro, sendo ainda diretamente proporcional ao seu calor. Geralmente os combustíveis líquidos são derivados de petróleo e substâncias oleígenas de plantas e animais. Para os combustíveis gasosos, o mecanismo é mais simples e basta o gás apenas entrar em contato com o ar para criar a mistura inflamável, ou seja, não precisa sofrer nenhuma mudança como os materiais sólidos e líquidos. Quando esta mistura se junta com uma fonte de energia ativante, se inflama. Os combustíveis gasosos mais comuns são também ligados ao petróleo. Além disso, ainda existem gases como hidrogênio, o monóxido de carbono, amônia, dissulfeto de carbono, que também são combustíveis (SEITO, 2008, p. 37-38). As figuras 3 e 4 apresentam os mecanismos de ignição dos combustíveis líquidos e gasosos, respectivamente.

Figura 3 – Mecanismo de ignição de combustíveis líquidos



(fonte: SEITO, 2008, p. 37).

Figura 4 – Mecanismo de ignição de combustíveis gasosos



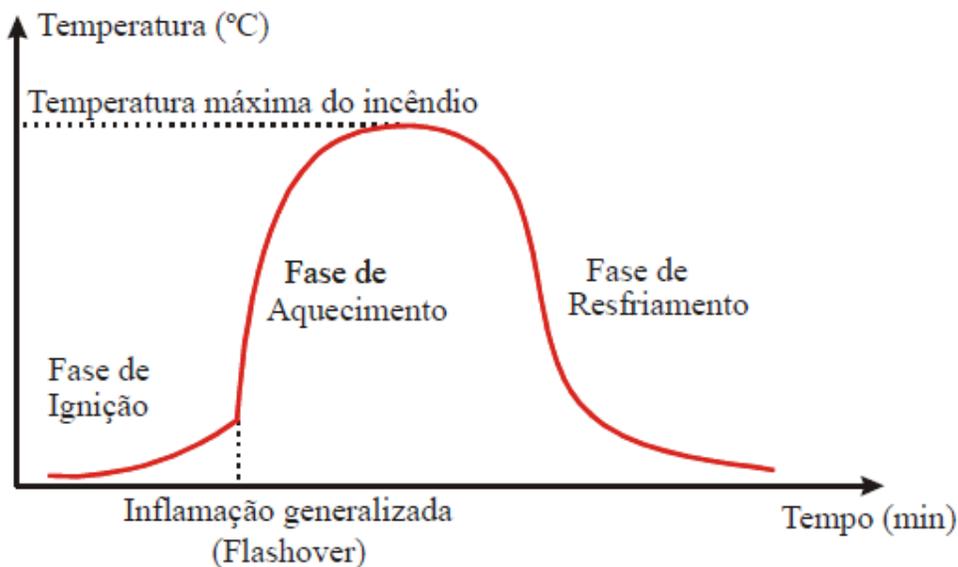
(fonte: SEITO, 2008, p.38).

Para Seito (2008, p. 38), a mistura explosiva, presente nos três mecanismos de ignição, contém o gás e ar misturados em determinadas proporções existindo faixas para que exista a ignição da mistura. O limite superior é onde se encontram os níveis máximos de gás, vapor ou pó na mistura em volume, no outro extremo, o limite inferior é a porcentagem mínima destes elementos para que ocorra a ignição.

Segundo a NBR 13860 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p. 7), a definição de incêndio é quando o fogo está fora de controle. Para Seito (2008, p. 43), o incêndio não é medido pelo tamanho do fogo, e o autor afirma que princípio de incêndio, no Brasil, é quando o dano causado pelo sinistro é pequeno. O mesmo autor ainda diz que um incêndio gera três produtos que são o calor, a fumaça e a chama, e salienta também que não existem dois incêndios iguais devido a vários fatores que influenciam numa situação de incêndio.

Para Silva et al. (2010, p. 15), a evolução de um incêndio consiste em três etapas: a fase inicial de elevação progressiva da temperatura (fase de ignição); a fase de aquecimento brusco; e a fase de resfriamento e extinção. A figura 5 representa a curva temperatura x tempo de um incêndio.

Figura 5 – Temperatura x tempo em um incêndio



(fonte: GUIMARÃES, 2007, p. 43).

Na fase de ignição há um aumento gradual de temperatura e o incêndio ainda é pequeno. Caso a edificação possua sistemas de combate contra o incêndio e o fogo venha a ser extinto ainda nesta etapa, os danos às estruturas são considerados leves e não necessitam maiores verificações (GUIMARÃES, 2007, p. 43-44).

Para a fase de aquecimento brusco, Silva et al. (2010, p. 15-16) dizem que:

[...] caso o fogo consiga se propagar, por convecção ou radiação, poderá ocorrer a repentina elevação da temperatura no local, com o rápido desenvolvimento de fumaça e gases inflamáveis, ocasionado pela combustão simultânea de vários materiais envolvidos. Com a oxigenação do local, devido às aberturas como portas e janelas, e à constante inflamação dos objetos, há um aumento cada vez maior da temperatura interna. Pode-se chegar a um momento em que o incêndio atinge a sua inflamação generalizada, ou “*flashover*” – o ambiente passa a ser completamente tomado pelas chamas e os gases quentes, que são emitidos através de portas e janelas e se queimam no exterior do edifício, em contato com o ar. O tempo para se atingir o “*flashover*” pode ser relativamente curto e depende, basicamente, das características dos materiais de revestimento e acabamento usados no ambiente de origem do fogo. A partir daí, o incêndio pode se propagar para outros compartimentos do edifício por convecção de gases quentes, seja pelo interior da edificação ou pelo exterior (o fogo pode atingir pavimentos superiores através das aberturas como janelas). A fumaça espalha-se pelo edifício desde a fase anterior à inflamação generalizada, movimentando-se em sentido ascendente. A presença da fumaça e dos gases quentes faz com que as condições de sobrevivência tornem-se críticas antes mesmo do local ser atingido pelas chamas. Dependendo da intensidade do incêndio e da proximidade das edificações vizinhas, o incêndio pode ser transmitido por radiação para as construções adjacentes.

Na última etapa, em função do consumo por completo dos materiais combustíveis ou por causa do abafamento (falta de oxigênio) o incêndio começa a diminuir e resfriar levando ao fim do processo (SILVA et al., 2010, p. 16).

3.2 GRANDES INCÊNDIOS

Até o início dos anos 1970 poucos incêndios com grandes perdas haviam ocorrido no Brasil, por este motivo não havia uma maior preocupação com este assunto a ponto de não ter uma legislação consolidada e abrangente, e muito ficava a cargo dos Corpos de Bombeiros e alguns códigos de obras dos municípios mas sem grandes exigências. O papel das seguradoras naquela época tinha certa influência uma vez que aqueles que adotassem algumas medidas indicadas por estas, seriam beneficiados no momento de fazer sua apólice. Não havia um apreço necessário pela vida humana, tanto que as avaliações e classificações de risco era em função do dano ao patrimônio. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não normatizava os sistemas de proteção contra incêndio, salvo a parte dos extintores onde havia regulamentações. Fica claro que o país não soube absorver o conhecimento sobre o assunto com outros países que já haviam sofrido o que o Brasil viria a sofrer nos anos seguintes (GILL et al., 2008, p. 22-23).

Em 17 de dezembro de 1961, em Niterói, Rio de Janeiro, ocorre o primeiro grande sinistro no Brasil. Gill et al. (2008, p. 23) dizem que, com origem criminosa, o Gran Circo Norte-Americano é tomado por um incêndio minutos antes do final do espetáculo vitimando 250 pessoas e ferindo outras 400. Além da queda do toldo em cima dos espectadores, outros motivos do elevado número de perdas, segundo os mesmos autores, foram “A ausência dos requisitos de escape para os espectadores, como o dimensionamento e posicionamento de saídas, a inexistência de pessoas treinadas para conter o pânico e orientar o escape, etc., [...]”. Os autores ainda comentam que “As pessoas morreram queimadas e pisoteadas. A saída foi obstruída pelos corpos amontoados.”.

Até o ano de 1970, com exceção do incêndio do incêndio no Gran Circo Norte-Americano, não houve um incêndio em uma edificação que tenha despertado a atenção do poder público e das seguradoras para este tipo de problema. Acreditava-se que a alta umidade relativa do ar e a ocupação de áreas litorâneas minimizavam ou até mesmo impediam a chance de ocorrer um grande incêndio. Em 18 de dezembro de 1970 um incêndio tomou conta de um dos prédios de

produção da montadora de automóveis Volkswagen, em São Bernardo do Campo, São Paulo. O resultado do incêndio, em termos de vítimas, foi de apenas uma morte, porém a edificação sofreu uma perda total. Também em decorrência deste incêndio foi desmitificada a crença relatada anteriormente sobre a umidade do ar. Outro fruto deste incêndio foi o início dos estudos para implantar sistemas de controle de fumaça, que veio a ser exigido apenas em 2001 através da regulamentação do Corpo de Bombeiros de São Paulo (GILL et al., 2008, p. 23).

Em 24 de fevereiro de 1972, um edifício comercial e de serviços na cidade de São Paulo veio a sofrer o primeiro grande incêndio em prédios elevados no país. O edifício Andraus tinha 31 andares, sua estrutura era de concreto armado e o acabamento com pele de vidro. O incêndio, que acredita-se ter iniciado nos cartazes de publicidade, matou 16 pessoas e deixou outras 336 feridas, números que poderiam ter sido maiores caso não houvesse um heliponto na cobertura que ajudou na evacuação de pessoas. O edifício não contava com escada de segurança e a pele de vidro facilitou a propagação do fogo através dos andares. Após este incêndio houve alguma movimentação para repensar esta questão do incêndio gerando grupos de trabalhos e estudos para a reformulação do código de obras para a cidade de São Paulo, porém, após desvios de foco dos grupos e alguns arquivamentos de estudos muito pouca coisa mudou até acontecer o segundo grande incêndio em São Paulo e no Brasil, pouco menos de 2 anos após o desastre no edifício Andraus (GILL et al., 2008, p. 23-24).

Segundo Gill et al. (2008, p. 24) esta edificação também era construída com concreto armado e contava com 23 andares de estacionamentos e escritórios. O edifício Joelma sofreu um incêndio no dia 01 de fevereiro de 1974 que deixou 169 mortos e 320 feridos e, assim como no edifício Andraus, este prédio não possuía escada de segurança. Pessoas subiram na cobertura provavelmente na esperança de serem resgatadas por um helicóptero porém a ausência de um heliponto não possibilitou tal evacuação.

Para Gill et al. (2008, p. 24), “Somado ao incêndio do edifício Andraus, pela semelhança dos acontecimentos e proximidade espacial e temporal, o incêndio causou grande impacto, dando início ao processo de reformulação das medidas de segurança contra incêndios.”. Para estes autores, fica evidente que tanto os poderes municipal e estadual eram falhos e despreparados uma vez que a legislação era defeituosa e o Corpo de Bombeiros mal amparado por ambas.

Pulando para o ano de 2013, mais especificamente a madrugada do dia 27 de janeiro deste ano, acontece o incêndio na boate Kiss em Santa Maria. Incêndio este que causou a morte de

242 pessoas que frequentavam a casa noturna naquele dia. O acúmulo de erros que sucederam naquela noite são os responsáveis por esta tragédia, onde se destacam a superlotação do estabelecimento, comprovados com laudos, a utilização de sinalizador de uso externo pela banda, o extintor despressurizado incapaz de combater o princípio de incêndio, a falta de sinalização de emergência e a atuação dos seguranças da casa que em um primeiro momento não permitiram a saída das pessoas (TRAGÉDIA..., 2013).

3.3 AS MUDANÇAS NA LEGISLAÇÃO

Após os desastres ocorridos, mudanças começaram a surgir e, segundo Gill et al. (2008, p. 25-27), uma semana após o incêndio no edifício Joelma a prefeitura de São Paulo edita um decreto que versa sobre o assunto e em 1975 lança o seu reformulado código de obras que abrangia vários sistemas de prevenção contra o incêndio como a contenção de descargas atmosféricas, a limitação e o afastamento de combustíveis, medidas de proteção para a estabilidade estrutural nas rotas de fuga, compartimentações horizontal e vertical, dependendo do caso passou a ser exigido o uso de chuveiros automáticos e várias outras medidas. O novo código tratava também sobre formas de combate ao incêndio como instalação de hidrantes e extintores, e ampliou a exigência de alarmes, iluminação de emergência e sinalização. Em 1974 as cidades do Rio de Janeiro e Brasília sediaram simpósios que tratavam sobre o assunto. O Simpósio de Segurança Contra Incêndio contou com uma série de palestras organizadas pelo Clube de Engenharia do Rio de Janeiro, e os tópicos abordados eram como evitar incêndios, como combatê-los e como minimizar os efeitos. Já o Simpósio de Sistemas de Prevenção Contra Incêndios em Edificações Urbanas foi promovido pela Comissão Especial de Poluição Ambiental da Câmara dos Deputados e, depois de realizadas dez conferências, foram mostradas proposições, recomendações e solicitações.

Ainda em 1974, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publica a NB 208, que regulamenta as saídas de emergências em edifícios altos, atacando diretamente a maior causa de mortes devido a incêndios. No ano de 1975 é apresentado o decreto – lei pelo governador do Rio de Janeiro que trata sobre a segurança contra incêndio e pânico para o seu Estado. Vigente até hoje, porém com atualizações, este decreto tem uma grande abrangência e detalhamento cobrindo quase todas as medidas de segurança contra incêndio até hoje conhecidas. Também em 1975, o Corpo de Bombeiros de São Paulo tem uma reestruturação,

aumentado o enfoque para evitar os incêndios. Em 1978 o Ministério do Trabalho edita a NR 23 – Proteção contra incêndios, que rege a proteção contra incêndios na relação empregados/empregado, obrigando a proteção contra incêndio, saídas, equipamentos para combater incêndios e pessoas treinadas para fazer o uso destes equipamentos (GILL et al., 2008, p. 25-29).

No estado do Rio Grande do Sul em dezembro de 2013, impulsionada pela tragédia na boate Kiss em Santa Maria, foi elaborada a lei estadual nº 14.376/13 que ficou conhecida como Lei Kiss.

Esta nova lei visa a redução de riscos e preenche lacunas da legislação anterior que não era organizada e dava margem para dúvidas e interpretações. Esta lei antiga tinha ainda por costume resolver problemas pontuais conforme apareciam ao longo do tempo através de resoluções (SANTUCCI 2014 p. 23-27).

De acordo com Santucci (2014, p. 23 - 27) esta nova lei trouxe um aumento na rigidez dos sistemas de segurança contra incêndio. Eles ainda ressaltam a importância da fiscalização não apenas por parte dos órgãos competentes mas também pela sociedade. Salientam também que desde o incêndio em Santa Maria houve um aumento de 200 % nos programas de prevenção de incêndio.

Focando apenas na capital Porto Alegre, Castro (2015, p. 55) compara a antiga legislação municipal, que segundo ele fora utilizada não apenas na cidade de Porto Alegre como em outras cidades do Rio Grande do Sul, e a Lei Kiss. Ele diz que “[...]apesar de definirem as exigências de medidas de proteção contra incêndio, são conceitualmente diferentes.”. Ele explica dizendo que enquanto a Lei Complementar 420/98 da cidade de Porto Alegre além de classificar as edificações faz também o papel normativo praticamente em sua totalidade, a Lei Complementar 14.376/2013 do estado do Rio Grande do Sul apenas classifica, deixando as instruções normativas a cargo das NBRs ou instruções técnicas do Corpo de Bombeiros Militares do Rio Grande do Sul sendo que tais instruções são indicadas na própria lei.

Castro (2015, p. 73 - 94) mostra que existem diferenças nas medidas de proteção contra incêndio da Lei Complementar 420/98 e da Lei Complementar 14.376. Segundo ele, as medidas que foram criadas ou sofreram mudanças são:

acesso de viatura do Corpo de Bombeiros;
segurança estrutural e controle de materiais de acabamento e revestimento;
compartimentação vertical e horizontal;
detecção e alarme de incêndio;
saídas de emergência;
iluminação e sinalização de emergência;
brigada de incêndio;
controle de fumaça;
extintores;
hidrantes e mangotinhos;
chuveiros automáticos;
outros sistemas não usuais (sistema de comunicação, sistema de circuito de TV, sistema de resfriamento, sistema de espuma, controle de pós e controle de fontes de ignição).

4 ESTRUTURAS DE AÇO

4.1 COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS DO AÇO

Elementos construtivos quando em meio a um incêndio são analisados de duas formas. Resistência ao fogo, que diz respeito à capacidade deste elemento suportar o incêndio sem perder suas funções e reação ao fogo, que trata sobre as características de combustão deste elemento. A escolha dos elementos construtivos é um dos recursos que o profissional deve usar na hora de projetar um edifício, projetar a estrutura de forma adequada traz uma maior resistência ao colapso frente a um incêndio, o que significa uma maior segurança (SILVA et al., 2010, p. 22).

Segundo Mitidieri (2008, p. 56-59), um dos requisitos para uma edificação ser considerada segura é “Manter o edifício íntegro, sem danos, sem ruína parcial e/ou total.”. Para ele, a precaução contra o colapso estrutural esta diretamente ligada à resistência ao fogo dos elementos estruturais.

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

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

Segundo Vargas e Silva (2003, p. 16), o aço sofre redução de resistência e rigidez quando exposto a altas temperaturas, estas reduções devem ser consideradas na hora do dimensionamento da estrutura em situação de incêndio com a finalidade de garantir a segurança exigida. Por questões econômicas, afirmam ainda que “Uma vez que o incêndio é uma ação excepcional, isto é, de pequena probabilidade de ocorrência, não faz sentido dimensionar-se uma estrutura para que essa resista, em condição de incêndio, aos mesmos esforços atuantes à temperatura ambiente.”.

Vargas e Silva (2003, p. 17) dizem que “Para se garantir a segurança estrutural em situação de incêndio, deve-se evitar que a temperatura de colapso seja atingida.”. Para eles a temperatura de colapso, também chamada de temperatura crítica, está diretamente ligada ao carregamento da peça de modo que, quanto menor o carregamento, mais alta é a temperatura crítica.

Em uma situação normal, a causa dos esforços em uma estrutura decorre das ações da gravidade e de ventos, já durante um incêndio deve ser considerada a ação térmica. Essa ação térmica aumenta a temperatura da estrutura, que inicialmente está fria, reduzindo a capacidade resistente e gerando esforços devido à ação térmica (VARGAS ; SILVA, 2003, p. 17).

Para fins de dimensionamento, é necessário ter conhecimento de algumas das características do material utilizando quando exposto ao fogo. No caso do aço, alongamento, calor específico, condutividade térmica, massa específica e a redução da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade são fundamentais.

Segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 61), o alongamento pode ser calculado pelas formulas 1, 2 e 3.

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

$$\Delta l_a / l_a = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a - 2,416 \times 10^{-4} \quad (\text{fórmula 1})$$

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

$$\Delta l_a / l_a = 1,1 \times 10^{-2} \quad (\text{fórmula 2})$$

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

$$\Delta l_a / l_a = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

l_a é o comprimento da peça de aço a 20°C;

Δl_a é a expansão térmica da peça provocada pela temperatura;

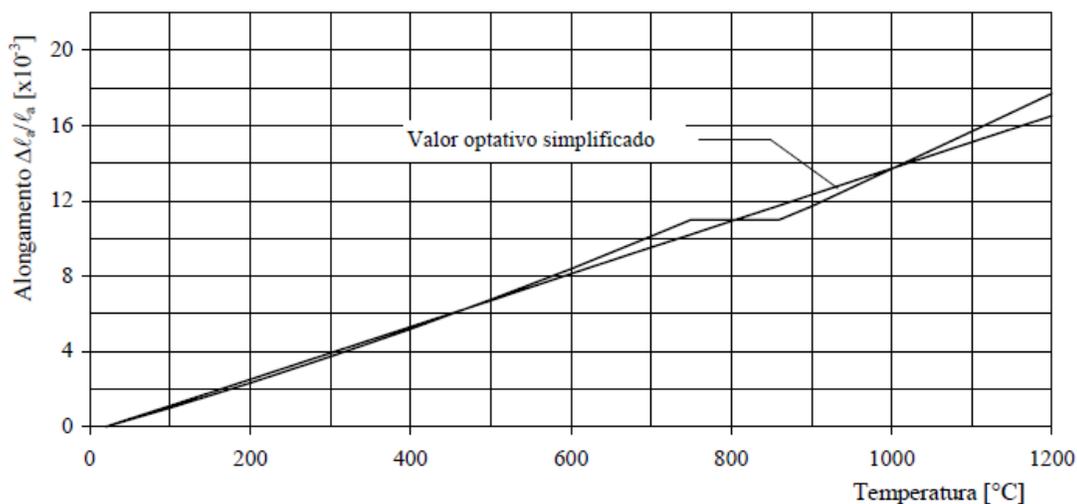
θ_a é a temperatura em graus celcius.

De forma simplificada pode ser adotada, segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 61), como a formula 4

$$\Delta l_a/l_a = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (\text{fórmula 4})$$

A figura 6 mostra o comportamento do alongamento conforme o aumento da temperatura.

Figura 6 – Alongamento x temperatura conforme NBR 14323



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 61)

Segundo Guimarães (2007, p. 67), “Calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de uma unidade de massa de uma substância.”, ela afirma que quando maior o calor específico, mais tempo leva para alterar a temperatura da substância.

Consta na NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 62) que a unidade do calor específico é o joule por quilograma e por grau Celcius (J/kg°C) e pode ser calculado pelas formulas 5, 6, 7 e 8.

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

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

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

$$C_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a) \quad (\text{fórmula 6})$$

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

$$C_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731) \quad (\text{fórmula 7})$$

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

$$C_a = 650 \quad (\text{fórmula 8})$$

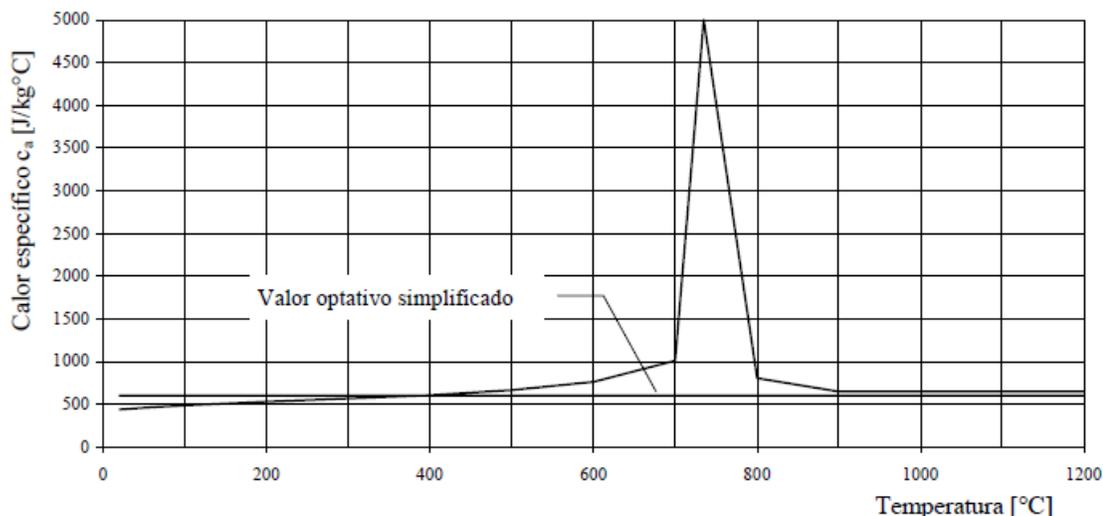
Sendo

θ_a a temperatura do aço, em graus Celsius;

C_a o calor específico do aço, em joule por quilograma e por graus Celsius.

De forma simplificada a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 62) sugere que pode ser usado o $C_a = 600 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, contando que o valor do calor específico do aço estrutural pode ser independente da temperatura. A figura 7 mostra o desenvolvimento do calor específico em função da temperatura.

Figura 7 – Calor específico x temperatura conforme NBR 14323



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 63)

Sobre a condutividade térmica Guimarães (2007, p. 67) diz:

O processo de transferência de energia térmica de uma região “mais quente” para outra “mais fria” de um mesmo corpo ocorre por condução. A região de maior temperatura possui moléculas vibrando com intensidade maior (maior energia cinética), cada molécula transmite energia para a molécula vizinha que passa a vibrar mais intensamente; esta transmite energia para a seguinte e assim sucessivamente. Evidentemente, há materiais com propriedades de condução de calor mais eficientes que outros. Portanto, diz-se que a transferência de calor é tão mais eficaz, quanto melhor condutor for o material. O aço é um ótimo condutor se comparado ao concreto, mas é um mau condutor se comparado ao cobre. Essa eficiência de condução de calor é medida por um parâmetro denominado Condutividade Térmica. Devido à maior aproximação de suas moléculas, os sólidos tendem a apresentar maiores valores de condutividade térmica em comparação aos líquidos e gases.

A NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 63) nos dispõe as formulas 9 e 10 para o calculo da condutividade térmica do aço.

Para $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,3 \times 10^{-2} \theta_a \quad (\text{fórmula 9})$$

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

$$\lambda_a = 27,3$$

(fórmula 10)

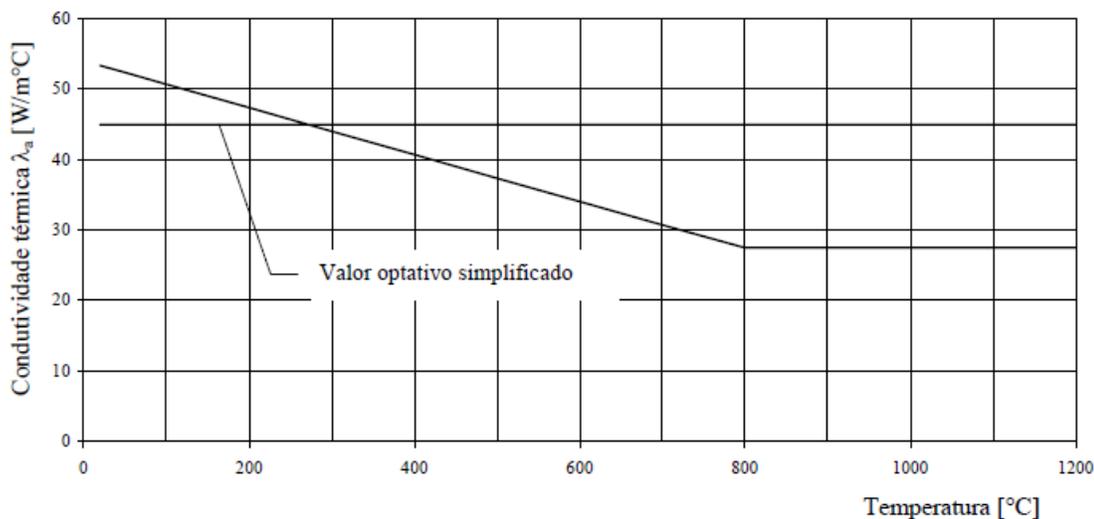
Sendo

θ_a a temperatura do aço, em graus Celcius;

λ_a a condutividade térmica do aço, em Watt por metro e por grau Celcius.

Pela forma simplificada, segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 63), pode ser adotado $\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ quando o valor da condutividade térmica do aço pode ser considerado independente da temperatura. A figura 8 mostra a relação condutividade térmica por temperatura.

Figura 8 – Condutividade térmica x temperatura conforme NBR 14323



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 63)

Para Guimarães (2007, p. 67), “A massa específica de uma substância é a razão entre a massa de uma quantidade da substância e seu volume correspondente.”.

Segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 11), a massa específica (ρ_a) do aço independe da temperatura e é igual à $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

O quadro 1 mostra os fatores de redução, em relação aos valores a 20°C, da resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade dos perfis de aços. As taxas de aquecimento ficam

entre 2°C/min e 50°C/min. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10).

Quadro 1 – Fatores de redução conforme NBR 14323

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados $k_{y,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços trefilados $k_{y_0,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados $k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços trefilados $k_{E_0,\theta}$
20	1,000	1,000	1,0000	1,000
100	1,000	1,000	1,0000	1,000
200	1,000	1,000	0,9000	0,870
300	1,000	1,000	0,8000	0,720
400	1,000	0,940	0,7000	0,560
500	0,780	0,670	0,6000	0,400
600	0,470	0,400	0,3100	0,240
700	0,230	0,120	0,1300	0,080
800	0,110	0,110	0,0900	0,060
900	0,060	0,080	0,0675	0,050
1000	0,040	0,050	0,0450	0,030
1100	0,020	0,030	0,0225	0,020
1200	0,000	0,000	0,0000	0,000

Nota: Para valores intermediários da temperatura do aço pode ser feita interpolação linear

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10)

Segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10) os fatores podem ser calculados conforme as formulas 11 e 12:

$$K_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y \quad (\text{fórmula 11})$$

$$K_{E,\theta} = E_\theta/E \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo :

$K_{y,\theta}$ o fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços;

$f_{y,\theta}$ a resistência ao escoamento dos aços a uma temperatura θ ;

f_y a resistência ao escoamento dos aços a 20°C;

$K_{E,\theta}$ o fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços;

E_θ o módulo de elasticidade dos aços a uma temperatura θ ;

E o módulo de elasticidade de qualquer aço.

Ainda segundo a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 17) “O índice de aumento de temperatura de um elemento estrutural de aço em incêndio é proporcional ao seu fator de massividade u/A , para elementos sem proteção, ou u_m/A , para elementos recobertos com material de proteção contra incêndio [...]”, onde u é o perímetro do elemento estrutural de aço exposto ao incêndio, u_m é o perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio e A é a área da seção transversal do elemento estrutural de aço.

4.2 PROTEÇÃO DAS ESTRUTURAS DE AÇO

Diferente da curva natural do incêndio, nas quais se tem uma fase de aquecimento e após consumir todo o combustível uma fase de resfriamento, a curva padrão representa apenas a fase de aquecimento dos gases e independe das características do compartimento. Trata-se de uma simplificação que pode ser empregada, mas cuidados devem ser observados. Esta curva padrão não passa por um máximo e com base nesta forma de incêndio, a temperatura do aço também crescerá indefinidamente. Resolve-se este problema adotando um determinado tempo em que se interrompe a curva de aquecimento, este tempo é chamado TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) (SILVA et al., 2010, p. 35).

Segundo a NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 3), a curva do incêndio padrão pode ser obtida a partir da formula 13.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log (8t + 1) \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

t o tempo, em minutos;

θ_0 a temperatura do ambiente antes de começar o incêndio, em graus Celsius, geralmente adotado igual a 20°C;

θ_g a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t .

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

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

A tabela A.1 da NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 7) mostra o respectivo TRRF em função da altura (h) e da ocupação da edificação. A altura h é definida por Silva et al. (2010, p. 37) como “[...] a distância compreendida entre o ponto que caracteriza a saída (situado no nível de descarga do prédio) e o piso do último pavimento, excetuando-se zeladorias, barrilete, casa de máquinas, piso técnico e pisos sem permanência humana.”. A tabela B.1 da NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 8-9) discrimina os diferentes tipos de ocupação das edificações, dividindo em grupos e serve de apoio para a tabela A.1.

Vargas e Silva (2003, p. 42) dizem que a solução mais frequente para evitar temperaturas excessivas nas estruturas de aço é utilizar um revestimento para proteção térmica. O material deste revestimento deve apresentar uma baixa massa específica aparente, baixa condutividade térmica, alto calor específico, adequada resistência mecânica, garantia de integridade durante o incêndio e custo compatível. Os quatro materiais de proteção térmica do aço mais comuns na construção civil são a argamassa projetada, fibras projetadas, placas rígidas e a pintura intumescente.

Sobre fibras e argamassas projetadas, Vargas e Silva (2003, p. 42) dizem:

As fibras e argamassas projetadas devem trabalhar monoliticamente com a estrutura e acompanhar seus movimentos, sem que ocorram fissuras ou desprendimento, formando um revestimento homogêneo e contínuo que penetre em todos os cantos ou reentrâncias da estrutura. Não podem conter asbestos ou outro material agressivo

à saúde dos usuários do edifício, nem apresentar desprendimento por ressecamento superficial ou por ação de correntes de ar, para não contaminar o ambiente.

A projeção destes materiais é feita através de um jateamento com ar comprimido que lança o material resultando em uma superfície rugosa. Devem atender as normas e passar por um ensaio de erosão que consiste em correntes de ar de 24 km/h incidindo sobre o material durante 4 horas onde o material não pode apresentar perdas. Qualquer perda de material resulta na redução da proteção. Devem ter a mesma durabilidade da estrutura, não ser higroscópicas e o aço deverá ficar livre de umidade. Não podem ser combustíveis e não devem propagar chamas, também não podem conter vazios para que insetos não consigam entrar no meio da camada de proteção (VARGAS ; SILVA, 2003, p. 42-43).

As placas rígidas são elementos pré fabricados que geralmente são feitas com materiais fibrosos, vermiculita, gesso ou a combinação destes materiais. Placa de gesso acartonado é um dos exemplos de placas rígidas e quando adicionada uma fibra mineral na mistura do núcleo, se torna resistente ao fogo. Placa de lã de rocha também é um exemplo, feita com material fibroso, em geral aglomerados por pulverização de resinas termoendurecíveis. É comum estas placas proporcionarem diversas possibilidades de acabamentos (SILVA et al. 2010, p. 57-58).

5 TINTAS INTUMESCENTES

Oliveira et al. ([2015?], p. 2) dizem que as tintas intumescentes “[...] são compostos químicos que, quando submetidos à temperaturas elevadas, passam por diversas reações que originam uma espuma carbonizada com alto desempenho isolante.”. Estes autores destacam 5 vantagens no uso desta forma de proteção, sendo eles a característica de tinta no sentido de ter uma gama de cores, um bom acabamento superficial e durabilidade. A segunda vantagem elencada é que a tinta intumescente não ocupa espaço e não adiciona cargas por ser leve. Outra vantagem é a simples aplicação apesar de necessitar de experiência e controle de qualidade, não precisa fixar na estrutura e a manutenção é simples. A quarta vantagem é que pode ser usada nas regiões de ligações estruturais. Por último os autores dizem que a pintura intumescente não modifica as propriedades intrínsecas do substrato, podendo ser aplicada em estruturas já existentes sem mexer sua capacidade estrutural.

De acordo com Ramos e Gonçalves¹ (2000 apud MESQUITA et al., 2005, p. 2) :

Os componentes ativos formadores da intumescência são o catalisador ou agente desidratante ácido, geralmente polifosfato de amônio, o agente carbonífero, como o pentaeritritol e o agente expensor, constituído por compostos nitrogenados como a melamina. De entre as reações químicas que ocorrem durante o processo da intumescência, destaca-se a decomposição do catalisador aproximadamente aos 150 [°C]. A uma temperatura superior, o ácido formado vai reagir com o agente carbonífero e a uma temperatura entre os 200 e os 300 [°C], dependendo do agente expensor, dá-se a decomposição deste formando-se gases que vão expandir o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta. Por volta dos 700 [°C] a camada superficial transforma-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica.

Para o desenvolvimento da intumescência, vários processos devem ocorrer em uma sequência correta conforme o aumento de temperatura. O agente carbonífero não deve se decompor ou volatilizar antes que o ácido esteja pronto pra desidrata – lo, os gases responsáveis pela formação da espuma devem se desenvolver dentro de bolhas dispersas na massa carbonizada, gerando um composto aerado. Se tiver baixa viscosidade, os gases formados irão escapar desta massa resultando em uma espuma fraca e cheia de rupturas na superfície. Por outro lado se a viscosidade for muito elevada a intumescência não se desenvolve, ou seja, este processo

¹ RAMOS, F.A.F.M.; GONÇALVES, C.M.; “Os revestimentos intumescentes na protecção passiva ao fogo de aço estrutural”, Corrosão e Protecção de Materiais, Vol. 19, Nº 1, 2000.

requer uma adequada viscosidade para ocorrer a reação desejada. Esta espuma carbonizada tem bolhas de 20 a 50 micrometros de diâmetro e paredes com 6 a 8 micrometros de espessura, pode ser colocado agregados inertes para dar um maior controle no tamanho das bolhas formadas. Outras adições podem ser usadas em compostos intumescentes para melhorar seu desempenho mecânico e térmico, como por exemplo elevar a resistência ao impacto físico de correntes de ar durante o incêndio (OLIVEIRA et al., [2015?], p. 6).

As formulas 14 ate 17 apresentam as reações químicas, segundo Troitzsch² (1983 apud OLIVEIRA et al., [2015?], p. 7), “Para o mecanismo de intumescência do fosfato dihidrogenado de amônio, Pentaeritritol e parafinas cloradas. O primeiro passo ocorre a temperaturas entre 150 e 215 °C – a decomposição do sal inorgânico produzindo gás amônia e ácido fosfórico.”.



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



Para Oliveira (2015, p. 7):

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

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



² TROITZSCH, J. H. Methods for the Fire Protection of Plastics and Coatings by Flame Retardant and Intumescent Systems. Marl, 1983.

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



Segundo Oliveira ([2015?], p. 8), a resina aglomerante forma uma camada sobre a mistura impedindo que os gases se dissipem. A viscosidade da espuma aumenta junto com o acréscimo de temperatura, esta espuma se solidifica devido à reticulação e carbonização gerando um material poroso e, quando a temperaturas passa dos 600°C, a massa carbonizada começa a se decompor. Estes autores concluem afirmando que “Quando comparada à espessura original, a camada intumescida é cerca de 50 a 100 vezes maior, formando uma barreira térmica que protegerá o substrato da influência do calor e de se decompor.”.

Vários autores propuseram modelos, geralmente bastante complexos, para tratar do comportamento da intumescência. Para contornar esta complexibilidade, os modelos se basearam em algumas simplificações como a consideração do modelo unidimensional de transferência de calor, propriedades térmicas independentes da temperatura e do espaço e a incidência de fluxo de calor constante, onde as perdas de calor por radiação e convecção são ignoradas, pode ser adotada também a ideia de que os processos termoquímicos da intumescência ocorrem sem liberação ou absorção de calor (OLIVEIRA et al., [2015?], p. 8).

Através de um estudo feito para a NASA (*Nation Aeronautic and Space Administration*) nos Estados Unidos, Clark et al.³ (1974 apud OLIVEIRA et al., [2015?], p. 8-9) propuseram um modelo analítico para tintas intumescentes destinadas à proteção de tanques metálicos de armazenamento de combustíveis à base de querosene. Conforme estes autores, o objetivo do estudo era desenvolver mecanismos analíticos para ver como a tinta se comportava em uma situação de incêndio e obter a combinação das espessuras da tinta e do isolante, caso esse fosse utilizado, que resultariam no melhor desempenho. A análise foi desenvolvida em 3 etapas, a determinação das condições térmicas, o calculo de uma matriz de soluções para as

³ CLARK, K. J., SHIMIZU, A. B., SUCHSLAND, K. E., MOYER, C. B. *Aerotherm Final Report 74-101 – Analytical Modeling of Intumescent Coating Thermal Protection System in a JP-5 Fuel Fire Environment*. Califórnia, 1974.

condições da superfície de controle do volume e a determinação das equações de balanço de massa e energia do material. As características termodinâmicas desta tinta foram obtidas pela média das propriedades para o material antes da reação e após ter reagido por completo. Foram avaliados modelos com diferentes espessuras e também modelos com camada isolante inerte. Os resultados obtidos pelos autores mostram que, expondo uma placa de aço de 1,52 milímetros sem revestimento contra fogo e um fluxo de calor de 17,03 W/cm², a temperatura na face oposta à incidência do fogo terá 1250°C em 30 segundos. Com as mesmas condições, mas com uma camada de 1,02 milímetros da tinta utilizada, foram necessários 2 minutos para atingir a mesma temperatura. Conforme esperado, foi verificado que uma camada de isolante inerte melhora o desempenho do revestimento contra fogo, o estudo porém não obteve muitas conclusões sobre a determinação da melhor relação da tinta intumescente com esta camada.

Outros estudos também foram feitos com o intuito de descrever o comportamento de tintas intumescentes. Anderson e Wauters⁴ (1984 apud OLIVEIRA et al., [2015?], p. 9-10) também propõe um modelo matemático que descreve os diversos processos físicos de um sistema intumescente considerando o controle de massa e energia. Analogamente a Clarck et. al., este autor relaciona a perda de massa com a expansão.

O estudo de Buckmaster et al.⁵ (1986 apud OLIVEIRA et al., [2015?], p. 11) é elencado pois “Diferencia-se dos trabalhos anteriores pela forma como aborda a intumescência.”. Por fim, o trabalho de Staggs⁶ (2010 apud OLIVEIRA et al., [2015?], p. 11) onde usando imagens segmentadas de uma seção intumescida, propõe a estimativa através de simulações numéricas, da condutividade térmica da tinta intumescente.

⁴ ANDERSON, C. E., WAUTERS, K. D. A Thermodynamic Heat Transfer Model for Intumescent Systems. San Antonio, 1984.

⁵ BUCKMASTER, J., ANDERSON, C., NACHMAN, A. A Model for Intumescent Paints. Ilinóis/San Antonio, 1986.

⁶ STAGGS, J. E. J. Thermal Conductivity Estimates of Intumescent Chars by Direct Numerical Simulation. Leeds, 2010.

6 PLANO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será feita a descrição de como foi realizado o experimento, mostrando os materiais, procedimentos e o método utilizados.

6.1 MÉTODO EXPERIMENTAL

Como não existe nenhuma norma técnica nacional que padronize o ensaio de incêndio em perfis metálicos em situação de carregamento, foi elaborado um método específico de ensaio para a realização do experimento.

O presente trabalho visa estudar perfis metálicos protegidos com tintas intumescentes submetidos à carga mecânica de compressão axial e a uma carga de incêndio. Para tal estudo foi decidido que a maneira mais próxima da realidade que poderia ser reproduzida em escala nas dependências do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) foi utilizando uma prensa hidráulica que se encarregou de reproduzir a carga mecânica de compressão axial e maçaricos que serviram para aplicar a carga de incêndio. O método utilizado está descrito em detalhes no item 6.5.3.

6.2 DESCRIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram utilizados dois tipos de perfis metálicos para a realização dos ensaios: um perfil do tipo cantoneira e um perfil do tipo “U”. A seguir são descritos os corpos de prova utilizados no experimento.

6.2.1 Perfil cantoneira

Dentre as aplicações do perfil cantoneira destaca-se para o presente trabalho o seu uso como reforço em pilares, ou em treliças de suporte de telhados, ou ainda qualquer outra configuração em que o perfil possa estar submetido a cargas axiais de compressão. No caso de

utilização como reforço em pilares, e por ficarem nos extremos do elemento estrutural, são os primeiros a sentir a ação de um incêndio. Foi escolhido para este trabalho o perfil cantoneira de abas igual de 2 polegadas com 3/16 polegadas de espessura e 80 cm de comprimento. O comprimento do perfil foi limitado pela altura útil da prensa hidráulica utilizada para a realização dos ensaios. A figura 9 ilustra o perfil escolhido.

Figura 9 – Perfil cantoneira utilizado no trabalho



(fonte: foto do autor)

6.2.2 Perfil “U”

O perfil “U” escolhido é aplicado em estruturas como, por exemplo, tesouras, estruturas de uma escada metálica, mezaninos e até mesmo vigamento de estruturas que não requerem uma carga muito elevada. Muitas vezes este tipo de estrutura metálica não recebe nenhum tipo de proteção contra incêndios e, assim como as cantoneiras, são os primeiro a sentir a ação do fogo. Para o presente trabalho foi utilizado o perfil “U” com bitola de 3 polegadas, com espessura de 4,32 milímetros na alma e com 80 cm de comprimento. Salienta-se novamente que a altura do perfil foi limitada pela altura útil da prensa hidráulica. A figura 10 ilustra o perfil “U” utilizado.

Figura 10– Perfil “U” utilizado no trabalho



(fonte: foto do autor)

6.3 DESCRIÇÃO DAS TINTAS INTUMESCENTES

Foram utilizadas para a realização dos ensaios duas tintas intumescentes para a proteção dos perfis metálicos à ação das altas temperaturas, as quais serão nomeadas tinta A e tinta B. A primeira tinta é a Renitherm® PMA 600 e foi escolhida em função da disponibilidade no mercado e por ser referência do produto nacionalmente. Esta tinta, feita a base de água, é fabricada na Alemanha e foi desenvolvida para ser utilizada em estruturas metálicas.

A segunda tinta é fruto de um trabalho acadêmico desenvolvido no Laboratório de Polímeros (LaPol) da Universidade Federal do Rio grande do Sul, que já se encontra em processo de patenteamento. Esta tinta foi desenvolvida para aplicação em substratos metálicos, mas também pode ser aplicada em madeira. A tinta é à base do solvente de Metil Etil Cetona e o tempo de secagem é de no mínimo 24 horas, sendo o ideal uma secagem de 48 horas.

Além das duas tintas intumescentes, também serão avaliados os perfis sem a aplicação de qualquer tinta intumescente, para fins de comparação com os perfis com as tintas. Foram utilizados dois corpos de prova por tipo de perfil e por tinta utilizada, totalizando 12 corpos de prova, incluindo os perfis sem tinta.

6.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Uma vez definidos os corpos de provas e as tintas a serem aplicadas, foi realizada a preparação dos perfis para posterior ensaio à ação simultânea de compressão axial e altas temperaturas.

O preparo inicial dos corpos de provas foi feito a partir de uma verificação visual prévia, onde foi inspecionada a existência de irregularidades e a presença de substâncias que podem interferir na aplicação da tinta como, por exemplo, óleos, poeiras entre outros. Foi inspecionada também a presença de ferrugem nos corpos de provas.

Aqueles que necessitaram de reparos foram devidamente tratados com soluções que removessem tais problemas. Segundo a NBR 15239 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 3 – 4), podem ser utilizadas ferramentas manuais e ferramentas mecânicas para fazer o tratamento da superfície de aço. Optou-se pelo uso de ferramentas manuais e que seria atingido o grau A de intemperismo de superfície de aço sem pintura. Conforme a NBR 15239 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 2), o grau A significa que a superfície do aço esta com pouca ou nenhuma corrosão. Ainda segundo esta norma, uma vez que a superfície apresenta um grau A de intemperismo, não se aplicam os graus de preparação da superfície de aço.

Após o tratamento inicial dos corpos de prova, seguiu-se à aplicação da tinta intumescente nos perfis que seriam protegidos por esta técnica. Para a aplicação da tinta A nos corpos de prova, que foram tratados superficialmente com uma lixa para a remoção do excesso de ferrugem, o comerciante desta tinta aplicou um *primer* anticorrosivo para somente então ser aplicado o revestimento intumescente. A espessura da camada da pintura foi aplicada conforme as recomendações do fabricante, ficando a espessura de 205 microns para o perfil cantoneira e 335 microns para o perfil “U”. Já para a tinta B, os perfis foram limpos com acetona e lixados, e não foi aplicado nenhum *primer*. A espessura da camada de pintura nos perfis cantoneira

ficou na faixa entre 1500 a 2000 microns e para o perfil “U” o valor ficou entre 3000 e 4000 microns. A aplicação de um *primer* assim como a espessura da camada foi feita em função da recomendação dos fabricantes.

Foi necessário enviar para o comerciante da tinta A os corpos de prova para que a aplicação da tinta fosse realizada no ambiente de fábrica, a fim de não haver variabilidade referente a aplicação feita por profissionais não credenciados pela marca, logo não experientes em aplicação da tinta desta marca. Como a tinta B foi produzida pelo Laboratório LaPol da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a aplicação foi facilitada uma vez que este estava próximo ao laboratório onde foram ensaiados os corpos de prova. A figura 11 mostra o procedimento de aplicação da tinta B nos perfis metálicos.

Figura 11 – Procedimento de aplicação da tinta B nos corpos de prova



(fonte: foto do autor)

O preparo inicial dos corpos de prova foi realizado horas antes da aplicação das tintas, visando não correr o risco de surgirem, ou ressurgirem, agentes que poderiam gerar quaisquer tipos de variabilidade no teste, como novos pontos de corrosão superficial, por exemplo. Sendo assim, para os corpos de prova que foram pintados no próprio laboratório (com a tinta B), o preparo do corpo de prova ocorreu logo antes da aplicação da tinta e para o corpo de prova em que não foi aplicada tinta nenhuma, o preparo foi feito horas antes do ensaio destes

para os que necessitaram tal preparo. A figura 12 mostra a aparência dos corpos de prova com aplicação da tinta A, da tinta B, e dos corpos de prova sem aplicação de tintas intumescentes.

Figura 12 – Aparência dos corpos de prova após o preparo inicial e pintura intumescente



(fonte: foto do autor)

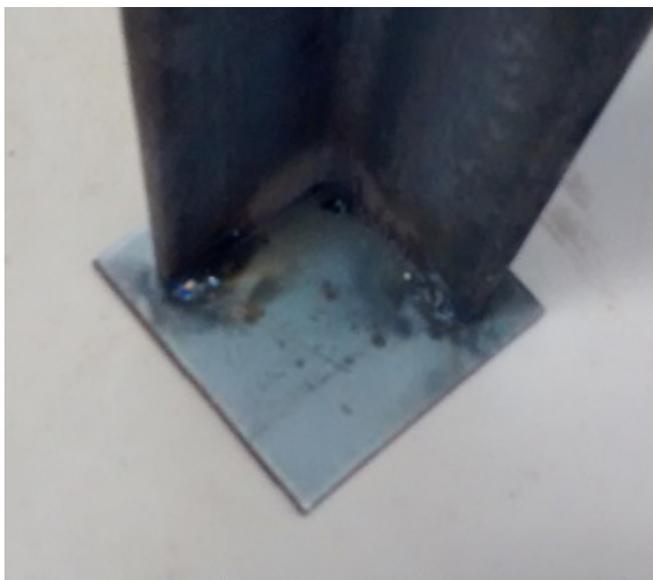
6.5 MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Devido à inexistência de normas específicas para ensaios de tintas intumescentes em estruturas metálicas, foi proposto neste trabalho um tipo de simulação que pudesse representar uma condição semelhante à de um incêndio real em um elemento submetido a um carregamento axial. O ensaio foi realizado nas dependências do Laboratório LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

6.5.1 Etapa 1 – Aplicação de carga axial de compressão

Anteriormente ao ensaio, os perfis devem ser preparados de maneira a incluir chapas metálicas planas paralelas entre si, soldadas em ambas as extremidades, visando uma melhor disposição do corpo de prova durante a realização do ensaio e uma melhor distribuição da carga axial na seção do perfil. A figura 13 mostra os perfis com as chapas soldadas em ambas as extremidades.

Figura 13 – Perfil de aço com chapas planas soldadas nas extremidades



(fonte: foto do autor)

Após a colocação das chapas, o método de ensaio consiste em posicionar o perfil a ser ensaiado em uma prensa hidráulica (a prensa utilizada para os ensaios é da marca Shimadzu com capacidade para 2000 kN), até que seja atingida uma carga axial de compressão igual a 20% da carga máxima de ruptura do perfil, sendo que a prensa ficaria travada nesta posição.

Conforme já mencionado no item 6.1 referente ao método experimental, foi prevista para o experimento a aplicação de uma carga mecânica de compressão nos corpos de prova buscando simular uma situação semelhante ao de um incêndio real onde as estruturas estão carregadas, desempenhando o seu papel de suporte estrutural. Conhecendo as características do metal submetido a altas temperaturas, que se expande gerando reações internas que aumentam a carga aplicada quando este não tem para onde expandir em uma das direções, foi necessário

calcular a carga crítica do corpo de prova e aplicar uma carga correspondente a vinte por cento deste valor. A carga foi aplicada de forma que não exista nenhuma excentricidade, ou seja, axialmente, a fim de não favorecer o surgimento de um momento indesejado.

6.5.1.1 Cálculo da carga crítica do perfil cantoneira

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 123 – 125), a carga crítica de uma cantoneira de abas iguais comprimida é calculada através da fórmula 18.

$$N_{e_x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{x1}}{(K_{x1} \cdot L_{x1})^2} \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

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

E é o módulo de elasticidade do aço;

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

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

L_{x1} é o comprimento da cantoneira.

Sendo que para o cálculo de $K_{x1} \cdot L_{x1}$ a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 123) afirma que devem ser aplicadas as fórmulas 19 e 20.

$$K_{x1} \cdot L_{x1} = 72 \cdot R_{x1} + 0,75 \cdot L_{x1}, \text{ quando } 0 < \frac{L_{x1}}{R_{x1}} < 80 \quad (\text{fórmula 19})$$

$$K_{x1} \cdot L_{x1} = 32 \cdot R_{x1} + 1,25 \cdot L_{x1}, \text{ quando } \frac{L_{x1}}{R_{x1}} > 80 \quad (\text{fórmula 20})$$

Onde:

Rx1 é o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico.

Para o presente corpo de prova o Kx1.Lx1 calculado é igual a 173,76 cm e o Ix1 deste perfil é igual a 11,70 cm⁴. Portanto o Ne_x para este caso é igual a 76,49 KN

6.5.1.2 Cálculo da carga crítica do perfil “U”

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 121 – 125), a carga crítica de um perfil “U” é calculada através das fórmulas 21 e 22 que representam a flambagem elástica por flexão e flambagem elástica por flexo torção, respectivamente.

6.5.1.2.1 Flambagem elástica por flexão, Ne_y

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (\text{fórmula 21})$$

Onde:

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

E é o módulo de elasticidade do aço;

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;

K_y é o coeficiente de flambagem por flexão;

L_y é o comprimento do perfil.

Para o presente corpo de prova, o I_y é igual a 8,2 cm⁴ e o K_y.L_y calculado é igual a 80cm, resultando em Ne_y igual a 252,9 KN.

6.5.1.2.2 Flambagem elástica por flexo torção, N_{xz}

$$N_{xz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{fórmula 22})$$

Onde:

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

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

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

y_0 é a coordenada do eixo de cisalhamento na direção do eixo central y;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado pela fórmula 23:

$$r_0 = \sqrt{(rx^2 + ry^2 + xv^2 + yv^2)} \quad (\text{fórmula 23})$$

Onde rx e ry são os raios de giração em relação aos eixos centrais x e y, respectivamente, e xv e yv são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

Sendo que para o calculo das forças axial de flambagem por flexão em relação ao eixo de inércia x e força de flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z, a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 123) fornece as fórmulas 24 e 25, respectivamente.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (\text{fórmula 24})$$

Onde:

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

E é o módulo de elasticidade do aço;

I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;

K_x é o coeficiente de flambagem por flexão;

L_x é o comprimento do perfil.

Para o presente trabalho, o N_{e_x} calculado é igual a 2125,05KN.

$$N_{e_z} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (\text{formula 25})$$

Onde:

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

E é o módulo de elasticidade do aço;

K_z é o coeficiente de flambagem por torção;

L_z é o comprimento do perfil;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

J é a constante de torção da seção transversal;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal.

Para o perfil utilizado, o N_{e_z} é igual a 1016,99 KN.

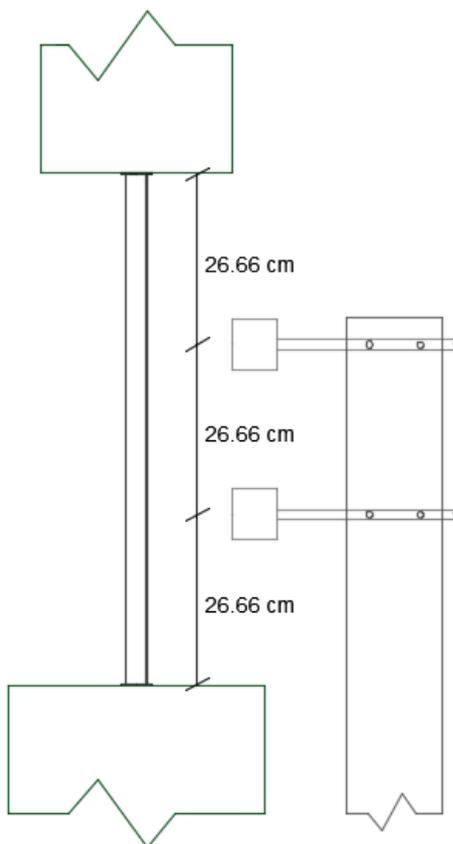
Uma vez calculados o N_{e_x} e N_{e_z} , conclui-se que o $N_{e_{xz}}$ para este perfil é igual a 935,79KN.

6.5.2 Etapa 2 – Aplicação da carga de incêndio

Após o carregamento inicial descrito no item anterior, é aplicada a carga de incêndio com o uso de maçaricos previamente posicionados em pontos equidistantes entre si, no terço médio do perfil, conforme pode ser observado no desenho esquemático da figura 14. Esta mesma figura mostra também que a carga de incêndio será aplicada em apenas uma das faces do perfil. Salienta-se que os maçaricos devem ser fixados de forma a não serem movidos durante o teste. A distância dos maçaricos ao perfil foi adotada de tal forma que a labareda que esteja

atingindo o corpo de prova fosse a mesma para todos os ensaios e também visando uma melhor distribuição da temperatura ao longo da altura do perfil. A carga de incêndio é aplicada mantendo-se a carga inicial de compressão no perfil (20% da carga máxima).

Figura 14 – Desenho esquemático da posição dos maçaricos ao longo da altura dos perfis



(fonte: imagem do autor)

Após a aplicação simultânea da carga de incêndio e do carregamento axial inicial, foram utilizados *data loggers* para aquisição contínua do incremento de carga devido à aplicação de da carga de incêndio. O incremento de carga é devido à dilatação do material em situação de restrição, como a encontrada nos perfis durante o ensaio.

Além do incremento de carga, foram também coletados os perfis de temperatura da face não exposta dos perfis, por meio de *data loggers* conectados a termopares. Os termopares utilizados são do tipo K, e foram posicionados na face imediatamente oposta aos pontos de

aplicação dos maçaricos. O incremento de carga e as temperaturas foram coletadas considerando uma frequência de 10 Hz, sendo que a cada segundo são coletados 10 pontos. É possível visualizar a disposição dos medidores termopares na figura 15.

Além da utilização dos termopares, uma câmera termográfica da marca Flir auxiliou na coleta de dados da temperatura na superfície dos corpos de prova. A câmera atua na faixa de zero até 670 °C e tirou fotos durante os ensaios focando a mesma face que os termopares estavam encostando.

Figura 15 – Disposição dos termopares



(fonte: foto do autor)

6.5.3 Resumo dos procedimentos de ensaio para o método proposto

Para a realização dos ensaios, foi obedecida a seguinte sequência de procedimentos:

- a) posicionamento do corpo de prova na prensa hidráulica, deixando as duas extremidades em contato com as faces da prensa;
- b) aplicação da carga mecânica de compressão axial até o limite estabelecido e esperar alguns segundos a fim de não haver algum tipo de oscilação na carga;
- c) posicionamento dos medidores termopares já conectados ao programa Field logger;

- d) posicionamento dos maçaricos e verificação se estes estão posicionados firmemente;
- e) ignição e início da cronometragem do tempo previsto para o ensaio;
- f) acompanhar o teste interrompendo a carga de incêndio quando atingido o tempo limite do teste (máximo de 30 minutos) ou até o perfil sofrer algum tipo de ruptura;
- g) anotar os resultados de carga mecânica e temperatura na superfície do metal em função do tempo, obtidos no teste;
- h) repetir os procedimentos de a) até g) com todos os corpos de prova;
- i) analisar os resultados obtidos com todos os corpos de prova.

7 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as curvas de temperatura por tempo e de carregamento por tempo dos corpos de prova.

Por questões de ter de reproduzir a carga mecânica axial através de uma prensa hidráulica e pela falta de um equipamento que pudesse reproduzir curvas de incêndio-padrão⁷, o qual simularia um crescimento de temperatura ao longo do tempo padronizado, foi decidido adotar dois maçaricos que funcionaram como duas fontes de calor constantes as quais foram posicionadas no terço médio do corpo de prova, conforme já mencionado no item 6.5.2 do capítulo 6. A quantidade de energia produzida pelas fontes de calor foi controlada através da distancia destes ao corpo de prova que para o presente trabalho foi de 19 cm para o perfil cantoneira e 20,5 cm para o perfil “U”, e pela quantidade de gás liberada para o bocal do maçarico. Pequenas variações da temperatura, por volta de 30 °C, da labareda que atingiram a peça foi admitida no teste uma vez que o ambiente não estava completamente isento de pequenas quantidades de correntes de ar entre outros motivos que podem ter levado a tal variação. A figura 16 apresenta um dos perfis pronto para a realização do ensaio.

⁷ Conforme Vargas e Silva (2003, p. 18), a curva de incêndio-padrão é uma convenção adotada para análises experimentais uma vez que a curva temperatura-tempo se altera a cada situação estudada. Eles ressaltam que "Quaisquer conclusões, que tenham por base essa curva, devem ser analisadas com cuidado, pois não correspondem ao comportamento real do incêndio ou das estruturas expostas ao fogo."

Figura 16 – Perfil durante a realização do ensaio, com os maçaricos já posicionados



(fonte: foto do autor)

7.1 CORPOS DE PROVA SEM APLICAÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE

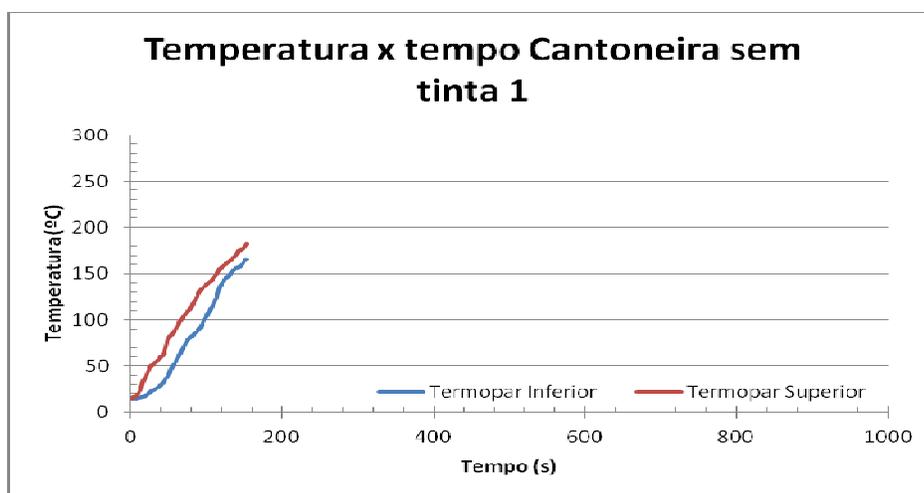
Com a finalidade de servirem como referência, corpos de prova sem a aplicação de nenhuma tinta foram ensaiados e os resultados são apresentados neste item.

7.1.1 Perfil cantoneira sem tinta

Foram ensaiados dois perfis tipo cantoneira sem a aplicação de tinta. O primeiro perfil foi testado por durante aproximadamente 141 segundos até começar a perder carga em função de uma flambagem global. Este é o tempo que nos interessa apesar de, nos testes, serem mantidas acesas as fontes de calor por mais algum tempo. No momento em que inicia a flambagem do perfil, a prensa hidráulica acusava uma carga de aproximadamente 66,4 kN. A temperatura no perfil aos 141 segundos de teste era de, segundo a medição feita pelos termopares, 173 °C no termopar superior e 156 °C no termopar inferior. Também foi utilizada

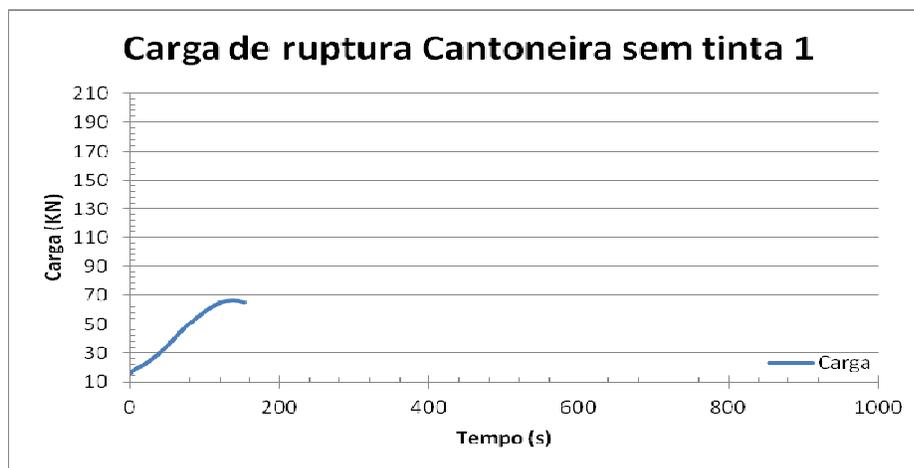
para a medição da temperatura uma câmera termográfica, a qual indica que a temperatura máxima de 670 °C aos 137 segundos. Salienta-se que a temperatura apresentada pela câmara é a máxima do perfil como um todo, e não a temperatura da face oposta à aplicação do calor, que é medida pelos termopares. As figuras 17 e 18 apresentam o comportamento do corpo de prova ao longo do tempo em relação à temperatura (segundo os termopares) e a carga mecânica, respectivamente. A figura 21 apresenta uma imagem da câmera termográfica no momento da ruptura.

Figura 17 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil cantoneira sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

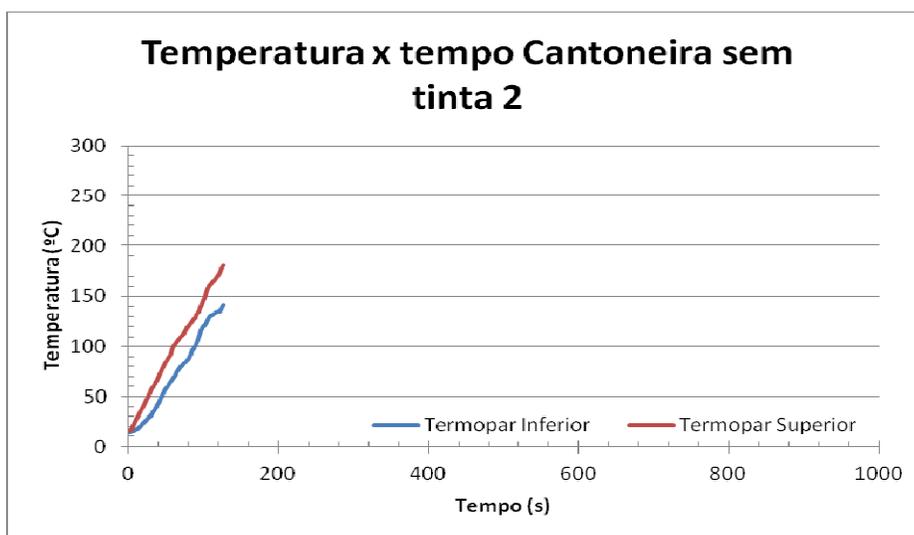
Figura 18 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

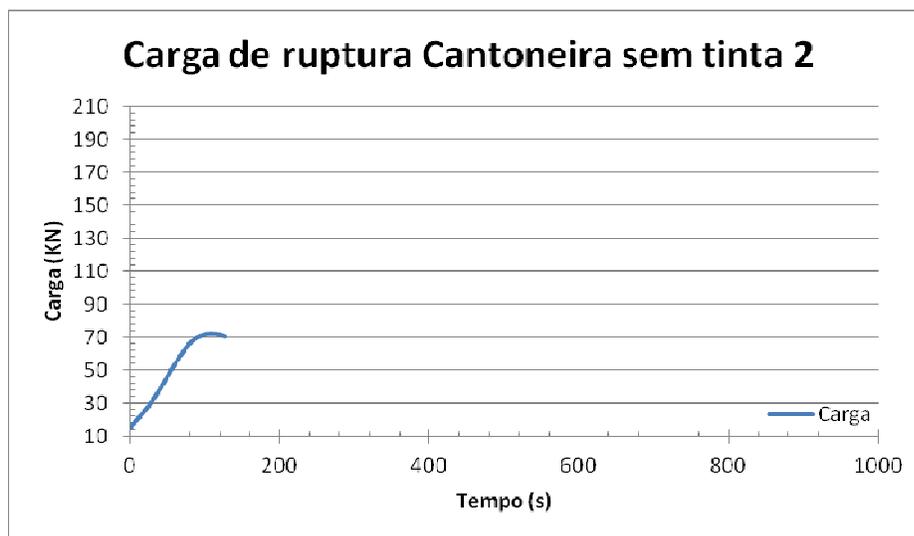
A segunda cantoneira teve sua ruptura aos 110 segundos de teste onde, neste momento suportava uma carga de 72,8 kN e estava com uma temperatura de 162 °C no termopar superior e 130 °C no termopar inferior. A câmara termográfica apresentou uma temperatura máxima de 670 °C aos 108 segundos. As figuras 19 e 20 mostram o comportamento do perfil ao longo do tempo.

Figura 19 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira sem tinta



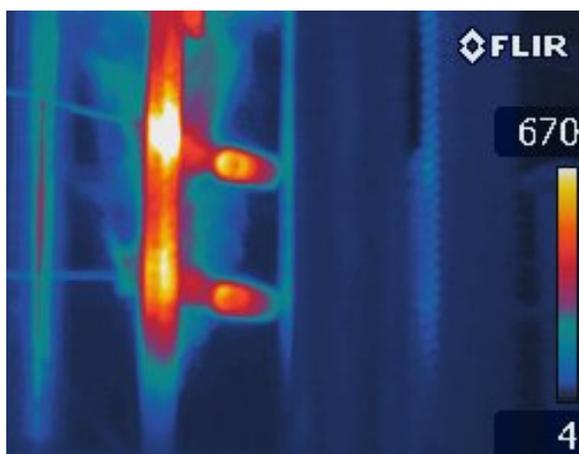
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Temperatura no perfil cantoneira sem tinta segundo câmera termográfica

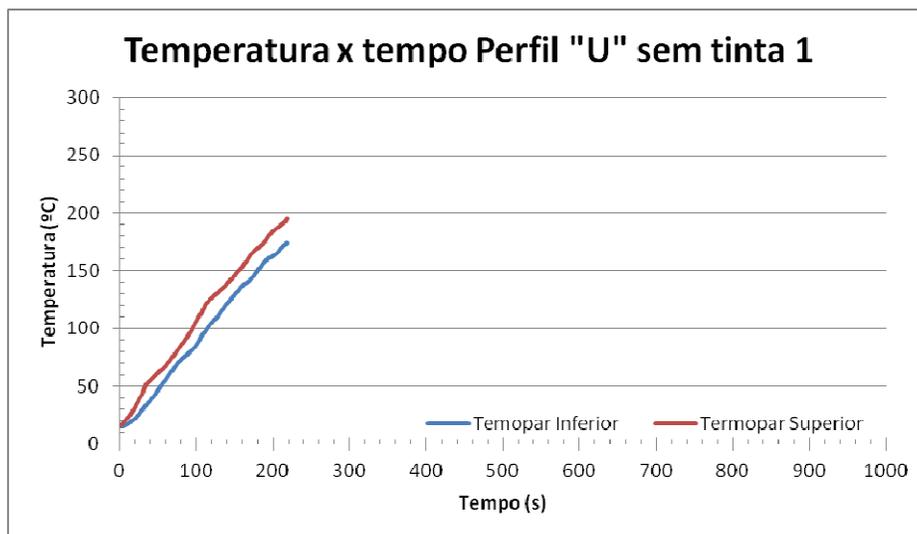


(fonte: foto do autor)

7.1.2 Perfil “U” sem tinta

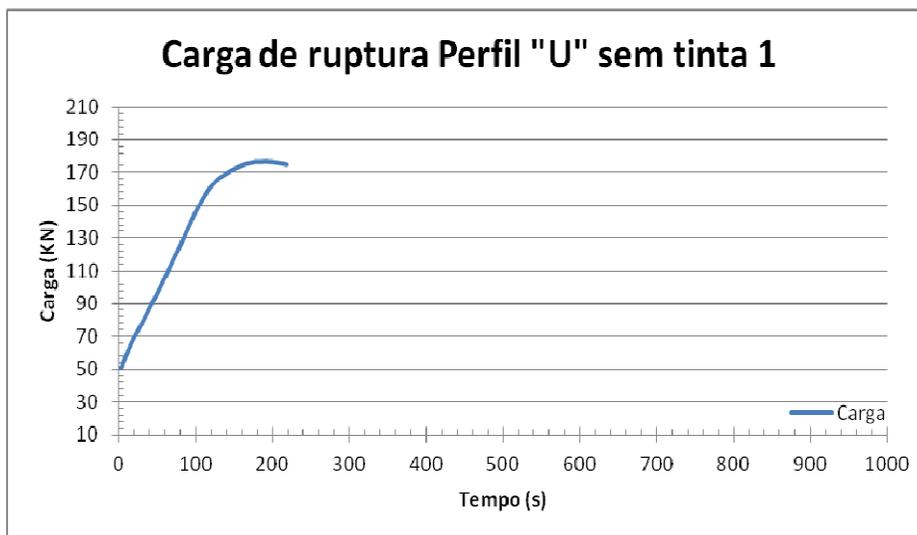
Assim como para os perfis cantoneiras, foram ensaiados dois perfis “U” sem a aplicação de tintas. A ruptura do primeiro perfil “U” ocorreu aos 192 segundos atingindo uma carga de 176,8 kN com 178 °C no termopar superior e 159 °C no termopar inferior. A câmera termográfica apontou uma temperatura máxima de 670 °C aos 158 segundos. As figuras 22 e 23 mostram o comportamento do perfil ao longo do tempo enquanto a figura 26 mostra uma imagem da câmera termográfica no momento da ruptura.

Figura 22 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil “U” sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

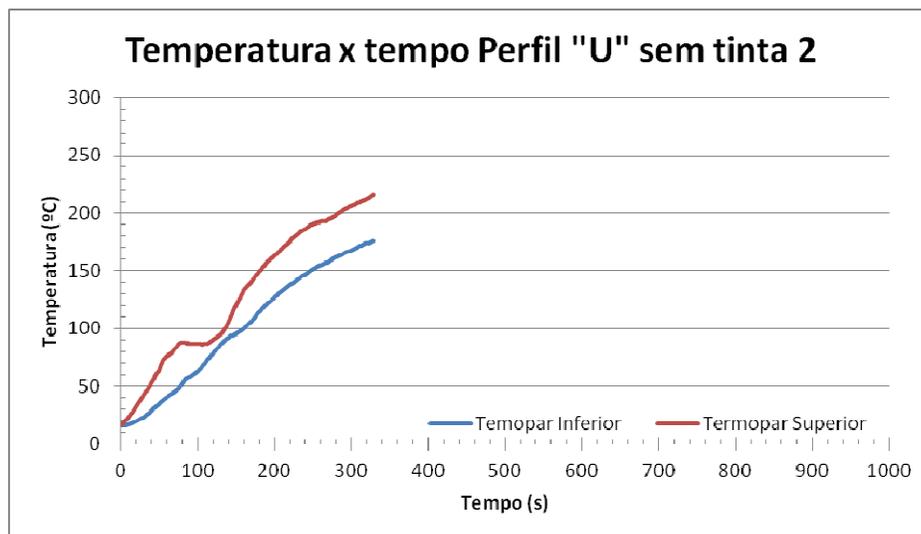
Figura 23 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

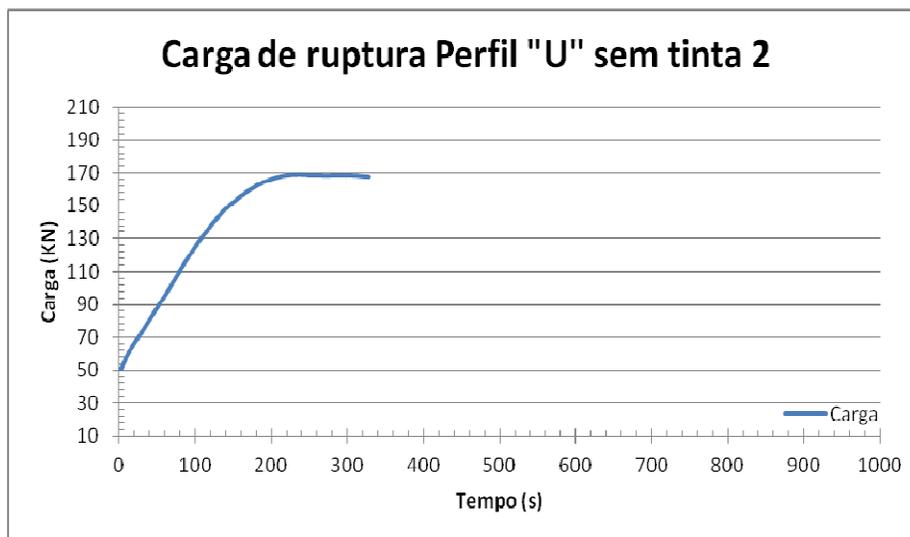
Depois de passados 235 segundos de ensaio o outro perfil “U” sem tinta chegou a ruptura. Neste momento constava na prensa hidráulica a carga de 169,4 kN e os termopares apontavam temperaturas de 184 °C no termopar superior e 145 °C no termopar superior enquanto a câmara termográfica indicava a temperatura máxima de 670 °C aos 220 segundos. As figuras 24 e 25 apresentam o comportamento do perfil ao longo do tempo.

Figura 24 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil "U" sem tinta



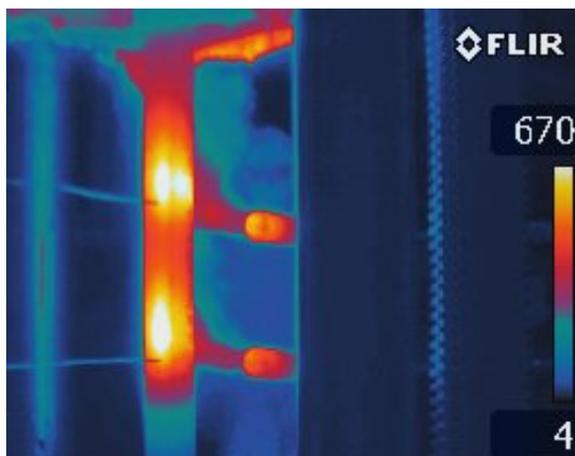
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil "U" sem tinta



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Temperatura no perfil “U” sem tinta segundo câmera termográfica



(fonte: foto do autor)

7.2 CORPOS DE PROVA PINTADOS COM TINTA A

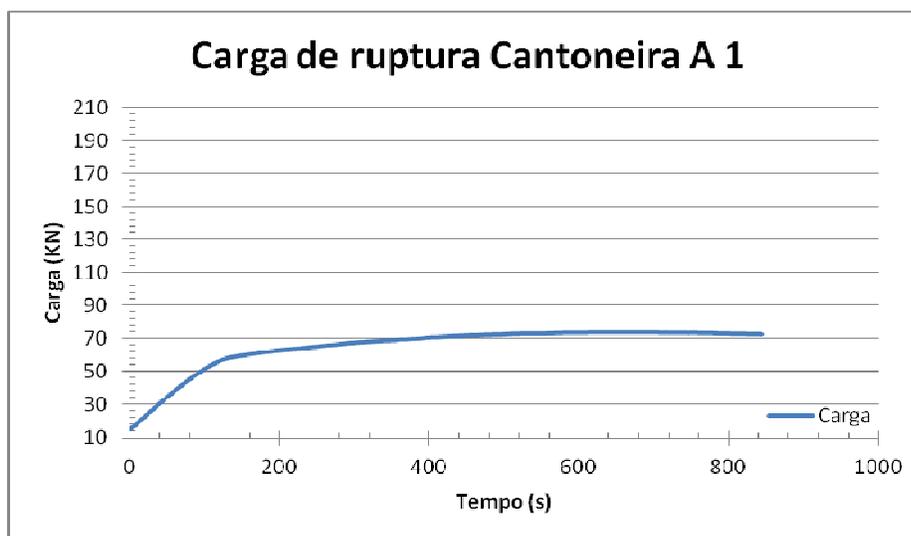
A tinta A foi fornecida pela CKC do Brasil, os perfis foram preparados pela própria equipe da empresa a fim de garantir uma melhor aplicação do produto.

O primeiro perfil cantoneira e o primeiro perfil “U”, não contaram com o apoio do uso dos termopares, pois estes estavam sendo utilizados em um outro experimento do laboratório no momento do ensaio. De qualquer forma, não foi uma perda tão significativa uma vez que a parte de trás do perfil estava pintada com tinta que, durante o ensaio, reagiu à alta temperatura o que comprometeria a leitura dos medidores termopares.

7.2.1 Perfil cantoneira com tinta A

Conforme já comentado sobre o contratempo no momento do ensaio, a temperatura deste corpo de prova foi observada apenas pela câmera termográfica, a qual apresentou a temperatura de 553,6 °C, aos 674 segundos, momento em que atingiu a carga máxima de 74,2 kN sofrendo a ruptura. A figura 27 mostra o gráfico do crescimento da carga em função do tempo deste perfil.

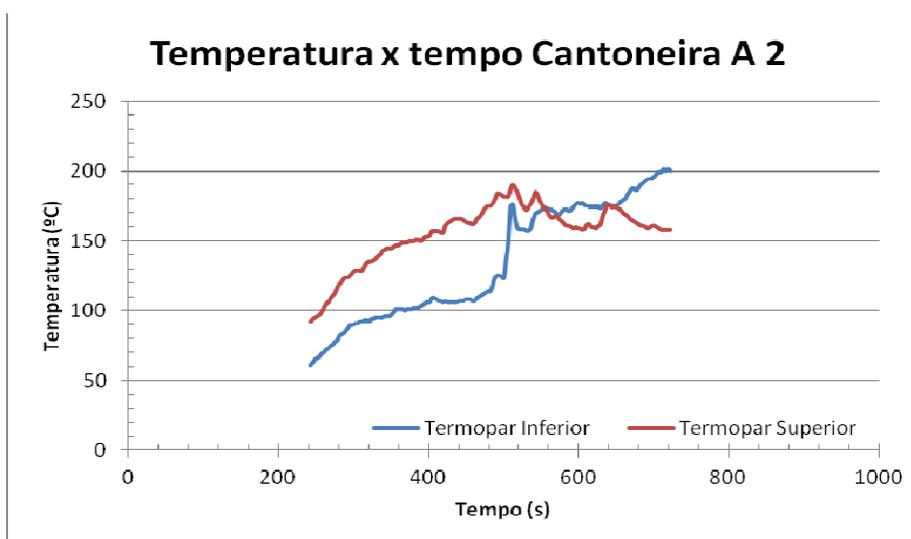
Figura 27 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta A



(fonte: elaborado pelo autor)

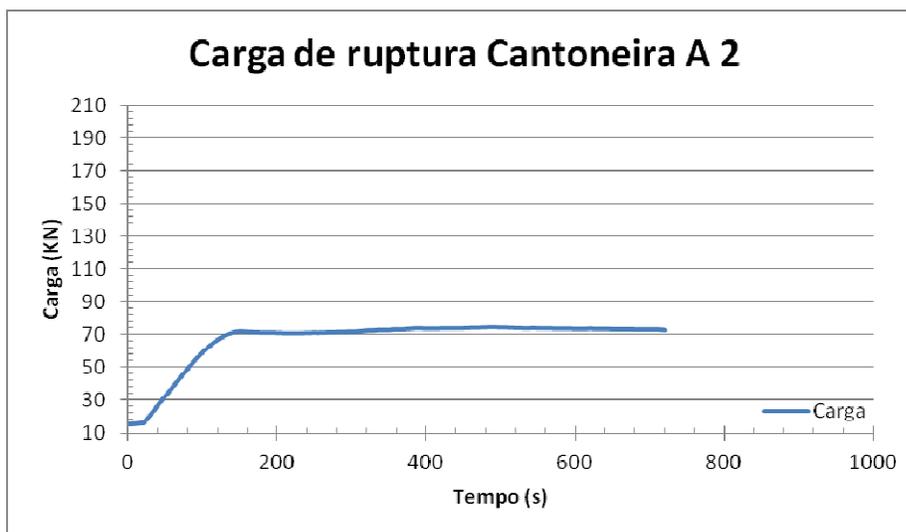
O outro perfil que foi revestido com a tinta A contou com o uso dos medidores termopares e apresentou uma temperatura de 180 °C no medidor superior e 123 °C no inferior após passados 488 segundos, momento da ruptura. Neste momento atingiu-se a carga máxima de 74,86 kN. A temperatura do perfil segundo a câmera termográfica ficou com uma máxima de 412,88 °C. As figuras 28 e 29 mostram o comportamento do corpo de prova em função do tempo e a figura 30 é a imagem pela câmera no momento da ruptura.

Figura 28 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta A



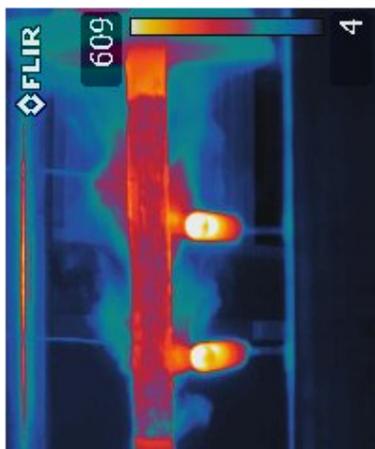
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Temperatura no perfil cantoneira com tinta A segundo câmera termográfica



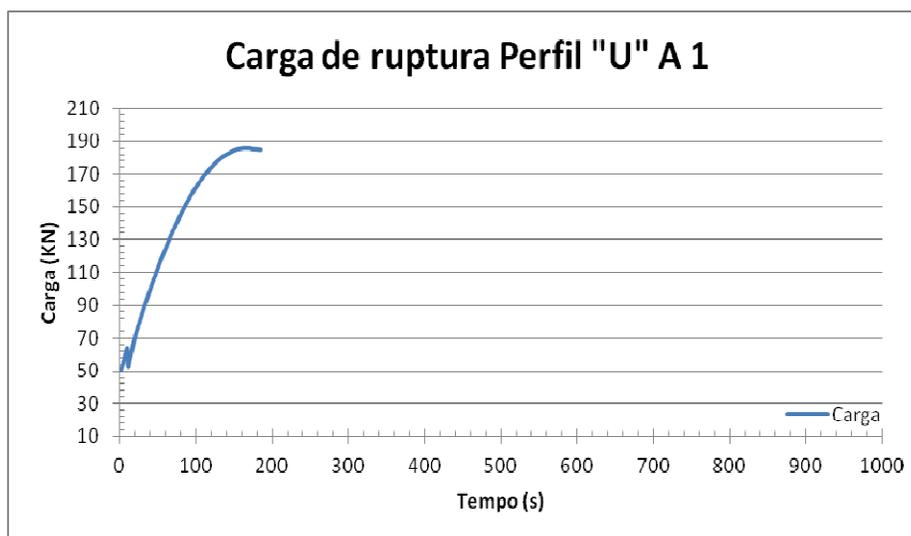
(fonte: foto do autor)

7.2.2 Perfil “U” com tinta A

Para o primeiro perfil “U”, assim como no primeiro perfil cantoneira, não estavam disponíveis os medidores termopares. Desta forma, a temperatura máxima do corpo de prova na face oposta do fogo medida pela câmera foi de aproximadamente 460 °C foi atingida aos 167 segundos após o início do teste, momento da ruptura do corpo de prova. Neste momento a

carga mecânica era de 186,05 kN. A figura 31 mostra o ganho de carga ao longo do tempo do ensaio deste perfil.

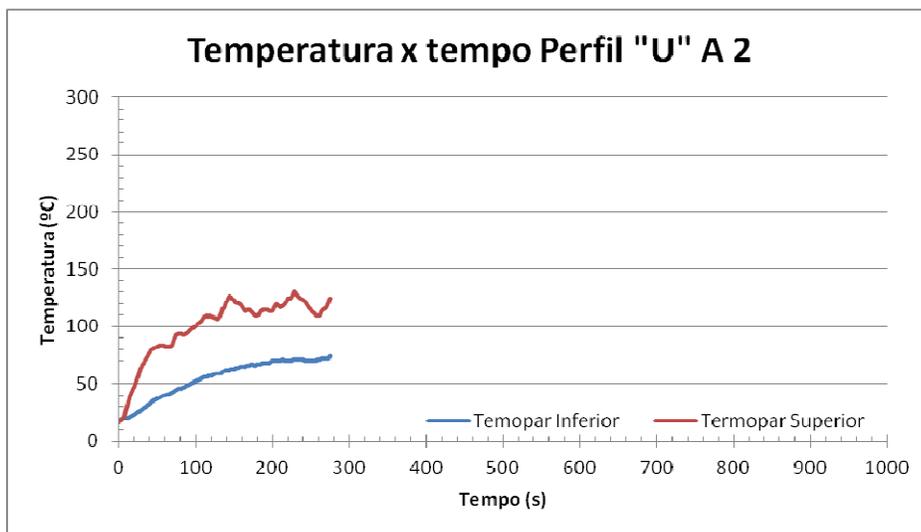
Figura 31 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil “U” com tinta A



(fonte: elaborado pelo autor)

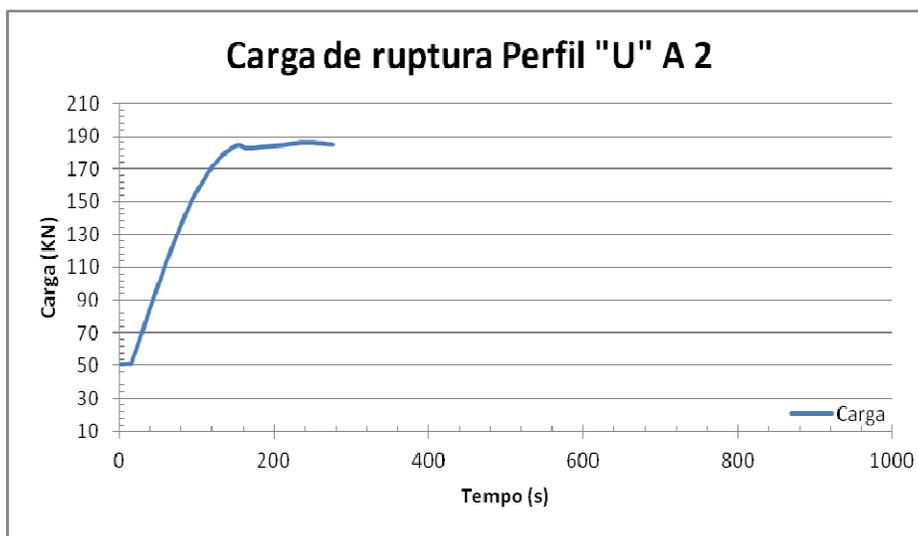
Para o segundo perfil “U” voltou a serem usados os termopares, os quais atingiram 118 °C no medidor superior e 70 °C no inferior no momento de ruptura que ocorreu após transcorridos 246 segundos de teste chegando à 186,2 kN de carga máxima. A temperatura máxima do corpo de prova, segundo a câmera, era de 340 °C no momento da inflexão do crescimento da carga. As figuras 32 e 33 mostram o comportamento ao longo do tempo do perfil ensaiado enquanto a figura 34 é uma imagem da câmera no momento da ruptura.

Figura 32 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil "U" com tinta A



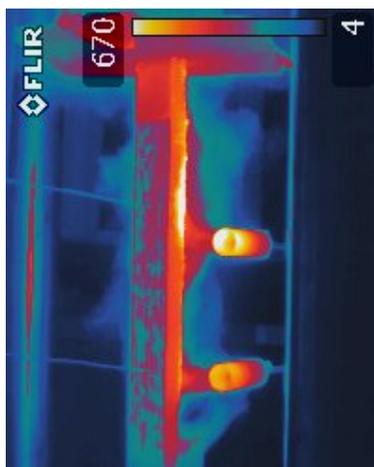
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil "U" com tinta A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Temperatura no perfil “U” com tinta A segundo câmera termográfica



(fonte: foto do autor)

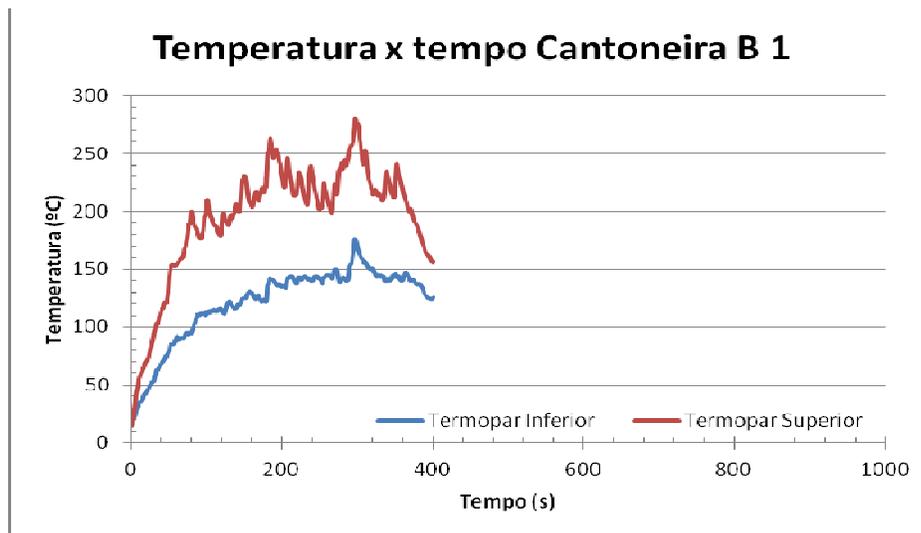
7.3 CORPOS DE PROVA PINTADOS COM TINTA B

A tinta B foi fornecida pela equipe do LaPol e, assim como a tinta A, foi aplicada pelo fabricante.

7.3.1 Perfil cantoneira com tinta B

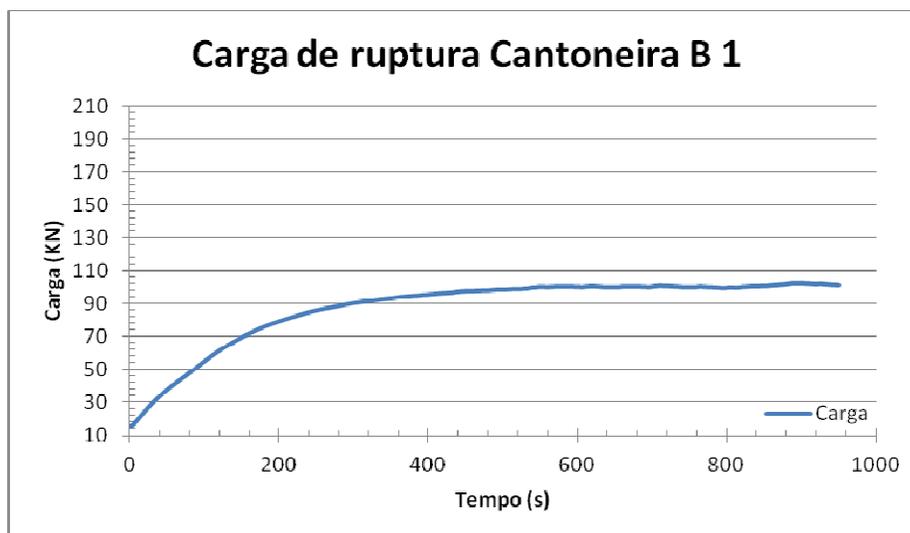
O primeiro perfil cantoneira revestido com a tinta B atingiu alguns resultados que destoam dos demais, o motivo de tal diferença é que este perfil cantoneira foi adquirido de outro fornecedor com uma liga metálica um pouco diferente, mas possuía as mesmas medidas que as demais cantoneiras. Outro problema que este corpo de prova enfrentou foi que durante o ensaio o programa de computador que colhia os dados da temperatura com os termopares travou e teve de ser reiniciado, sendo assim o programa salvou os dados apenas até os 401 segundos de teste. A carga máxima de 102,2 kN ocorreu aos 900 segundos de teste e segundo dados da câmera termográfica a temperatura máxima na superfície traseira do perfil neste momento era de 511 °C. As figuras 35 e 36 mostram o comportamento do perfil ao longo do tempo de ensaio.

Figura 35 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta B



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil cantoneira com tinta B

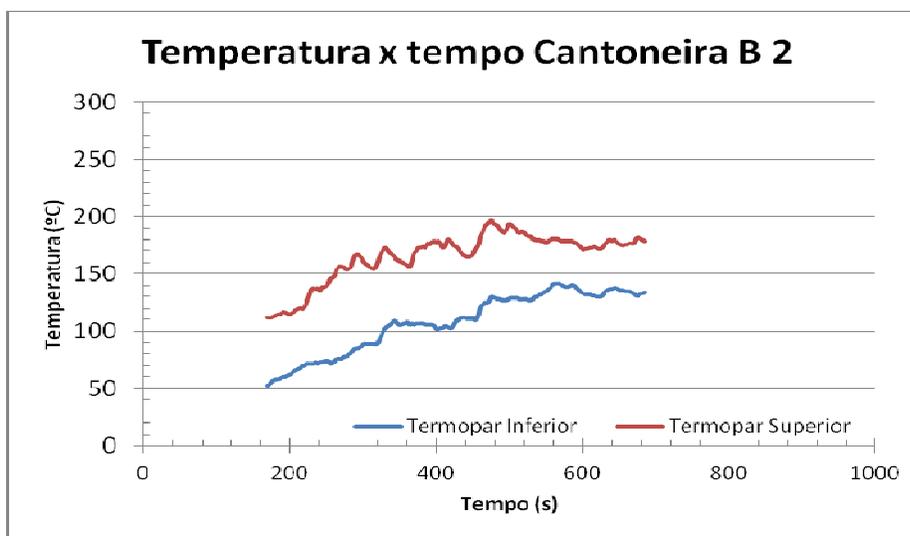


(fonte: elaborado pelo autor)

O outro perfil cantoneira com esta tinta, por sua vez, teve problemas com a medição com os termopares durante o início do teste e a leitura começou no segundo 169 após iniciado o teste. O início da queda da resistência ocorreu após 442 segundos do início do teste atingindo a carga máxima de 76,01 kN, neste momento constava no termopar superior a temperatura de 165 °C e no inferior 111 °C. A câmera apontou uma temperatura máxima no perfil de 491 °C

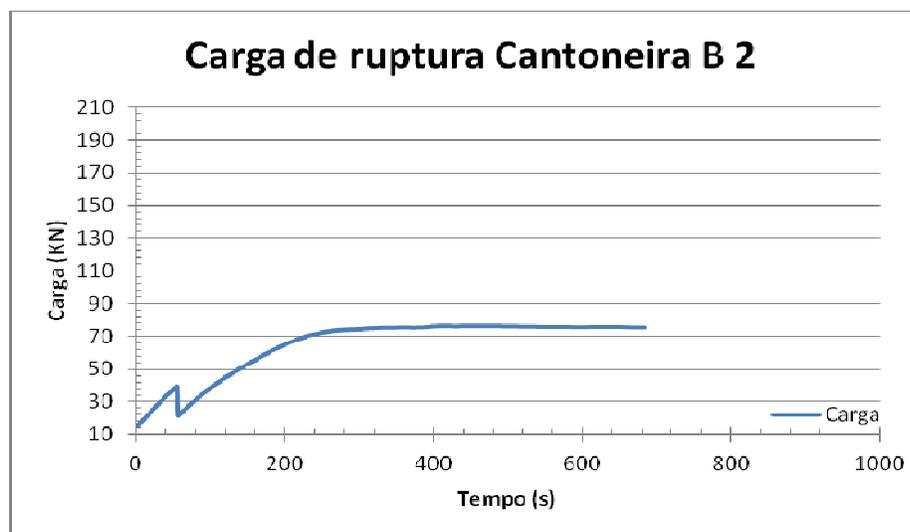
no momento da ruptura. As figuras 37 e 38 mostram o comportamento do perfil ao longo do tempo enquanto a figura 39 ilustra a temperatura que a câmera termográfica apontava aos 442 segundos de teste, momento da ruptura.

Figura 37 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta B



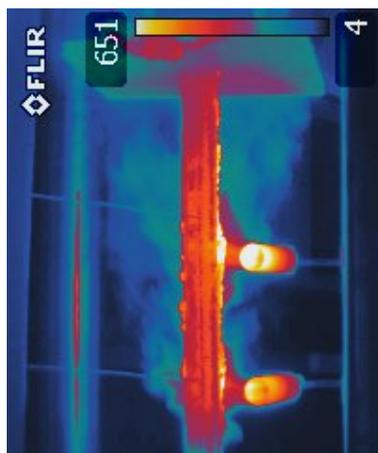
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Gráfico da carga x tempo do segundo perfil cantoneira com tinta B



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Temperatura no perfil cantoneira com tinta B segundo câmera termográfica

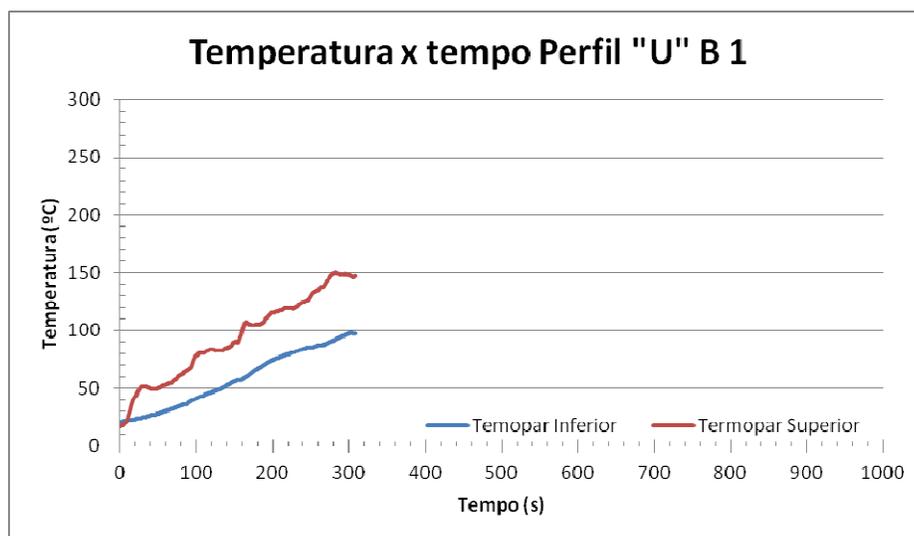


(fonte: foto do autor)

7.3.2 Perfil “U” com tinta B

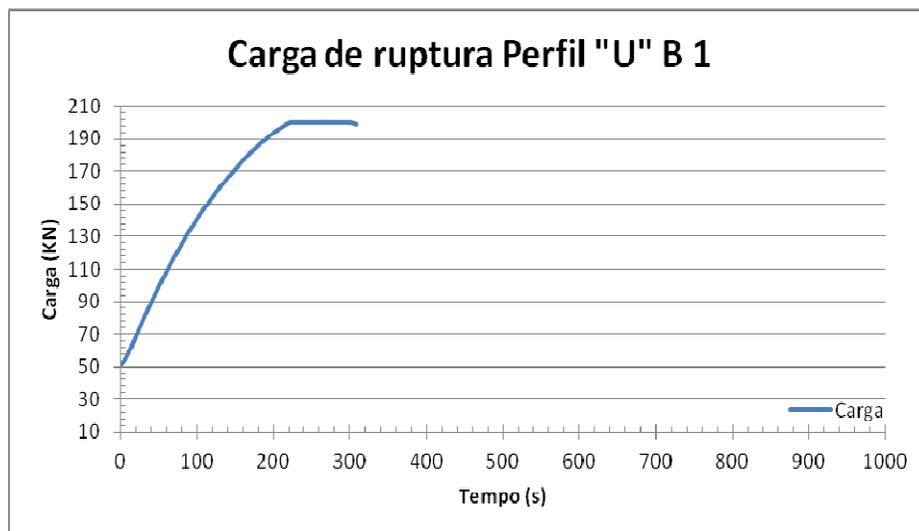
O primeiro perfil com tinta B atingiu aos 221 segundos a carga máxima que o programa estava captando que era de 200 kN, valor que só foi baixar após o segundo 301. Entretanto a prensa continuou com o crescimento da carga e mostrou a carga máxima de 203 kN por volta do segundo 263, que foi adotado como o momento de colapso do corpo de prova. Neste momento o termopar superior apontava a temperatura de 138 °C e o inferior 87 °C. A câmera termográfica aponta a temperatura máxima de 505 °C no corpo de prova no momento da ruptura. As imagens 40 e 41 apresentam o comportamento do corpo de prova ao longo tempo enquanto a figura 44 mostra a imagem da câmera no momento da ruptura.

Figura 40 – Gráfico da temperatura x tempo do primeiro perfil "U" com tinta B



(fonte: elaborado pelo autor)

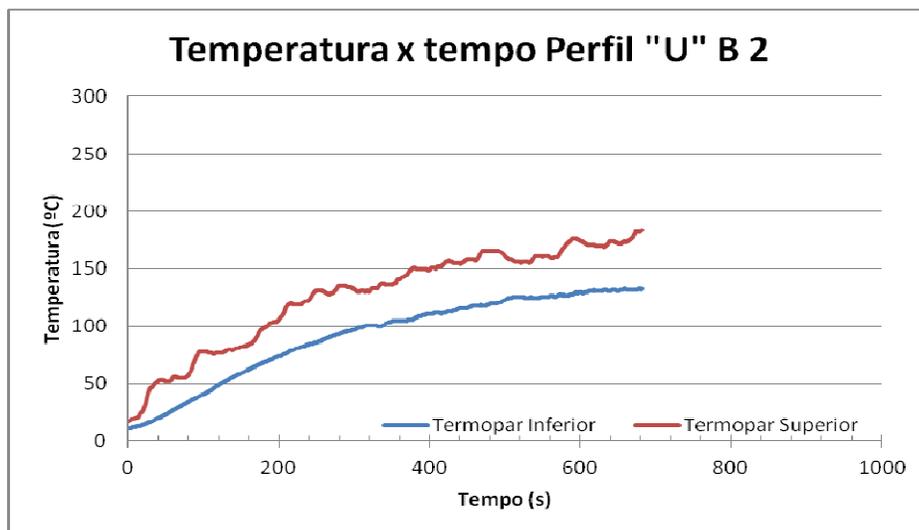
Figura 41 – Gráfico da carga x tempo do primeiro perfil "U" com tinta B



(fonte: elaborado pelo autor)

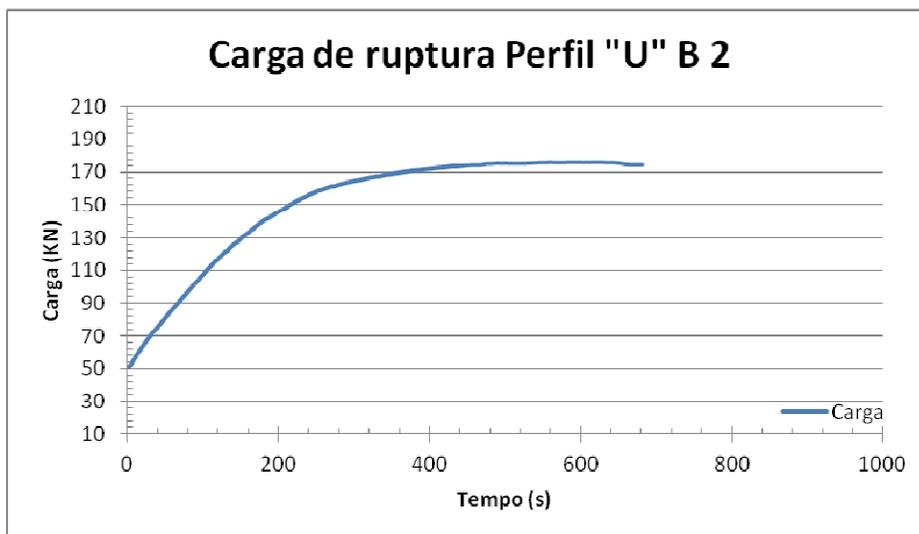
O segundo corpo de prova revestido com a tinta B marcava a temperatura de 176 °C no termopar superior e 130 °C no termopar inferior no momento do colapso do perfil. Neste momento, aos 595 segundos após o início do teste, a carga era de 175,92 kN e a câmera termográfica apontou uma temperatura de 562 °C no perfil no momento da ruptura. As figuras 42 e 43 mostram o comportamento do corpo de prova ao longo do tempo de ensaio.

Figura 42 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil "U" com tinta B



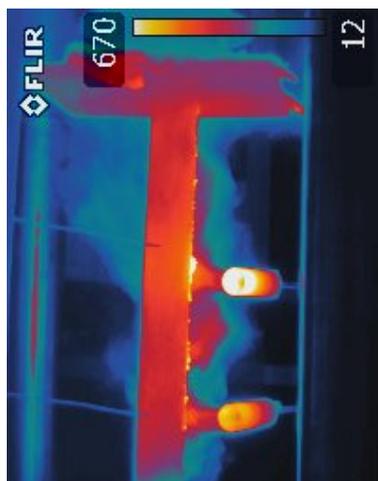
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 43 – Gráfico da temperatura x tempo do segundo perfil "U" com tinta B



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 – Temperatura no perfil “U” com tinta B segundo câmera termográfica



(fonte: foto do autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os corpos de prova que haviam sido pintados com tintas intumescentes se comportaram de maneira parecida quanto ao momento em que a tinta começou a intumescer, que foi logo no início da aplicação da carga de incêndio, menos de segundos após o início do teste. O motivo deste rápido início do intumescimento aconteceu em função de que a carga de incêndio aplicada no início do teste foi um valor muito acima de valores de uma carga no início de um incêndio real ou mesmo de um incêndio que respeite uma curva-padrão, os quais começam com uma temperatura mais baixa e vão crescendo e função do tempo enquanto a aplicada neste experimento foi constante durante todo o ensaio. Ainda sobre a intumescência, esta se desenvolveu ao longo dos perfis de forma igual em todos os corpos de prova que possuíam esta proteção, sendo que nestes perfis a tinta intumescceu em quase sua totalidade e não apenas nos focos dos maçaricos. Apenas a região próxima ao apoio inferior, partindo da base até por volta de 5 centímetros que não intumescceu, deste ponto até o apoio superior o perfil intumescceu em todas as regiões.

Os gráficos das cargas em função do tempo para todos os perfis foram feitos até o momento em que a carga estava em queda e já era visual o efeito da flambagem, momento em que foi parado o ensaio pois considerou-se que tal carga, que já estava caindo rapidamente, não subiria mais.

As deformações nos gráficos do segundo perfil “U” sem tinta próximo dos 100 segundos, da segunda cantoneira com a tinta A entre 300 e 500 segundos para o termopar inferior e dos 500 segundos em diante para o termopar superior e da segunda cantoneira com tinta B a partir dos 450 segundos em diante são em função de o termopar se afastar do corpo de prova. Em alguns casos o termopar se afastava e era encostado novamente quando foi percebido o problema, em outros casos ele continuou afastado.

As deformações nos gráficos de carga que apareceram no primeiro corpo de prova “U” com tinta A e no segundo perfil cantoneira com a tinta B, foram em função de alguma imperfeição no posicionamento do perfil e quando a prensa estava com uma carga alta o suficiente, o corpo de prova se ajustou para uma nova posição onde ficou até o final do ensaio.

Para o presente trabalho admitiu-se que a temperatura na face oposta ao foco dos maçaricos, onde se encontravam os termopares e onde a câmara termográfica estava focada, era a mesma que a face onde era aplicada a carga de incêndio uma vez que a espessura dos perfis era pequena.

A hipótese do trabalho estimava que ao ensaiar os corpos de prova pintados com tintas intumescentes, estes atingiriam a carga máxima 10 minutos após um mesmo corpo de prova, porém sem proteção alguma, atingisse em ensaios idênticos, sendo a única diferença a aplicação ou não da tinta. Esta hipótese não se concretizou conforme aponta o quadro 2 que mostra um comparativo entre os resultados.

Quadro 2 – Comparativo dos resultados

	Sem revestimento				Tinta A				Tinta B			
	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U 1	Perfil U 2	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U 1	Perfil U 2	Cant. 1	Cant. 2	Perfil U 1	Perfil U 2
Tempo até atingir a carga máxima (s)	141	110	192	235	674	488	167	246	900	442	221	595
Temperatura segundo termopares (°C) (sup/inf)	173/156	162/130	178/159	184/145	-	180/123	-	118/70	-	165/111	138/87	176/130
Temperatura segundo câmara termográfica (°C)	670	670	670	670	553,6	412,88	460	340	511	491	505	562
Carga máxima (KN)	66,4	72,8	176,8	169,4	74,2	74,86	186,05	186,2	102,2	76,01	203	175,92

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados, percebe-se que houve bastante variabilidade nos resultados, que pode ter ocorrido devido a uma série de fatores, a mais considerável é a aplicação da fonte de calor não padronizada. O que ocorreu foi que não se obteve um padrão confiável para o quanto seria liberado de gás através dos maçaricos. Outros dois itens que podem ter gerado alguma variabilidade nos resultados foram o prumo dos corpos de prova na prensa e a ponteira dos medidores termopares no contato com a superfície. O primeiro traz como agravante o surgimento de tensões além da dimensionada, como excentricidades que geram momentos não desejados. Por mais que tenha sido tomado o devido cuidado para deixar o corpo de prova no prumo, e em algumas ocasiões foi utilizado até um equipamento simples para nivelar, pequenas excentricidades surgiram. Já o segundo item citado não trouxe variabilidade para o ensaio, mas sim para a medição feita com este equipamento. A ponta dos medidores termopares por vezes se distanciavam do corpo de prova, principalmente quando este começava a flambar, sendo que era preciso encostar o medidor novamente no corpo de prova. Outro problema é que este tipo de medição leva em consideração apenas o ponto em

que está em contato, por isto que o uso da câmera termográfica auxiliou bastante para a análise dos resultados pois através das fotos é possível ver o comportamento do perfil inteiro. Outra atenção que deve ser tomada é que, conforme comentado no item 7.3.1, um dos perfis cantoneira era diferente dos outros, o que deve ser levado em conta quando comparado aos outros corpos de prova.

A questão mais alarmante do ensaio foi o rápido crescimento das cargas de compressão que logo atingiram um valor bastante elevado em todos os testes sendo que nos corpos de prova com tinta intumescente o valor máximo de carga só veio a acontecer após algum tempo depois de atingir um determinado patamar. O preocupante desta situação é que foi utilizada apenas 20% da carga crítica no carregamento destes corpos de prova enquanto em uma situação real de uma estrutura são dimensionadas cargas bem maiores.

Deve se levar em conta, porém, que para os ensaios não foram utilizadas curvas de incêndio padrão, mas sim uma situação em que a carga de incêndio já iniciava muito elevada e se mantinha constante durante o ensaio. Em um incêndio real esta carga cresce com o tempo, portanto o crescimento rápido de carga de compressão se comportaria de outra maneira se obedecesse a curva de incêndio real ou mesmo a curva de incêndio padrão.

Mesmo não atingindo os 10 minutos a mais de proteção conforme a hipótese do trabalho é possível verificar através dos resultados que os corpos de prova com tintas intumescentes duraram mais tempo nos testes que os sem revestimento, o que indica que este material confere de fato uma proteção passiva para estruturas metálicas, devendo-se dar a devida atenção para as espessuras das camadas. Entretanto, sugere-se que o uso das tintas intumescentes como uma única proteção contra incêndios em estruturas metálicas deve ser realizado de forma ponderada pelo projetista.

Sugere-se para pesquisas futuras utilizar outros tipos de perfil. Outra sugestão é a de melhorar o comportamento da fonte de carga de incêndio, no caso de uso de maçaricos, sempre colocar o fogo no máximo possível, por exemplo, ou colocar uma trava na válvula que libera o gás de forma que sempre seja a mesma para todos os testes. Ainda sugere-se que seja utilizada uma fonte de calor que aplique a mesma carga ao longo de todo o perfil, pois neste trabalho, com o auxílio da câmera termográfica pode ser visto que os pontos que mais aqueceram foram nos exatos pontos onde o maçarico estava focado. Por fim, sugere-se que seja modificada a forma de fixação dos termopares para que estes estejam sempre em contato com o corpo de prova

durante a realização do ensaio. Este procedimento pode ser feito com a aplicação de pressão com uma mola posicionada no apoio do termopar.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860**: glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

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

_____. **NBR 15239**: tratamento de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **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

CASTRO, E. F. **Mudança nas Exigências das Medidas de Prevenção e Proteção Contra Incêndio em Edificações Devido à Nova Legislação (lei kiss)**: análise teórica e aplicação em uma edificação de uso comercial. 2015. 172 f. Trabalho de Diplomação. (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GILL, A. A. ; NEGRISOLO, W. ; OLIVEIRA S. A. Aprendendo com os grandes incêndios. In: SEITO, A. I. ; GILL, A. A. ; PANNONI, F. D. ; ONO, R. ; SILVA, S. B. ; CARLO, U. D. ; SILVA, V. P. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 19-33.

GUIMARÃES, P. P. de O. **Sobre o dimensionamento do revestimento contra fogo de estruturas de aço**. 2007. 265 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MESQUITA, L. M. R.; PILOTO, P. A. G.; VAZ, M. A. P.; VILA REAL, P. M. M.; RAMOS, F. **Comportamento de Vigas em Aço Protegidas com Tinta Intumescente**. In: V CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, Lisboa, 2005.

MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo- reação ao fogo. In: SEITO, A. I. ; GILL, A. A. ; PANNONI, F. D. ; ONO, R. ; SILVA, S. B. ; CARLO, U. D. ; SILVA, V. P. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55-75.

OLIVEIRA, R. B. R. DA S. ; MORENO J. ; ARMANDO L. ; VIEIRA J. ; LUIZ C. M. **Tinta Intumescente Como Revestimento Contra Fogo**. Porto Alegre, [2015?].

SANTUCCI, J. Incêndio da Boate Kiss: um divisor de águas sobre a segurança contra incêndios no Brasil e no mundo. **Conselho em revista**, Porto Alegre n. 100, p. 22-28, jan. 2014.

SEITO, A. I. Fundamentos de Fogo e Incêndio. In: SEITO, A. I. ; GILL, A. A. ; PANNONI, F. D. ; ONO, R. ; SILVA, S. B. ; CARLO, U. D. ; SILVA, V. P. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 35-54.

SILVA, V. P. ; VARGAS, M. R. ; ONO, R. **Prevenção Contra Incêndio no Projeto de Arquitetura**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

TRAGÉDIA em boate no RS: o que já se sabe e as perguntas a responder. G1. São Paulo, 28 jan. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/01/tragediaem-santa-maria-o-que-ja-se-sabe-e-perguntas-responder.html>>. Acesso em: 31 maio 2016.

VARGAS, M. R. ; SILVA, V. P. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2003.