

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

**Guilherme Postal Copat**

**MADEIRA TRATADA COM IGNÍFUGOS: ANÁLISE DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**GUILHERME POSTAL COPAT**

**MADEIRA TRATADA COM IGNÍFUGOS: ANÁLISE DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO**

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

**Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
**Coorientadora: Angela Gaio Graeff**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**GUILHERME POSTAL COPAT**

**MADEIRA TRATADA COM IGNÍFUGOS: ANÁLISE DA  
RESITÊNCIA MECÂNICA APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 dezembro de 2014

Prof. Luiz Carlos P. da Silva Filho  
PhD pela University of Leeds  
Orientador

Prof. Ângela Gaio Graeff  
PhD pela University of Sheffield  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Carlos P. da Silva Filho**  
PhD pela University of Leeds

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

**Prof. Ângela Gaio Graeff**  
PhD pela University of Sheffield

**Eng. Civil Luciane Fonseca Caetano**  
**UFRGS**  
Mestre pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Ademir e Raquel, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, orientador deste trabalho, pelo apoio, motivação, disposição e amizade ao longo do trabalho.

Agradeço à Prof. Angela Graeff, coorientadora deste trabalho, por sempre estar disponível e paciente para tirar dúvidas e fazer correções ao longo do trabalho. Agradeço muito sua disponibilidade e paciência para ensinar a manusear os equipamentos e programas necessários para concluir o trabalho.

Agradeço ao Prof. João Luiz Campagnolo pela amizade e pelo interesse e disposição em ajudar com os materiais necessários para realizar o trabalho.

Agradeço à Prof. Carin, pela atenção, paciência, prontidão e profissionalismo que sempre teve ao longo do trabalho.

Agradeço à equipe técnica do LEME, Sr. Fontes e Sr. Edgar, pelo auxílio e atenção fornecidos com a utilização de ferramentas necessárias para realizar os ensaios.

Agradeço à equipe de bolsistas do LEME, que sempre estiveram dispostos a ajudar nos ensaios e utilização dos equipamentos do laboratório.

Agradeço aos meus pais Ademir e Raquel, que sempre me serviram de exemplo e mostraram a importância do estudo na vida pessoal e profissional. Sempre me apoiaram e proporcionaram condições de fazer meu curso de graduação.

Sonhos determinam o que você quer.  
Ação determina o que você conquista.

*Aldo Novak*

## **RESUMO**

O uso da madeira na construção civil é aplicado, na maioria das vezes, em estruturas temporárias como escoras, formas de lajes, vigas e pilares e de uma forma mais nobre em pisos, molduras e estruturas de telhados. A madeira possui vantagens que justificam seu emprego na construção, como a possibilidade de reutilização, emprego de ferramentas simples, baixa massa específica, alta resistência mecânica, bom isolante térmico e possui boa absorção acústica. Dentre as desvantagens, a madeira é suscetível ao ataque de insetos, possui grande variação de dimensões por umidade, além de ser um material combustível. O conhecimento do comportamento mecânico da madeira mediante a ação do fogo e da eficiência do tratamento com tintas ignífugas é de extrema importância para que sejam construídas estruturas mais resistentes a incêndios, aumentando o tempo de evacuação do prédio assim como o tempo de combate dos bombeiros. Sendo assim, através de ensaios de laboratório, foi verificada a eficiência do tratamento de amostras de madeira com tinta ignífuga, comparativamente as mesmas seções sem esse tratamento, expostas ao fogo em diferentes intervalos de tempo. Os resultados indicam que a utilização da tinta ignífuga em questão não melhora o comportamento das amostras de madeira quando estas são submetidas á incêndio de baixo risco.

Palavras-chave: Madeira na Construção Civil. Incêndio. Ensaio de Resistência Mecânica.  
Tintas ignífugas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa.....	14
Figura 2 – Curva da evolução de um incêndio em edificações.....	33
Figura 3 – Simulador de incêndio utilizado durante a pesquisa.....	44
Figura 4 – Detalhe da estrutura metálica do simulador de incêndio.....	44
Figura 5 – Grelha de ferro fundido.....	45
Figura 6 – Tampas laterais de ferro fundido.....	45
Figura 7 – Carga de incêndio.....	46
Figura 8 – Aplicação da tinta ignífuga sobre corpos de prova de flexão e compressão...	48
Figura 9 – Posicionamento dos termopares tipo k.....	49
Figura 10 – Ensaio de compressão paralela às fibras.....	50
Figura 11 – Ensaio de resistência a flexão.....	51
Figura 12 – Leitura dos termopares durante um período de 2,5 minutos de incêndio.....	53
Figura 13 – Leitura dos termopares durante um período de 5 minutos de incêndio.....	54
Figura 14 – Leitura dos termopares durante um período de 7,5 minutos de incêndio.....	54
Figura 15 – Leitura dos termopares durante um período de 10 minutos de incêndio.....	55
Figura 16 – Leitura dos termopares durante um período de 12,5 minutos de incêndio....	56
Figura 17 – Leitura dos termopares durante um período de 15 minutos de incêndio.....	56
Figura 18 – Leitura dos termopares durante um período de 17,5 minutos de incêndio....	57
Figura 19 – Leitura dos termopares durante um período de 20 minutos de incêndio.....	58
Figura 20 – Comparação das resistências das amostras com e sem tratamento ignífugo.	59
Figura 21 – Análise da eficiência do tratamento com tinta ignífuga.....	60
Figura 22 – Comparação das resistências das amostras com e sem tratamento ignífugo.	62
Figura 23 – Análise da eficiência do tratamento com tinta ignífuga.....	62

## LISTA DE SIGLAS

$X_n$ ..... resistência da unidade amostral n

$X_{wk}$ ..... resistência característica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	14
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	14
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	14
2.3 HIPÓTESE.....	14
2.4 PRESSUPOSTO.....	15
2.5 PREMISA.....	15
2.6 DELIMITAÇÕES.....	15
2.7 LIMITAÇÕES.....	15
2.8 DELINEAMENTO.....	16
<b>2.8.1 Pesquisa bibliográfica</b> .....	17
<b>2.8.2 Levantamento das características da madeira cedrinho</b> .....	17
<b>2.8.3 Levantamento das características dos incêndios residenciais</b> .....	17
<b>2.8.4 Definição do plano experimental</b> .....	17
<b>2.8.5 Obtenção dos materiais</b> .....	17
<b>2.8.6 Preparação dos corpos de prova</b> .....	18
<b>2.8.7 Realização dos ensaios</b> .....	18
<b>2.8.8 Análise do resultado e conclusão</b> .....	18
<b>3 MADEIRA</b> .....	19
3.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA MADEIRA.....	22
3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA.....	23
<b>3.2.1 Umidade</b> .....	23
<b>3.2.2 Peso específico</b> .....	23
<b>3.2.3 Retratibilidade</b> .....	24
<b>3.2.4 Condutibilidade térmica</b> .....	24
<b>3.2.5 Condutibilidade sonora</b> .....	25
<b>3.2.6 Condutibilidade elétrica</b> .....	25
<b>3.2.7 Resistência ao fogo</b> .....	25
3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	26
<b>3.3.1 Módulo de elasticidade</b> .....	26
<b>3.3.2 Compressão paralelamente as fibras</b> .....	27

<b>3.3.3 Compressão perpendicularmente as fibras</b> .....	27
<b>3.3.4 Resistência a flexão</b> .....	28
3.4 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	28
3.3 CEDRINHO.....	29
<b>4 COMBUSTÃO DA MADEIRA</b> .....	30
<b>5 INCÊNDIOS</b> .....	34
5.1 FASES DO INCÊNDIO.....	35
<b>5.1.1 Ignição</b> .....	36
<b>5.1.2 Fases de aquecimento – pré-flashover</b> .....	36
<b>5.1.3 Incêndio desenvolvido – flashover</b> .....	37
<b>5.1.4 Extinção do incêndio</b> .....	38
<b>6 IGNÍFUGOS</b> .....	39
6.1 TEORIAS DE PROTEÇÃO CONTRA A PROPAGAÇÃO DE CHAMAS.....	39
<b>6.1.2 Teoria do recobrimento</b> .....	39
<b>6.1.3 Teorias relativas a efeitos térmicos</b> .....	40
6.1.3.1 Isolação térmica.....	40
6.1.3.2 Condutibilidade térmica.....	40
6.1.3.3 Absorção térmica.....	41
<b>6.1.4 Teorias relativas a ação de gases</b> .....	41
6.1.4.1 Efeito da diluição.....	41
6.1.4.2 Efeito da inibição de reações em cadeia.....	41
<b>6.1.5 Teoria Química</b> .....	42
6.2 RETARDANTES DE CHAMAS.....	42
<b>6.2.1 Impregnação sob pressão</b> .....	43
<b>6.2.2 Recobrimento</b> .....	44
<b>7 MÉTODO</b> .....	45
7.1 SIMULADOR DE INCÊNDIO.....	45
7.2 CARGA DE INCÊNDIO.....	48
7.3 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS.....	49
7.4 CORPOS DE PROVA.....	49
7.5 APLICAÇÃO DA TINTA IGNÍFUGA NOS CORPOS DE PROVA.....	50
7.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	51
7.7 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	51
7.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	52
7.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO.....	53

<b>8 RESULTADOS</b> .....	55
8.1 CURVAS DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO SIMULADOR.....	55
8.2 RUPTURA À COMPRESSÃO PARALELAMENTE ÀS FIBRAS.....	60
8.3 RUPTURA A FLEXÃO.....	63
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	66
<b>REFERÊNCIA</b> .....	68
<b>APÊNDICE A</b> .....	69



## 1 INTRODUÇÃO

A madeira sempre esteve bastante presente na construção civil. Sua participação atualmente está concentrada em produtos de acabamento, esquadrias, molduras, pisos e estruturas de telhados. Utiliza-se ainda, de forma menos nobre, na confecção de fôrmas de elementos em concreto armado, escoras e estruturas temporárias.

A madeira possui diversas características que favorecem seu uso na construção civil. Destacam-se as que contribuem para a sustentabilidade ambiental, tais como o fato de ser obtida de reservas renováveis, a possibilidade de reutilização do material e a economia de recursos hídricos, pois a água não é utilizada em nenhuma etapa de seu processo industrial. Sob ponto de vista energético, tem baixo consumo de energia para sua produção, se comparada com outros materiais de construção. Em construções de madeira, por exemplo o consumo energético por metro quadrado é duas vezes menor que nas de alvenaria.

Dentre as características naturais, a madeira possui boas condições de isolamento térmico, boa absorção acústica, baixa massa específica e grande resistência mecânica. Outra vantagem das estruturas em madeira é o baixo desperdício de materiais, pois os elementos são pré-fabricados. Entretanto, apesar das características favoráveis que este material apresenta, ele também possui algumas desvantagens, como o fato de ser um material combustível.

Devido às preocupações recentes com relação ao tema de incêndios em edificações, e ao pouco conhecimento do comportamento da madeira submetida a condições de incêndio, este trabalho tem como objetivo buscar informações bibliográficas sobre a composição da madeira, comportamento do fogo em situações de incêndio e tratamentos de madeira com tintas ignífugas. Foram realizados ensaios em laboratório para melhor compreender como se dá a perda de seção e o comportamento da resistência mecânica da madeira, assim como estimar a eficiência do tratamento com tinta ignífuga.

O presente trabalho foi dividido nos seguintes capítulos. Foi descrito no **capítulo 2** as diretrizes da pesquisa, questão de pesquisa, objetivos da pesquisa, hipótese, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e delineamento, explicando todas as etapas que foram necessárias para o desenvolvimento do trabalho. **No capítulo 3** foram abordadas as

características da madeira, classificação quanto ao uso, vantagens e desvantagens do emprego na construção civil, características físicas, químicas e mecânicas. Foi abordado no **capítulo 4** a combustão da madeira e as fases da combustão. **O capítulo 5** trata da classificação dos tipos de incêndios e explicação das fases de um incêndio. **O capítulo 6** apresenta os tipos de ignífugos, as teorias de proteção contra a propagação de chamas, método do recobrimento e as vantagens e desvantagens deste método. **O capítulo 7** apresenta os métodos, materiais, equipamentos e procedimentos de ensaios adotados no trabalho. **O capítulo 8** apresenta os resultados obtidos após a realização dos experimentos e as conclusões do trabalho.

## **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 ao comportamento da madeira sem nenhum tratamento, quais variações são observadas nas resistências à compressão e à flexão quando unidades de teste equivalentes são empregadas com o uso de ignífugos?

### **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 a verificação da eficiência do tratamento das amostras de madeira com tinta ignífuga, comparativamente as mesmas seções sem esse tratamento, expostas ao fogo em diferentes intervalos de tempo.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a descrição de método de ensaio laboratorial, em amostras de madeira, para obtenção da variação de resistência mecânica, simulando incêndio em edificações residenciais.

### **2.3 HIPÓTESE**

A hipótese do trabalho é que a madeira que recebeu tratamento com ignífugos, quando exposta ao fogo, simulando incêndio em edificação residencial, durante os intervalos de

tempo de 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 minutos, tem uma perda de resistência à compressão e à flexão, 30% menor que às amostras sem tratamento.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que a maneira como as unidades de teste são ensaiadas é válida para a finalidade do estudo.

## 2.5 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que a madeira empregada como elemento estrutural perde, quando exposta a uma situação de incêndio, uma grande parcela da sua resistência mecânica e, portanto, devem-se buscar formas de amenizar esse problema.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da madeira, em situação de incêndio, com e sem tratamento ignífugo.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

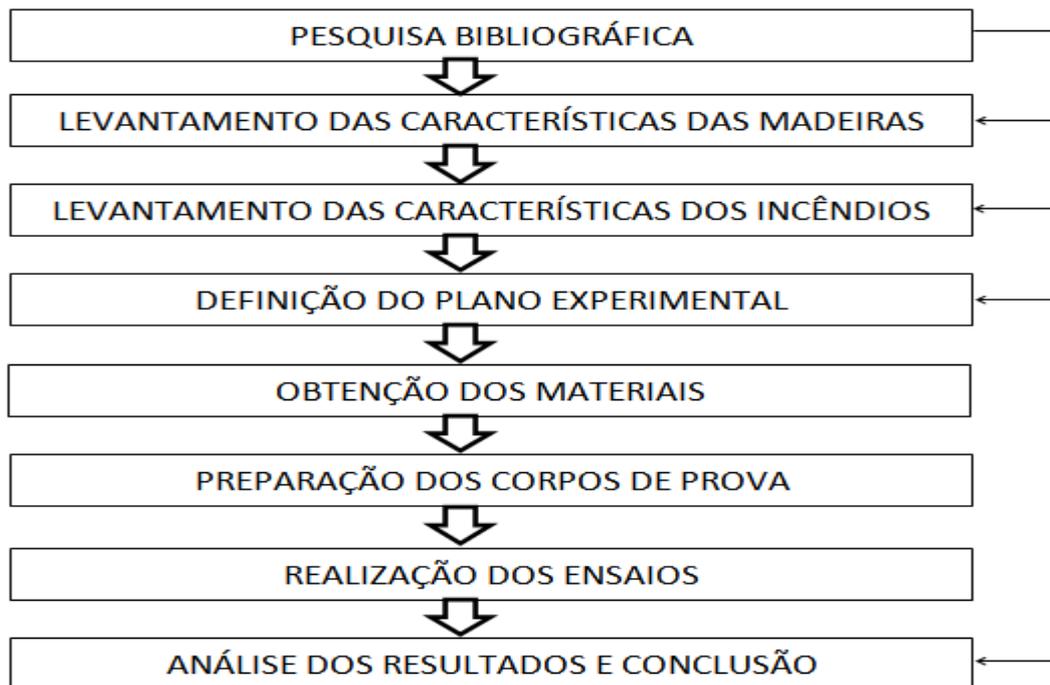
- a) o tempo de exposição ao fogo dos corpos de prova foi limitado aos tempos de 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5 e 20 minutos;
- b) tratamento com apenas tinta ignífuga de um fornecedor;
- c) avaliar-se-á, em laboratório os corpos de prova apenas quanto a resistência à compressão e à flexão;
- d) as dimensões das amostras foram limitadas segundo as exigências da norma NBR 7190:1997– Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B, para ensaios de compressão paralela às fibras e ensaios de flexão;
- e) a variação da resistência mecânica dos corpos de prova foi avaliada apenas quanto à exposição ao fogo simulando incêndio em edificação residencial;
- f) o cedrinho foi a única espécie de madeira ensaiada.

## 2.8 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) levantamento das características físicas e químicas da madeira;
- c) levantamento das características dos incêndios residenciais;
- d) definição do plano experimental;
- e) obtenção dos materiais;
- f) preparação dos corpos de prova;
- g) realização dos ensaios;
- h) análise dos resultados e conclusões.

Figura 1— Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A seguir, estão descritas as etapas da realização da pesquisa.

### 2.8.1 Pesquisa bibliográfica

Nessa etapa foram abordados os seguintes temas:

- a) características mecânicas da madeira;
- b) características dos incêndios residenciais;
- c) comportamento da madeira mediante ação do fogo;
- d) tratamento com ignífugos;
- e) ensaios com madeiras.

### **2.8.2 Levantamento das características da madeira cedrinho**

Esta etapa do projeto de pesquisa tem por finalidade o levantamento das características físicas e mecânicas da madeira tipo cedrinho.

### **2.8.3 Levantamento das características dos incêndios residenciais**

A finalidade desta etapa é caracterizar, através de pesquisa bibliográfica, os incêndios residenciais, diferenciando-o dos demais incêndios. As informações obtidas nesta fase permitiram o dimensionamento das cargas de fogo a que os corpos de prova serão expostos no ensaio de laboratório.

### **2.8.4 Definição do plano experimental**

Devido à inexistência de normalização quanto a ensaios em madeira simulando incêndio de qualquer espécie, esta etapa tem por finalidade elaborar um método de ensaio laboratorial, passível de reprodução posterior, para ensaio em madeira simulando incêndio em edificação residencial.

### **2.8.5 Obtenção dos materiais**

Nesta etapa foram adquiridos os materiais, madeira, tinta ignífuga e combustíveis, necessários à realização dos ensaios de laboratório propostos para este trabalho.

### **2.8.6 Preparação dos corpos de prova**

Nessa etapa, as madeiras selecionadas para a realização dos ensaios foram preparadas, em conformidade com norma NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B.

### **2.8.7 Realização dos ensaios**

Com os corpos de prova conforme descrito na etapa anterior, foram realizados ensaios laboratoriais com a finalidade de verificar a perdas de resistência da madeira com tratamento ignífugo em relação a madeira sem tratamento, mediante exposição ao fogo simulando incêndio em edificação residencial nos intervalos de tempo de 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 minutos.

### **2.8.8 Análise dos resultados e conclusões**

Com os dados obtidos nos ensaios, juntamente com a pesquisa bibliográfica, foi verificada a perda de resistência mecânica da madeira tratada com ignífugo comparativamente com as amostras sem tratamento, ambas expostas à ação do fogo, simulando incêndio em edificação residencial. Foram obtidas conclusões a respeito de sua utilidade na construção civil no Brasil, limitações do estudo e sugestões de novas pesquisas no assunto.

### 3 MADEIRA

A madeira apresenta um conjunto de características dificilmente encontradas em outros materiais de origem orgânica. Conforme Mady (2013), uma delas é a sua baixa capacidade de conduzir o calor. Isto se deve a sua estrutura celular e por ser constituída por membranas celulósicas, mais especificamente pela constituição e organização do tecido xilemático. A estrutura do xilema permite o aprisionamento de uma grande quantidade de massas de ar em seu interior, que funcionam como um isolante. A condutividade térmica depende do peso específico e teor de umidade contido na madeira. Quanto maior o peso e teor de umidade, mais alta a capacidade da madeira de conduzir o calor.

Segundo Mady (2013), “A madeira é um produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, localizado em geral no tronco e galhos das árvores, com células especializadas na sustentação e condução de seiva.”.

Conforme a ABIMCI, “A madeira proporciona conforto térmico por ser um material isolante, sendo considerada o maior comparativamente com os metais ou concreto.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE , 2013, p. 2).

A madeira, por ser um material vivo, possui propriedades anisotrópicas que mudam com as condições ambientais. Essas propriedades não só variam de espécie para espécie, mas mesmo dentro de uma mesma espécie, graças as condições climáticas de região para região. Devido a grande diversidade de espécies, é fundamental que o engenheiro tenha conhecimento das propriedades da madeira que está sendo especificada em um projeto, só assim há possibilidade de projetar estruturas com sucesso. É grande a variedade de formas de classificação das madeiras. Segundo Pianca (1977, p. 115) as madeiras podem ser classificadas como duras, médias e brandas:

- a) duras: as madeiras duras mais usadas são o angico, ipê (amarelo ou roxo), cabriúva, eucalipto e o louro. São empregadas em obras expostas à ação das intempéries como pontes e dormentes e na construção civil para confecção de esquadrias externas, portas e janelas. Convém destacar o mogno, ébano, imbuia e a nogueira

- b) pelo seu uso especial que se faz nos trabalhos de marcenaria mais refinados;
- c) médias: as espécies mais empregadas são o pinho, cedro, peroba rosa e o açoita-cavalo. Aplicam-se em obras protegidas ou de caráter provisório. No sul do país as mais usadas são o pinho e o cedro. A facilidade de obtenção e o seu preço relativamente baixo tornam o pinho o preferido no vigamento de pisos, telhados, forros, soalhos e esquadria interna. Prefere-se o cedro nas obras de maior importância;
- d) brandas: destaca-se a timbaúva, usada em tabuado de tetos. As madeiras desta categoria não são frequentemente empregadas na construção civil.

Mady (2013), cita características sensoriais de espécies de madeira que não são aconselháveis como único meio de classificação.

- a) cor: a intensidade da coloração deriva de substâncias químicas presentes no tronco;
- b) odor: agradável ou desagradável, varia com o tempo e se a madeira for umedecida;
- c) resistência ao corte manual: através de um pequeno corte, classifica a madeira como dura, moderadamente dura e pouco resistente;
- d) sabor: normalmente associada as madeiras de odor agradável e desagradável;
- e) textura: pode ser grossa, média ou fina. Classifica o diâmetro dos poros e sua quantidade relativa no lenho;
- f) figura: difere-se pelo desenho e alterações que a madeira apresenta;
- g) brilho: é a capacidade que a madeira possui de refletir a luz.

Conforme a ABIMCI, a madeira possui vantagens que favorecem seu uso na construção civil em relação ao aço e concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE, 2013, p. 2):

Dentre as vantagens ambientais considera-se que a madeira é um recurso natural renovável e sob ponto de vista energético tem baixo consumo de energia. No caso de construções de madeira o consumo energético por metro quadrado é duas vezes menor que a de alvenaria.

Dentre outras vantagens da estrutura em madeira, cita-se o pequeno desperdício de materiais, considerando que os componentes da obra são pré-fabricados, o tempo de construção é menor, uma vez que a edificação exige alicerces bastante simples. Em se tratando de custos, normalmente o custo final é igual ou mais barato.

Dentre as vantagens que a madeira apresenta, Petrucci (1975, p. 166-117) destaca as seguintes:

- a) pode ser obtida em grandes quantidades a um preço relativamente baixo. As reservas se renovam-se por si mesmas, tornando o material permanentemente disponível;
- b) pode ser produzida em peças com dimensões estruturais que podem ser rapidamente desdobradas em peças pequenas, de delicadeza excepcional;
- c) pode ser trabalhada com ferramentas simples e ser reempregada várias vezes;
- d) foi o primeiro material empregado na construção civil, capaz de resistir tanto a esforços de compressão como de tração;
- e) tem massa específica baixa e grande resistência mecânica. Apresenta a mesma resistência à compressão que o concreto de alta resistência, sendo superior ao mesmo na flexão (aproximadamente  $450\text{kgf/cm}^2$  para  $45\text{ kgf/cm}^2$ ) e no cisalhamento (aproximadamente  $450\text{kgf/cm}^2$  para  $35\text{kgf/cm}^2$ );
- f) permite fáceis ligações e emendas;
- g) não estilhaça quando golpeada; sua resistência permite absorver choques que romperiam ou fendilhariam outro material;
- h) apresenta boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica;
- i) no seu aspecto natural apresenta grande variedade de padrões.

Em contraposição ao uso da madeira como material de construção, Petrucci (1975, p. 117) cita as seguintes desvantagens, que devem ser cuidadosamente levadas em consideração:

- a) um material fundamentalmente heterogêneo e anisótropo;
- b) é bastante vulnerável aos agentes externos, e sua durabilidade, quando desprotegida, é limitada;
- c) é combustível;
- d) mesmo depois de transformada, quando já empregada na construção, a madeira é muito sensível aos agentes ecológicos, aumentando ou diminuindo de dimensões com as variações de umidade;
- e) formas limitadas, alongadas, de seção transversal reduzida.

Entretanto, muitos aspectos desfavoráveis podem ser superados com o uso de produtos industriais, que segundo Lepage et al. (1986, p. 241-242), quando bem aplicados, resultam em estruturas duráveis. Destacam-se os produtos ignífugos ou retardantes de chamas, que em situação de incêndio, retardam o ponto de inflamação, pois em contato com o calor o ignífugo expande, formando uma camada protetora.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 241-242), a aplicação do revestimento com ignífugos:

[...] evitaria a propagação da chama, ao se fundir com a elevação da temperatura, e recobriria a superfície da madeira com um esmalte ou espuma. Dessa forma, seria evitado o acesso do ar até a madeira, bem como o escape dos produtos voláteis de pirólise que alimentariam a chama.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 69), os “[...] polímeros que formam a parede celular da madeira são responsáveis pela maioria das suas propriedades físicas e químicas.”. O conhecimento do comportamento e composição da madeira são indispensáveis para se ter bons resultados com segurança e economia. A seguir são abordadas a composição química da madeira, e suas características físicas tais como umidade, peso específico, retratibilidade, condutividade térmica, condutividade sonora, resistência ao fogo e mecânicas da madeira de uso na construção civil.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA MADEIRA

Petrucci (1987, p 121-124), segundo a composição química da madeira, afirma que “As células são formadas por paredes de membranas celulósicas permeáveis, a parede primária, que aos poucos vai se cobrindo de lignina, e a parede secundária, que deixa falhas permeáveis e pontuações.”.

Petrucci (1987, p 124) segue sobre as características químicas da madeira, que tanto a lignina que unifica as células umas as outras, como a celulose que faz parte da sustentação das paredes celulares, são responsáveis por todas as propriedades da madeira, tais como a resistência à corrosão, higroscopicidade, etc.

Petrucci (1987, p 124) afirma que “A composição química da madeira, em termos médios, apresenta 60% de celulose, 28% de lignina e quantidades menores de outras substâncias.”. Continua, o autor, indicando que “a madeira seca contém em média 49% de carbono, 44% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% de cinza.”.

## 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA

### 3.2.1 Umidade

O conhecimento da influência da umidade na madeira é de grande importância devido as consequências da variação das dimensões. Segundo Petrucci (1987, p. 130), “[...] todas as propriedades mecânicas, assim como a massa específica aparente, variam com o teor de umidade, onde o mesmo é expresso em porcentagem do peso seco [...]”.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003, p. 4-5), “Em face do efeito da umidade nas outras propriedades da madeira, é comum referirem-se estas propriedades a um grau de umidade-padrão. No Brasil e nos Estados Unidos, adotam-se 12% como umidade-padrão de referência.”.

Sobre o teor de umidade Mady (2013) afirma:

Quando recém cortado, o tronco de uma árvore encontra-se saturado de água. Muitos fatores irão influenciar o teor de umidade, entre eles a anatomia do xilema. Da umidade irão depender diretamente as propriedades de resistência, poder calorífico, capacidade de receber adesivos e secagem, entre outras.

A água na madeira pode estar presente preenchendo os espaços vazios dentro das células ou entre elas (água livre ou água de capilaridade), pode estar aderida à parede das células (água de adesão) ou pode estar compondo a estrutura química do próprio tecido (água de constituição). Esta última somente pode ser eliminada através da combustão do material.

### 3.2.2 Peso específico

O peso específico é definido como o peso por unidade de volume. Conforme Mady (2013):

Algumas espécies são naturalmente mais pesadas que outras mesmo apresentando dimensões iguais. Geralmente, espécies mais pesadas, apresentam características mais duradouras.

Os índices de peso específico variam de espécie para espécie e dependem de uma série de fatores estruturais bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho. O pau de balsa (*Ochroma lagopus*, *Bombacaceae*) é a madeira brasileira mais leve (seu peso específico é de 0,13 g/cm<sup>3</sup>).

A medida que o peso específico aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e a durabilidade e, em sentido contrário, diminuem a permeabilidade à soluções preservantes e a trabalhabilidade.

### 3.2.3 Retratabilidade

Segundo Mady (2013), a retratabilidade é consequência direta da perda ou ganho de umidade da madeira, provocando contração na peça de madeira pela variação do volume. Pode ser evitada com o controle do processo de secagem.

Petrucci (1987, p. 134), define retratabilidade como sendo “[...] a propriedade da madeira de alterar suas dimensões e o volume quando seu teor de umidade varia entre o estado anidro e o estado de saturação (impregnação) dos tecidos celulósicos.”

Conforme Mady (2013), a contração da madeira pode ocorrer e ser avaliada em três aspectos:

- a) [...] tangencial: variação das dimensões da madeira no sentido perpendicular aos raios;
- b) [...] radial: variação das dimensões da madeira no sentido dos raios;
- c) [...] volumétrica: variação das dimensões da madeira considerando-se como parâmetro o seu volume total.

Pfeil e Pfeil (2003, p. 5), comenta o comportamento da madeira quanto a retração e inchamento:

As madeiras sofrem retração ou inchamento com a variação da umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (30%), sendo a variação dimensional aproximadamente linear. O fenômeno é mais importante na direção tangencial; para redução da umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retração radial é cerca da metade da direção tangencial. Na direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,3% da dimensão verde, para secagem de 30% a 0%. A retração volumétrica é aproximadamente igual à soma das três retrações lineares ortogonais.

### 3.2.4 Condutividade térmica

A madeira é um excelente isolante térmico. A condutividade térmica representa segundo Mady (2013), a medida da taxa de fluxo de calor através da madeira submetida a um gradiente de temperatura.

Conforme Mady (2013), “Devido à organização estrutural do tecido, que retém pequenos volumes de ar em seu interior, a madeira impede a transmissão de ondas de calor ou frio. Assim a madeira torna-se um mau condutor térmico, isolando calor ou frio.”

Petrucci (1987, p. 139-140) complementa que “A madeira é um mau condutor térmico, em consequência da sua estrutura celular (numerosas pequenas massas de ar aprisionadas) e de sua constituição celulósica (membranas – más condutoras de calor)”. Petrucci, afirma ainda que a umidade, direção de transmissão de calor, assim como a composição morfológica da madeira, são responsáveis pela variação da condutividade térmica.

### **3.2.5 Condutividade sonora**

Conforme Mady (2013), diminui-se a propagação das ondas sonoras ao entrar em choque com a superfície da madeira. O autor afirma, ainda, que “O procedimento de empregar madeira como revestimento de paredes enfraquece a reverberação sonora e melhora a distribuição das ondas pelo ambiente, tornando-a um produto adequado para o condicionamento acústico.”.

### **3.2.6 Condutividade elétrica**

Conforme Petrucci (1987, p. 140), a madeira apresenta as seguintes características quanto a condutividade elétrica:

Bem seca, a madeira é praticamente isolante, mas sua resistividade decresce rapidamente com o grau de umidade, para tornar-se praticamente constante acima do ponto de saturação ao ar. Pode atingir vários milhares de megaohm/cm para o estado seco; cai a alguns milhares de ohm/cm quando saturada.

Para um grau de umidade determinado, a resistividade depende da espécie, da direção e da massa específica. É duas a quatro vezes mais fraca na direção axial que na transversal, e um pouco mais fraca também no sentido radial que no tangencial. Cresce com a massa específica, sendo maior nas essências que contêm óleos e resinas.

A madeira seca é um isolante suficiente para instalações e equipamentos de baixa tensão, mas é preciso não esquecer que uma reumidificação pode fazer perder muito de sua eficácia.

### **3.2.7 Resistência ao fogo**

A resistência da madeira ao fogo depende diretamente da sua espessura e densidade.

Conforme Mady (2013) a madeira apresenta as seguintes características quanto à resistência ao fogo:

Apesar da madeira ser considerada um material inflamável, quando apresenta dimensões superiores a 25 mm (topo) é mais lentamente consumida pelo fogo que outros materiais. Isto ocorre pois quando o fogo atinge a madeira, destrói rapidamente a superfície, formando uma fina camada de carvão que retarda a propagação de oxigênio e, conseqüentemente, das chamas em direção ao interior da peça, fazendo com que o incêndio perca velocidade. Peças com 50 mm de espessura podem ser consideradas sempre mais seguras que estruturas metálicas. Abaixo de 20 mm, as peças de madeira tornam-se elementos de alimentação do incêndio e, portanto, devem ser evitadas em construções.

### 3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Conforme Petrucci (1987, p. 141), a resistência da madeira esta diretamente ligada as propriedades mecânicas da mesma. O autor classifica a resistência quanto aos tipos de esforços:

[...] principais: exercidos no sentido das fibras, relacionados com a coesão axial do material: compressão, tração, flexão estática, flexão dinâmica ou resiliência e cisalhamento.

[...] secundários: exercidos transversalmente às fibras, relacionados com a sua coesão transversal: compressão, torção e fendilhamento.

Conforme Coimbra<sup>1</sup> et al. (1976 apud OLIVEIRA, 2012, p. 23-24), a variação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, esta diretamente associada a orientação e direção das fibras que à compõem.

#### 3.3.1 Módulo de elasticidade

Segundo Pfeil e Pfeil (2003, p. 33), “O modulo de elasticidade [...] na direção das fibras é medido no ensaio de compressão [...]”. Já o modulo de elasticidade na direção tangencial não tem importância nas estruturas de madeira.

Segundo Coimbra<sup>2</sup> et al. (1976 apud OLIVEIRA, 2012, p. 24):

O módulo de elasticidade da madeira pode variar, em geral, desde valores inferiores a 100.000 kg/cm<sup>2</sup> até valores superiores a 250.000 kg/cm<sup>2</sup>[...]. Diversos fatores contribuem para essa variação ser mais ou menos ampla no valor do módulo, como peso específico (espécie), direção da carga com relação à orientação das fibras, etc. A influência desse último fator é apreciável e temos uma grande variação no valor do módulo de elasticidade, segundo a carga for aplicada paralela ou perpendicularmente às fibras. [...] Em termos gerais, o módulo de elasticidade

<sup>1</sup> COIMBRA, A.L. **Manual do engenheiro**. 1. ed. Porto Alegre: Globo, 1976. Tomo II.

<sup>2</sup> op. cit.

paralelamente às fibras é aproximadamente dez vezes maior que o módulo de elasticidade perpendicularmente às fibras. Essa relação pode variar se o carregamento transversal se fizer radiante.

### 3.3.2 Compressão paralelamente as fibras

Conforme Petrucci (1987, p. 144), “A resistência a compressão [...], é determinada, [...] pela tensão de ruptura de corpos de prova isentos de defeitos.”. A seguir, autor comenta a influencia da umidade nos ensaios de compressão paralelamente as fibras:

A influencia da umidade é observada pelo ensaio de corpos de prova desde a condição de verdes até secos em estufa. Da curva que relaciona os valores tensão da ruptura para percentagem de umidade, mais exatamente do trecho entre 10% e 20% de umidade, é obtido o coeficiente de correção de umidade [...] que expressa a variação em  $\text{kgf/cm}^2$  para a variação de 1% de umidade [...].

Referente aos ensaios de compressão paralelamente as fibras Coimbra<sup>3</sup> et al. (1976 apud OLIVEIRA, 2012, p. 25), comenta:

A carga no limite de proporcionalidade, é a máxima carga suportada pela peça sem sofrer sensível deformação permanente. Corresponde aproximadamente a 9/16 da carga de ruptura. O limite de resistência, para uma dada espécie, é mais regular que o limite de proporcionalidade; este apresenta maiores variações, por isso o limite de resistência pode ser um índice mais significativo e é de mais fácil obtenção.

[...] o limite de resistência da madeira com 12% de umidade varia entre 230 e 850  $\text{kg/cm}^2$ .

### 3.3.3 Compressão perpendicularmente as fibras

Segundo Coimbra<sup>4</sup> et al. (1976 apud OLIVEIRA, 2012, p. 25):

[...] à medida que a carga transversal é aumentada, as fibras comprimidas normalmente ao seu comprimento tendem a se aproximar. A aproximação torna o tecido lenhoso mais compacto e denso. Quando é ultrapassado o período de proporcionalidade, a deformação da madeira ocorre praticamente sob carga constante. Aumento os valores de carga, a madeira tende a apresentar fendilhamento nos extremos.

O verdadeiro valor de resistência à compressão normal às fibras da madeira, [...] é obtido por meio do carregamento uniforme sobre toda a superfície superior do corpo de prova.

<sup>3</sup> COIMBRA, A.L. **Manual do engenheiro**. 1. ed. Porto Alegre: Globo, 1976. Tomo II.

<sup>4</sup> op. cit.

### 3.3.4 Resistência à flexão

O comportamento da madeira quanto a resistência a flexão segundo Coimbra<sup>5</sup> et al. (1976 apud OLIVEIRA, 2012, p. 26):

Este, porém, não é, a rigor, o caso da madeira, material heterogêneo, cujas propriedades mecânicas variam segundo a direção anatômica considerada. Além desses fatores decorrentes da própria estrutura interna da madeira, intervêm outros fatores, como presença de nós, irregular distribuição da umidade na peça, desvio de fibras na zona de momento máximo, etc. A ação complexiva desses fatores determina na madeira um comportamento diverso do apresentado pelos materiais homogêneos e isotrópicos, na flexão estática. Mesmo para cargas bastante pequenas (deformações elásticas) ficou demonstrado [...] que as deformações da zona comprimida, não são iguais às deformações da zona tracionada, sendo essas últimas menores, em geral, que as primeiras. Essa desigualdade de deformações impõe um deslocamento do eixo neutro no sentido do bordo tracionado.

## 3.4 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme a ABIMCI (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE 2013, p. 2) a madeira é aplicada de três maneiras na construção civil: acabamentos, formas de concreto e estruturalmente.

A ABIMCI (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE, 2013, p. 2), detalha a aplicação da madeira como:

- a) pesada interna: são utilizados peças de madeira serrada ou o painel laminado colado na forma de vigas, caibros, pranchas e tábuas utilizadas em estruturas de telhados;
- b) leve externa e interna estrutural: consideram-se as tábuas e pontaletes empregados temporariamente na construção como andaimes, escoramento e formas para concreto;
- c) interna decorativa: exige que a madeira apresente cor e desenhos decorativos, são empregadas como forros, painéis, lambris e guarnições;
- d) leve interna, de utilidade geral: também aplicada como forros, painéis, lambris e guarnições, porém o aspecto decorativo da madeira não é o fator limitante;
- e) leve em esquadrias: engloba as portas, venezianas, caixilhos e molduras [...].
- f) assoalhos domésticos: compreende produtos de madeira sólida, como também os produtos engenheirados que são utilizados em pisos ( assoalhos, tacos, tacões e parquetes).

---

<sup>5</sup> COIMBRA, A.L. **Manual do engenheiro**. 1. ed. Porto Alegre: Globo, 1976. Tomo II.

### 3.5 CEDRINHO

Também conhecido popularmente por bruteiro, cachimbo-de-jabuti, cambará, cambará-rosa, cedrilho, jaboti, jaboti-da-terra-firme, quaruba-vermelha, quarubatinga, quaruburana, verga-de-jabuti. Conforme o IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014), o cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm, *Vochysiaceae*) ocorre no Brasil nos estados do Amazonas, Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. O Instituto ainda destaca os usos da madeira cedrinho na construção civil:

- a) leve em esquadrias,
  - portas;
  - venezianas;
  - caixilhos.
- b) leve interna, estrutural: ripas.
- c) leve interna, utilidade geral,
  - lambris;
  - molduras;
  - guarnições;
  - forros.
- d) uso temporário,
  - andaimes;
  - fôrmas para concreto;
  - pontaletes.

## 4 COMBUSTÃO DA MADEIRA

Segundo Lepage et al. (1986, p. 220), o processo de combustão da madeira pode ser definido da seguinte forma:

[...] combustão é um processo onde duas ou mais substâncias reagem com evolução de calor, luz e produtos residuais. Este processo depende não só de fatores químicos, mas também das propriedades físicas do substrato e outras condições que afetam o fenômeno de transporte de calor e de massa.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 100), a queima da madeira ocorre:

[...] através de reações pirolíticas, oxidativas e hidrolíticas dos polímeros da parede celular, que se verificam com o aumento de temperatura e produção de gases inflamáveis que realimentam o processo de combustão. A lignina contribui mais do que os outros polímeros para a produção de carvão, que, por suas propriedades de isolante térmico, ajuda a proteger a madeira, retardando a evolução do processo.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 220), a combustão da madeira envolve transformações físicas e reações químicas complicadas pelos seus diferentes substratos, onde a madeira não entra diretamente em combustão, “primeiramente, a queima da madeira ocorre quando ela se decompõe por pirólise em produtos voláteis e combustíveis que, após a ignição, irão formar a chama.”.

Apenas em casos específicos a madeira pode entrar em combustão diretamente, conforme os seguintes casos citados por Lepage et al. (1986, p. 220-221):

- a) se a superfície da madeira sofrer uma irradiação de calor tão intensa que atinja a temperatura de ignição, em frações de segundo, poderemos considerar que a madeira entrou em combustão;
- b) se o pó de madeira seca estiver suspenso no ar, em proporções que garanta a presença de oxigênio suficiente para sua combustão e que mantenha uma elevada densidade, poderá haver uma rápida combustão, até com explosão.

São observados fenômenos químicos durante a combustão da madeira conforme listados por Lepage et al. (1986, p. 221):

- a) pirólise da madeira: transformações dos constituintes da madeira (compostos de elevado peso molecular), por degradação térmica, em compostos de reduzido peso molecular;

- b) combustão dos produtos de pirólise: oxidação, pelo oxigênio do ar, das substâncias geradas na etapa anterior.

Conforme o detalhamento anterior, pode-se observar as etapas da queima constante de uma peça de madeira com superfície plana. Lepage et al. (1986, p. 221) descreve os estágios da queima da madeira da seguinte forma:

Inicialmente, a superfície da madeira será aquecida por mecanismo de irradiação e/ou convecção de calor. Devido às características físicas da madeira (baixa condutibilidade térmica, baixa densidade, elevado calor específico), formam-se zonas isotérmicas, que, desprezando os efeitos de borda, terão a forma definida pela superfície exposta ao aquecimento e ser-lhe-ão paralelas.

No decorrer do aquecimento, estas isoterma irão avançar pela peça de madeira, no sentido do fluxo de calor [...], até que a temperatura do meio, atrás da peça de madeira, se equilibre com a dos meios que contém a fonte de calor.

O avanço da isoterma  $T_0$ , que segundo Lepage et al. (1986, p. 221) é maior que a temperatura da madeira, e cria uma região que esta compreendida entre  $T_0$  e  $200^{\circ}\text{C}$  denominada zona A. Observa-se nessa região a formação de vapor de água, traços de gás carbônico, ácido fórmico, ácido acético e de glioxal. A secagem da madeira ocorre na zona A.

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da madeira, é aumentada pela existência de água no seu interior, conforme Lepage et al. (1986, p. 221), pois parte deste calor é consumido na evaporação da água. Entretanto, a água aumenta a condutibilidade térmica da madeira, logo, esse aumenta o fluxo de calor pela região úmida.

Lepage et al. (1986, p. 221-223) descrevem o que ocorre a seguir da seguinte maneira:

Considerando que na superfície da madeira origina-se uma região rica em vapor de água, e que do centro da peça de madeira, enquanto a isoterma  $T_0$  avançar, haverá um fluxo efluente de vapor de água, podemos admitir que, no interior da peça de madeira, se tenha expulsado o ar e impedido sua penetração. Portanto, no interior desta peça, haverá um ambiente sem oxigênio, onde não ocorrerão reações de combustão, mas apenas de pirólise.

Na zona A, o processo de pirólise tem caráter endotérmico e atinge uma variação máxima de temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , onde segundo Lepage et al. (1986, p. 223) logo após observa-se a elevação da temperatura até o seu valor inicial.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 223), a mistura gasosa originada na zona A não é inflamável, e mantendo-se a temperatura constante, nota-se que a madeira eleva-se até a

280<sup>0</sup>C. Conseqüentemente as isoterma T<sub>0</sub> e 200<sup>0</sup>C deslocam-se para o interior da peça. Onde surge uma nova região entre as isoterma 200 e 280<sup>0</sup>C denominada zona B.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 223), a combustão da madeira segue da seguinte forma:

Na zona B, ocorre uma pirólise suave da madeira, com caráter endotérmico [...] e com a liberação de vapor de água, dióxido de carbono, ácidos fórmico e acético, glioxal e, em menor proporção, monóxido de carbono. Estes produtos saem misturados com os originados na zona A, que atravessa a zona B para atingir a superfície livre da peça de madeira. Há uma perda de massa da madeira da ordem de 12% sobre a inicial [...]. Isto justifica a formação de novas quantidades de água e de outros produtos, na zona B, por pirólise da madeira.

Afirma Lepage et al. (1986, p. 224), que os produtos gerados na pirólise da zona B, não são facilmente inflamáveis, e que mantendo a fonte de calor, a isoterma T<sub>0</sub> avança ainda mais, juntamente com às de 200 e 280<sup>0</sup>C. A superfície da madeira chega a atingir 500<sup>0</sup>C, onde surge uma nova região, entre as isoterma de 280 e 500<sup>0</sup>C, denominada zona C.

Na zona C, Lepage et al. (1986, p. 224) afirmam que através de análise diferencial, nota-se que até a temperatura de 320<sup>0</sup>C a pirólise da madeira tem caráter endotérmico. Tal fenômeno ocorre devido à degradação da celulose, concomitantemente com a absorção de energia pela lignina.

Lepage et al. (1986, p. 224-225) prosseguem:

Porem após temperaturas da ordem de 310 a 320<sup>0</sup>C, a pirólise da lignina passa a ser exotérmica, resultando, assim, um efeito global exotérmico. Portanto, na zona C, ocorre um incremento da quantidade de calor fornecida às regiões mais frias do sistema. Se este calor não for dissipado, a temperatura do sistema cresce rapidamente. Esta degradação térmica da madeira gera: monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogênio, que eluem do sistema, diluídos com os produtos da pirólise das zonas A e B, que atravessam a região C em direção à superfície livre da madeira. Também são gerados alcatrões altamente inflamáveis. Estes alcatrões, constituídos por produtos líquidos de alto ponto de ebulição, são arrastados para fora do corpo sólido, pelos gases e vapores da pirólise. Obtém-se, assim, uma suspensão de gotículas de alcatrão em fase gasosa efluente, que é chamada fumaça.

Do ponto de vista da combustão, na zona C, os produtos efluentes são facilmente inflamáveis por uma chama piloto. A pirólise secundária tornou os produtos mais inflamáveis ainda. Caso não haja uma chama piloto, a mistura combustível/ar poderá ser inflamada quando sua temperatura atingir a temperatura de ignição espontânea de pelo menos um de seus constituintes.

A massa sólida resultante da pirólise, na zona C, é o que se denomina carvão vegetal, que segundo Lepage et al. (1986, p. 225-226), serve de isolante térmico pois possui um terço da

condutibilidade da madeira. Com isso o carvão retarda o progresso da combustão da madeira, dificultando o acesso do calor no interior da peça.

Continuando o processo de combustão, Lepage et al. (1986, p. 226-227) afirmam que:

[...] a temperatura da superfície da peça de madeira eleva-se acima de 500<sup>0</sup>C, e as isotermas T<sub>0</sub>, 200, 280 e de 500<sup>0</sup>C deslocam-se ainda mais no sentido do fluxo do calor. A região entre a isoterma de 500<sup>0</sup>C é denominada zona D [...].

Os produtos provenientes das zonas A, B e C sofrem, na zona D, reações secundárias mais enérgicas que as da zona C. Os alcatrões e produtos voláteis da zona C sofrem pirólise, formando produtos altamente combustíveis. Inertes como a água e o dióxido de carbono, reagem com o carvão para formar monóxido de carbono, hidrogênio e formaldeído.

Os produtos efluentes da zona D, sob ponto de vista de combustão, são altamente inflamáveis e segundo Lepage et al. (1986, p. 226) podem manter sua combustão até que não haja mais sua produção por pirólise da madeira nas zonas anteriores.

Lepage et al. (1986, p. 226-227) concluem a explicação quanto ao processo de combustão da madeira da seguinte forma:

A 500<sup>0</sup>C (calor vermelho incipiente), ocorre também a combustão, em fase sólida do carvão vegetal. Nota-se a incandescência do carvão, neste estágio. Quando a temperatura da superfície da peça de madeira, agora convertida em carvão vegetal, atingir a temperatura de 1000<sup>0</sup>C (calor vermelho-amarelado), a velocidade de consumo do carvão vegetal por incandescência será maior que a velocidade de penetração das isotermas no interior da peça de madeira.

A medida que se exaure a madeira intacta, a chama luminosa de difusão da queima dos produtos de pirólise da madeira é substituída pela chama não-luminosa de difusão da queima de hidrogênio e monóxido de carbono. Assim que se esgote o suprimento de monóxido de carbono e hidrogênio, a chama extingue-se, restando apenas a combustão do carvão vegetal com pequena ou nenhuma chama [...].

## 5 INCÊNDIO

O estudo sobre incêndio é de extrema importância, pois seu entendimento permite, conscientizar e educar a população quanto aos riscos, assim como possibilita ao engenheiro dimensionar estruturas estáveis que permitam em um caso sinistro, a completa evacuação da edificação e combate de incêndio seguros.

Segundo Seito et al. (2008, p. 35-36), para que o fogo se mantenha, é necessário que tanto o combustível, comburente, calor e reação em cadeia devem coexistir ligados. Também conhecido como a **teoria do tetraedro de fogo**, é utilizada para explicar os meios de extinção do fogo com a retirada de um dos elementos que o compõem.

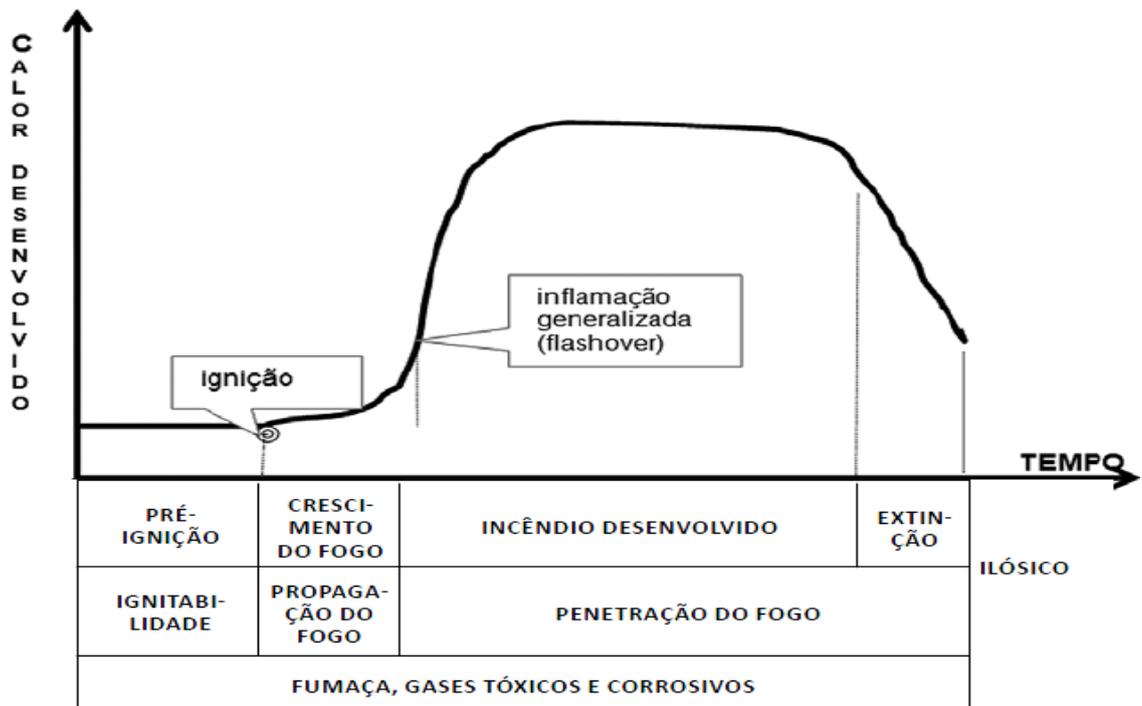
Seito et al. (2008, p. 43), afirma que devido a grande quantidade de fatores que contribuem para o início e desenvolvimento do incêndio, não existem dois incêndios iguais. Sendo assim Seito et al. (2008, p. 43-44) cita os fatores principais e responsáveis pelo surgimento e desenvolvimento do incêndio:

- a) forma geométrica e dimensões da sala ou local;
- b) superfície específica dos materiais combustíveis envolvidos;
- c) distribuição dos materiais combustíveis no local;
- d) quantidade de material combustível incorporado ou temporário;
- e) características de queima dos materiais envolvidos;
- f) local do início do incêndio no ambiente;
- g) condições climáticas (temperatura e umidade relativa);
- h) aberturas de ventilação do ambiente;
- i) aberturas entre ambientes para a propagação do incêndio;
- j) projeto arquitetônico do ambiente e ou edifício;
- k) medidas de prevenção de incêndio existentes;
- l) medidas de proteção contra incêndio instaladas.

Sobre a evolução de um incêndio em uma edificação, Seito et al. (2008, p. 44), afirma que “O incêndio inicia-se, na sua maioria, bem pequeno. O crescimento dependerá: do primeiro item ignizado, das características do comportamento ao fogo dos materiais na proximidade do item ignizado e sua distribuição no ambiente.”.

A figura 2 apresenta a curva de incêndio e suas fases.

Figura 2- Curva da evolução de um incêndio em edificações



(fonte: SEITO et al. 2008)

## 5.1 FASES DO INCÊNDIO

Seito et al. (2008, p. 44) explica o incêndio em três fases:

A curva possui três fases distintas: a primeira fase é o incêndio incipiente tendo-se um crescimento lento, em geral de duração entre cinco a vinte minutos até a ignição, em que inicia a segunda fase caracterizada pelas chamas que começam a crescer aquecendo o ambiente. O sistema de detecção deve operar na primeira fase e o combate a incêndio e consequente extinção tem grande probabilidade de sucesso. Quando a temperatura do ambiente atinge em torno de 600 oC, todo o ambiente é tomado por gases e vapores combustíveis desenvolvidos na pirólise dos combustíveis sólidos. Havendo líquidos combustíveis, eles irão contribuir com seus vapores, ocorrerá a inflamação generalizada (*flashover*) e o ambiente será tomado por grandes labaredas. Caso o incêndio seja combatido antes dessa fase (por exemplo, por chuveiros automáticos) haverá grande probabilidade de sucesso na sua extinção. A terceira fase é caracterizada pela diminuição gradual da temperatura do ambiente e das chamas, isso ocorre por exaurir o material combustível.

Para um melhor entendimento do incêndio, a seguir são apresentadas as fases que compõem um incêndio residencial desde a ignição a extinção do mesmo.

### **5.1.1 Ignição**

Segundo Rodrigues (2009, p. 39), ignição “É o princípio do incêndio, onde a ação rápida de brigadistas de incêndio ou mesmo dos ocupantes da edificação, utilizando os sistemas ativos de proteção, podem debelar o fogo.”.

Neste primeiro estágio Seito et al. (2008, p. 45) afirma que pode ser subdividida em duas fases: abrasamento e chamejamento. Sendo que “no abrasamento a combustão é lenta, sem chama e produção de pouco calor, mas com potencial para preencher o compartimento com gases combustíveis e fumaça.”.

Segundo Seito et al. (2008, p. 45), “[...] a combustão inicial pode levar horas antes do aparecimento das chamas.”. E devido à baixa produção de calor nessa fase, “[...] a força de flutuação da fumaça e ou dos gases gerados é pequena e seus movimentos serão determinados pelo fluxo do ambiente.”.

Sobre a fase de chamejamento, Seito et al. (2008, p. 45), define como combustão com o aparecimento de chamas e fumaça, sendo que “o desenvolvimento do calor e da fumaça e gases é mais rápido que a combustão por abrasamento.”.

Segundo Quintiere<sup>6</sup> (1998 apud RODRIGUES, 2009, p. 39), nessa fase “A temperatura do ambiente e a quantidade de oxigênio não apresentam alterações significativas. Neste caso a combustão é governada pela quantidade de materiais combustíveis, podendo ser considerada uma queima livre.”.

### **5.1.2 Fase de aquecimento – Pré-Flashover**

Conforme Seito et al. (2008, p. 45), neste estágio o incêndio se propaga para outros objetos que estão próximos, como o teto, paredes e mobílias.

---

<sup>6</sup> QUINTIERE, J. G. **Principles of fire behavior**. New York: Delma, 1998.

Conforme Rodrigues (2009, p. 39):

Nesta fase, o fornecimento de calor aumenta, sendo que a radiação e a convecção passam a aquecer os materiais combustíveis mais distantes, ocorrendo a pirólise gradativa, levando-os às suas temperaturas de ignição, incendiando-se, e assim sucessivamente. Então o incêndio passa a ser moderado, com sua taxa de calor liberado e velocidade de propagação dependendo dos materiais combustíveis e do seu arranjo no compartimento.

Dehaan<sup>7</sup> (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 39-40) detalha esta fase da seguinte forma:

A parte superior do compartimento fica com a temperatura alta, baixo conteúdo de oxigênio e resíduos, fumaça e produtos em suspensão advindos da queima incompleta dos materiais, inclusive gases tóxicos e inflamáveis da pirólise. Muito diferente desta parte, próximo ao chão há mais ar disponível e a temperatura mais baixa. No contato da chama com o ar disponível na parte mais baixa e o material inflamável aquecido na parte superior, pode ser ocasionado o chamado *flameover* ou *rollover*, que é a propagação da chama apenas em uma camada que intersecciona os fatores. Se isto ocorrer, há um acréscimo de temperatura e maior taxa de propagação.

### 5.1.3 Incêndio desenvolvido - *Flashover*

Conforme Quientiere<sup>8</sup> (1998 apud RODRIGUES, 2009, p. 40), “O *flashover* marca a transição em que o incêndio passa a ser controlado pelas condições de ventilação e pela geometria do edifício.”.

Dehaan (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 40), descreve o *flashover* como sendo a fase na qual:

[...] a temperatura da camada superior gera uma taxa de liberação de calor de 20 kW/m<sup>2</sup> ao nível do chão (próximo de 600°C), é atingida a temperatura de ignição dos resíduos em suspensão (fumaça), fazendo que com todo o ambiente seja envolvido por chamas e entre em combustão. Este fenômeno é chamado *flashover*, o qual causa um aumento abrupto de temperatura do compartimento.

Diversos experimentos foram feitos por Quientiere<sup>9</sup> (1998 apud RODRIGUES, 2009, p. 40), a fim de se compreender a dinâmica deste fenômeno, onde também foi incendiado “[...] de forma controlada e monitorada uma sala de estar com uma mesa de centro e duas poltronas,

---

<sup>7</sup> DEHAAN, J. D. **Kirk's fire investigation**. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

<sup>8</sup> QUINTIERE, J. G. **Principles of fire behavior**. New York: Delma, 1998.

<sup>9</sup> op. cit.

constando aos 25 minutos após a ignição, uma temperatura aproximada de 538C no momento do *flashover* [...]”.

Analisando os resultados dos ensaios Rodrigues (2009, p. 41) conclui que “[...] estas pesquisas mostram que um incêndio atinge seu ponto de ignição súbita generalizada [...] entre entre 10 e 30 minutos depois do seu início, dependendo do calor liberado, da área de ventilação e da carga de incêndio [...]”.

#### 5.1.4 Extinção do incêndio

Dehaan<sup>10</sup> (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 42) descreve a fase de extinção do incêndio da seguinte forma:

É também chamado de *smoldering phase* (fase de brasa), justamente por não apresentar mais chama deflagrada, e sim, combustão em brasa, com consequente diminuição da temperatura. Isto porque a ventilação não é adequada, a pirólise dos combustíveis sólidos diminuem, pois estes foram consumidos. Porém, deve-se tomar cuidado no combate ao incêndio, pois a abertura de algum acesso pode fornecer a mistura adequada combustível/comburente e ocorrer uma segunda ignição.

---

<sup>10</sup> DEHAAN, J. D. **Kirk's fire investigation**. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

## 6 IGNÍFUGOS

Uma das desvantagens da utilização da madeira na construção civil é o fato da madeira ser um material combustível. Essa desvantagem pode ser minimizada com o uso de produtos industrializados, os ignífugos, também conhecidos por retardantes de chamas. Com o objetivo de conhecer as características do ignífugo para que se possa obter sua máxima eficiência, nesse capítulo serão abordadas as teorias de proteção contra a propagação de chamas e as vantagens e desvantagens do uso das tintas ignífugas.

### 6.1 TEORIAS DE PROTEÇÃO CONTRA A PROPAGAÇÃO DE CHAMAS

Conforme Lepage et al. (1986, p. 241), em exposição a altas temperaturas, a madeira tratada com ignífugo, não deve contribuir para a sua própria combustão, e sim, apenas carbonizar até que se decomponha por completo.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 241), “ A forma de ação dos ignífugos na proteção contra a propagação das chamas é explicada, pelo menos em princípio, pelas seguintes teorias.”.

- a) teoria do recobrimento;
- b) teorias relativas a efeitos térmicos;
- c) teorias relativas à ação de gases;
- d) teorias químicas.

Essas teorias conforme Lepage et al. (1986, p. 241), “[...] não são mutuamente exclusivas, pois um mesmo ignífugo pode agir segundo o mecanismo preconizado por mais de uma das teorias.”. A seguir são expostas as teorias que explicam o mecanismo de funcionamento de diversos produtos ignífugos.

#### 6.1.2 Teoria do recobrimento

De acordo com Lepage et al. (1986, p. 241), em contato com elevadas temperaturas, o ignífugo expande, formando uma camada protetora de esmalte ou espuma sobre a madeira,

evitando assim o acesso do ar até a madeira “[...] bem como o escape dos produtos voláteis de pirólise que alimentariam a chama.”.

Lepage et al. (1986, p. 242), explicam que:

O ignífugo previsto por esta teoria deve fundir na temperatura de pirólise da madeira, e formar, preferivelmente, uma camada de espuma. Esta espuma deve ser estável nas condições de temperatura da pirólise. A espuma é mais efetiva que uma camada de esmalte, pois, sendo porosa, atua como isolante térmico, diminuindo o fluxo de calor para o interior da madeira. O depósito de material fundido retém os alcatrões efluentes da madeira, propiciando sua posterior pirólise. Assim, gera-se uma camada adicional de carvão, o que é benéfico, pois, além de reduzir a quantidade de produtos inflamáveis liberados, reduz-se também a quantidade de calor que passa para as regiões de pirólise da madeira[...].

Para esta teoria, segundo Lepage et al. (1986, p. 242), “[...] não seriam necessárias grandes penetrações do ignífugo na madeira, pois uma pequena camada de material fundido seria suficiente para proteger a madeira das chamas, o que induz ao uso de tintas como retardantes de chamas[...].”.

### **6.1.3 Teorias relativas a efeitos térmicos**

#### **6.1.3.1 Isolação térmica**

Lepage et al. (1986, p. 242), explicam a teoria da seguinte forma:

Esta teoria prevê o controle da propagação de chamas pela diminuição do fluxo de calor para a zona de pirólise no interior da madeira. Havendo um menor aquecimento das partes internas, a pirólise será amortecida e como consequência menor quantidade de produtos combustíveis será liberada, conseguindo-se assim a extinção das chamas. Este efeito isolante pode ser obtido, catalisando a formação de camadas mais espessas de carvão vegetal. Um ignífugo que apresenta esta capacidade é o carbonato de potássio.

#### **6.1.3.2 Condutibilidade térmica**

Lepage et al. (1986, p. 242), explicam a teoria da seguinte forma:

Esta teoria prevê uma disposição de calor mais intensa que a quantidade suprida pela fonte de ignição. Para sua aplicação, dever-se-ia elevar a condutibilidade térmica da madeira a valores próximos à dos metais. Por exemplo, impregnando a madeira com ligas metálicas. Entretanto, não há experiências que sustentem esta teoria.

### 6.1.3.3 Absorção térmica

Lepage et al. (1986, p. 242-243), explicam esta teoria da seguinte maneira:

Esta teoria prevê a utilização do calor fornecido pela fonte de ignição na mudança de estado e/ou decomposição dos ignífugos, ao invés de sua participação na pirólise da madeira. Desta maneira, a temperatura da madeira ficaria abaixo de sua temperatura de ignição. É o que ocorre com a madeira molhada, onde a absorção de calor para vaporizar a água retarda o seu processo de ignição. Porém, na prática, não se conseguiu estabelecer uma relação entre a eficiência do ignífugo e sua capacidade de absorção de calor.

## 6.1.4 Teorias relativas à ação de gases

### 6.1.4.1 Efeito da diluição

Conforme Lepage et al. (1986, p. 243), “Essa teoria prevê que os gases não combustíveis gerados pelos ignífugos, quando de sua decomposição, diluem os gases combustíveis, gerados na pirólise da madeira, abaixo do limite inferior de inflamabilidade.”.

Lepage et al. (1986, p. 243), continuam:

Os gases inertes, também, impediriam o acesso do oxigênio à superfície da madeira. Com as impregnações, possíveis tecnicamente, obtêm-se pequenos volumes de gases inertes. Em outras palavras, esta crítica não é inteiramente válida, pois os produtos de pirólise já vêm diluídos com inertes, formados na própria pirólise da madeira.

Lepage et al. (1986, p. 243) afirmam que “O ignífugo não deve se decompor em temperaturas normais de utilização da madeira, mas devem liberar os gases diluentes em temperaturas pouco superiores a do início da pirólise da madeira.”.

### 6.1.4.2 Efeito da Inibição de reações em cadeia

Conforme Lepage et al. (1986, p. 243), “Esta teoria prevê a inibição da combustão, em fase gasosa, dos produtos voláteis de pirólise, através de substâncias gasosas capazes de promoverem as reações de terminação dos radicais livres presentes na combustão.”.

Lepage et al. (1986, p. 243-244), explicam que, “Os halogênios e ácidos halogenídricos [...] podem gerar radicais livres, que competem com os radicais livres normais de uma reação de combustão. Esta competição, aliada ao fato do radical livre de halogênio ser facilmente refeito, leva à extinção da chama.”

### 6.1.5 Teoria química

Segundo Lepage et al. (1986, p. 244):

Esta teoria preconiza o uso de ignífugos que alteram a reação de pirólise da madeira, de forma a reduzir a produção de alcatrão e gases, e, ao mesmo tempo, incrementar a de carvão vegetal. Em suma, os ignífugos, segundo esta teoria, deveriam catalisar a formação de carvão, que, como já vimos, é de difícil combustão (só acima de 500°C), e diminuir a pirólise por redução do fluxo de calor.

Ignífugos eficientes chegam a diminuir a temperatura da pirólise, e, eventualmente, elevam a temperatura em que a pirólise fica exotérmica. A presença de substâncias inorgânicas solúveis em água inibe a formação da levoglicosana, que é o primeiro passo para a formação de alcatrões de celulose.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 244), “Ácidos fosfóricos, cloretos de magnésio, alumínio e zinco, sulfetos de ferro e cobalto catalisam a formação de carvão e diminuem a formação de alcatrão na pirólise da lignina.”.

## 6.2 RETARDANTES DE CHAMAS

Conforme Lepage et al. (1986, p. 251):

As primeiras notícias sobre a utilização de produtos que tornavam a madeira incombustível vêm da época dos antigos egípcios, que procuravam aumentar a resistência da madeira contra o fogo embebendo-a em solução de alúmen, ou recobriam-na com argila e óxido de cálcio. A pintura dos teatros italianos com tintas contendo argila e gesso foi recomendada em 1938 por N. Sabbatini. Wild recebeu uma patente em 1735 por um tratamento contendo alúmen, bórax e ácido sulfúrico. Fagot, em 1740, propôs a utilização de alúmen e sulfato de ferro. Desde 1800 é conhecida a ação do amoníaco como retardador de fogo. Em 1821 Gay-Lussac, a pedido de Luiz XVIII da França, após muitas experiências, recomendou o uso de fosfato de amônio, uma mistura de fosfato de amônio e cloreto de amônio ou uma mistura de cloreto de amônio e bórax. O incêndio do teatro da Corte Nacional de Munique, em 1823, motivou a realização de novos ensaios e o novo teatro recebeu um revestimento com silicato de sódio e carbonato de cálcio.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 251), a utilização de retardantes de chamas, à base de produtos e misturas hidrossolúveis que possuem baixo grau de aderência com a madeira, acabam por ser pouco resistentes à lixiviação, e seu uso é apenas recomendado em madeiramento que não esteja exposto às intempéries.

Conforme Lepage et al. (1986, p. 251), existem ignífugos formulados à base de resinas que possuem grande eficiência como retardantes de chamas e ótima resistência à lixiviação.

A seguir são explicados dois métodos utilizados para a aplicação de produtos ignífugos em superfícies de madeira, a impregnação sob pressão e o recobrimento.

### **6.2.1 Impregnação sob pressão**

Conforme Lepage et al. (1986, p. 252), “[...] este método é utilizado quando há a necessidade de conferir à madeira uma resistência ao fogo classe 1 (material pouco combustível). A aplicação do produto é feita em autoclave.”.

Lepage et al. (1986, p. 252), citam as vantagens da utilização desse método:

- a) controle do processo da madeira tratada;
- b) não há possibilidade de que o tratamento seja removido mecanicamente;
- c) o solvente é usualmente a água;
- d) há a possibilidade de adição nas formulações de produtos inseticidas e fungicidas que protegem a madeira contra fungos e cupins.

Lepage et al. (1986, p. 252), citam as desvantagens da utilização desse método:

- a) custo de implantação e funcionamento da usina e o alto custo do tratamento;
- b) quando há grande penetração do produto, há um desperdício do material, levando-se em consideração o fenômeno propagação de chama;
- c) os produtos são solúveis em água e, por absorção e perda de umidade do ar, eles migram para a superfície da madeira, onde se cristalizam. Esta cristalização aumenta a acidez ou a alcalinidade da madeira, aumentando também o efeito de corrosão de metais. Inibidores de corrosão aumentam o custo;
- d) diminuição da resistência física-mecânica da madeira, que, em alguns casos, atinge a ordem de grandeza de 18%.

## 6.2.2 Recobrimento

Conforme Lepage et al. (1986, p. 252), “Este método consiste em revestir a madeira com vernizes, tintas de emulsão ou oleosa, através de pincelamento, rolo ou aspersão [...]”.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 252-253):

Devido à grande quantidade de tipos de revestimento e devido à grande variação de produtos utilizados, apenas generalidades podem ser ditas quanto às propriedades destes retardantes de chamas. Alguns produtos entumescem com o aquecimento, formando uma espuma na superfície que facilita a formação de carvão. Outros formam, na superfície, uma camada vítrea que impede a entrada de oxigênio e a saída de gases inflamáveis. Paralelamente aos efeitos acima mencionados, gases e vapores podem ser formados com o objetivo de diluir os gases combustíveis produzidos pela madeira ou, então, de interferir na química da combustão.

Lepage et al. (1986, p. 253) citam as vantagens do método de recobrimento:

- a) pelo fato dos produtos estarem concentrados na superfície, possui máximo efeito no retardamento da propagação de chama, que é um fenômeno de superfície;
- b) seu efeito nas propriedades físicas da madeira é mínimo;
- c) baixo custo de tratamento, devido à pequena quantidade de produto utilizada;
- d) aplicação no local com a madeira já instalada;
- e) efeito decorativo;
- f) alguns tipos de ignífugos possuem resistência à lixiviação.

Lepage et al. (1986, p. 253), citam as desvantagens do método de recobrimento:

- a) falta de controle de qualidade quando não aplicado nas fábricas;
- b) fácil remoção do produto por abrasão ou por variação da umidade;
- c) efeito decorativo inferior aos produtos convencionais;
- d) são mais caros que os acabamentos convencionais.

## 7 MÉTODO

Devido à inexistência de normas técnicas para ensaios de simulação de incêndios em madeira com e sem tratamento ignífugo, o presente trabalho foi baseado no método definido por Oliveira (2012, p. 40).

Para a reprodução do método foi necessário consultar normas técnicas de incêndio e realizar ensaios de resistência mecânica de corpos de prova de madeira, seguindo também a metodologia empregada por Rodrigues (2009, p. 111). Sendo assim o objetivo deste capítulo é demonstrar o método que foi adotado para os ensaios, assim como as normas técnicas e pesquisas correlatas utilizadas. A seguir é realizada a explicação do método e procedimento de ensaios adotados assim como os itens utilizados: simulador de incêndio em escala reduzida, carga de incêndio, corpos de prova, ignífugo e medição de temperaturas.

### 7.1 SIMULADOR DE INCÊNDIO

No Campus do Vale da UFRGS foi construído para o presente trabalho um simulador de incêndio em escala reduzida de 1/3, em relação às dimensões de uma edificação residencial real. Ele foi construído com a intenção de produzir condições propícias para os ensaios de estruturas de madeira sob ação de incêndio de baixo risco.

O simulador foi construído devido à inexistência de normas específicas sobre como amostras de madeira devem ser ensaiadas para verificação da resistência à ação do fogo. A construção do simulador seguiu algumas recomendações já utilizadas no trabalho de Oliveira (2012), como por exemplo, o uso de escala reduzida para a simulação do incêndio.

O simulador foi construído com blocos de concreto celular autoclavado com juntas de argamassa refratária e fechamento com laje pré-moldada composta por vigotas e tabelas. O projeto do simulador foi desenvolvido exclusivamente para a realização desta pesquisa. O simulador possui dimensões internas de 1,20 x 1,20 x 1,10 m de altura, abertura frontal para a entrada de ar e colocação da carga de incêndio nas dimensões de 1,20 x 0,30 m e duas aberturas laterais de 1,18 x 0,22 m para colocação e sustentação dos corpos de prova a 75 cm do piso. Para a sustentação dos corpos de prova, foi projetada uma grelha em ferro fundido,

juntamente com uma estrutura metálica composta por molduras das aberturas laterais e trilhos que servem de suporte e movimentação da grelha onde são colocados os corpos de prova. Para a vedação das aberturas laterais durante as simulações, foram construídas tampas em ferro fundido. Espera-se que as características do simulador adotadas para esta pesquisa possam ser estendidas para as demais pesquisas na área, servindo como um possível parâmetro para a realização de ensaios de altas temperaturas em elementos de madeira. A figura 3 mostra o simulador de incêndio construído para a finalidade desta pesquisa.

Figura 3 – Simulador de incêndio utilizado durante a pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 4 apresenta a estrutura metálica que serviu de suporte para a grelha.

Figura 4 – Detalhe da estrutura metálica do simulador de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 5 apresenta a grelha metálica que serviu de suporte e movimentação dos corpos de prova durante os ensaios.

Figura 5 – Grelha de ferro fundido



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 6 apresenta as duas tampas que foram construídas para vedar as aberturas laterais durante a simulação de incêndio.

Figura 6 – Tampas laterais de ferro fundido



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.2 CARGA DE INCÊNDIO

A NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 2) define a carga de incêndio como a “[...] soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos.”. A norma ainda classifica os tipos de incêndio devido à carga de incêndio. Considerando que, este trabalho é sobre incêndios de baixo risco, a carga de incêndio deve ter valores iguais ou inferiores a  $300 \text{ MJ/m}^2$ .

O dimensionamento da carga de incêndio foi estabelecido de acordo com as dimensões do simulador de incêndio. Considerando que:

- a) conforme a NBR 14432 o poder calorífico da madeira é igual a  $19 \text{ MJ/m}^2$  ;
- b) o pinus foi previamente escolhido como carga de incêndio;
- c) um litro de gasolina podium foi utilizado para a ignição, que equivale à  $2,47 \text{ kg}$  de pinho;

Considerando que as barras de pinus foram cortadas nas dimensões de  $5 \times 5 \times 80 \text{ cm}$ , foram necessárias 22 peças de pinus além de um litro de gasolina podium para obter a carga de incêndio de  $300 \text{ MJ/m}^2$ . O engradado de pinus foi distribuído dentro do simulador uniformemente sobre duas vigas, que serviram como apoio lateral, e proporcionaram uma altura suficiente do piso para que fosse possível colocar a bandeja com o combustível entre a pilha e o piso.

A figura 7 mostra o posicionamento da carga de incêndio durante o ensaio.

Figura 7 – Carga de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

### 7.3 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS

Os fatores fixos do programa experimental foram o tipo de madeira utilizado (cedrinho), um único tipo e fabricante de tinta ignífuga e a carga de incêndio descrita no item 7.2.

Os fatores variáveis da pesquisa foram: o tipo de ensaio de resistência (compressão e flexão), o tempo de exposição ao fogo dos corpos de prova (2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; e 20 minutos) e a utilização ou não de tinta ignífuga.

### 7.4 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram preparados conforme as determinações do anexo B da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.47). Dentre outras generalidades, o anexo B fornece:

- a) as dimensões dos corpos de prova para os ensaios de compressão paralelas às fibras e flexão;
- b) número de corpos de prova necessários para cada tipo ensaio;
- c) equipamentos e taxa de carregamento necessários para os ensaios de compressão paralelas às fibras e flexão.

Conforme a Norma citada acima, a determinação do número de corpos de prova depende do conhecimento das características físicas da espécie estudada. Considerando que o cedrinho possui propriedades conhecidas, assume-se que sua caracterização é simplificada exigindo-se 6 corpos de prova para cada ensaio realizado.

Após a definição do número de corpos de prova necessários para os ensaios, foram determinadas conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.50-62), as dimensões necessárias para os corpos de prova usados em cada um dos ensaios.

Para os ensaios de compressão paralela as fibras, as dimensões exigidas são 5 x 5 x 15 cm e foram utilizados 12 corpos de prova para cada tempo de exposição à situação de incêndio (ou seja: 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5 e 20 minutos), sendo que 6 foram expostos sem aplicação de tinta ignífuga, e 6 foram protegidos com a aplicação da tinta. Foram também

ensaiados 6 corpos de prova sem exposição ao fogo, sendo que estes foram utilizados para valores de referência. No total, foram ensaiados 102 corpos de prova à compressão.

Para os ensaios de flexão as dimensões exigidas são 5 x 5 x 115 cm e foram adotados os mesmos procedimentos do ensaio de compressão, com 6 corpos de prova com aplicação de tinta ignífuga e 6 corpos de prova sem aplicação da tinta, sendo 12 corpos de prova para cada tempo de exposição à situação de incêndio, totalizando 102 corpos de prova ensaiados.

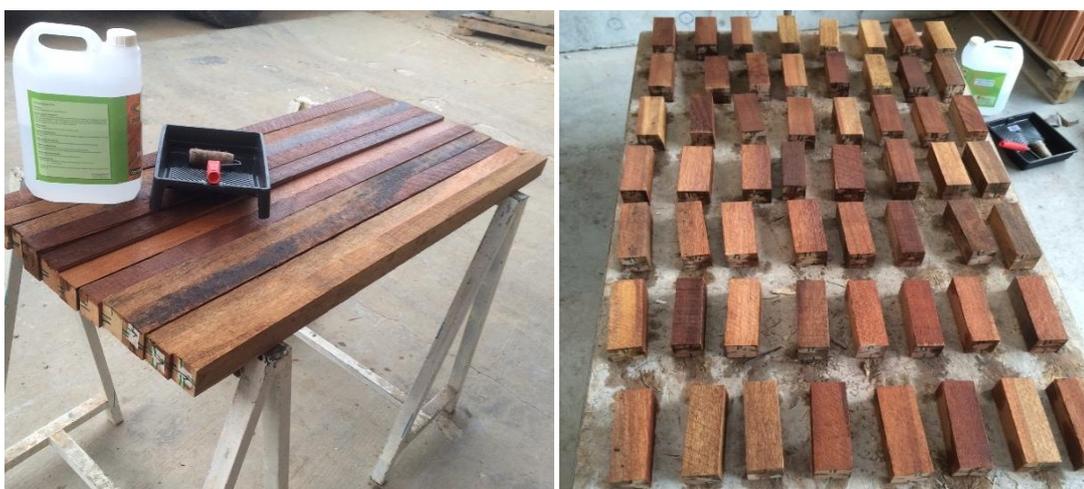
## 7.5 APLICAÇÃO DA TINTA IGNÍFUGA NOS CORPOS DE PROVA

Neste estudo foi testada a eficiência da tinta ignífuga em corpos de prova de madeira. Para tanto, foram ensaiadas amostras com e sem a aplicação da tinta, e os resultados foram obtidos em termos de resistência à compressão paralelamente às fibras e à flexão destas amostras.

A tinta utilizada para a realização desta pesquisa é fabricada em São Paulo e é indicada exclusivamente para madeiras cruas.

A tinta foi aplicada seguindo os procedimentos indicados no manual do produto, o qual indica a aplicação da tinta com rolo em 2 demãos aplicadas uniformemente em intervalos de 1 hora entre as aplicações. A figura 8 apresenta a aplicação da tinta ignífuga nos corpos de prova de flexão e compressão paralela às fibras.

Figura 8 – Aplicação da tinta ignífuga sobre corpos de prova de flexão e compressão



(fonte: elaborado pelo autor)

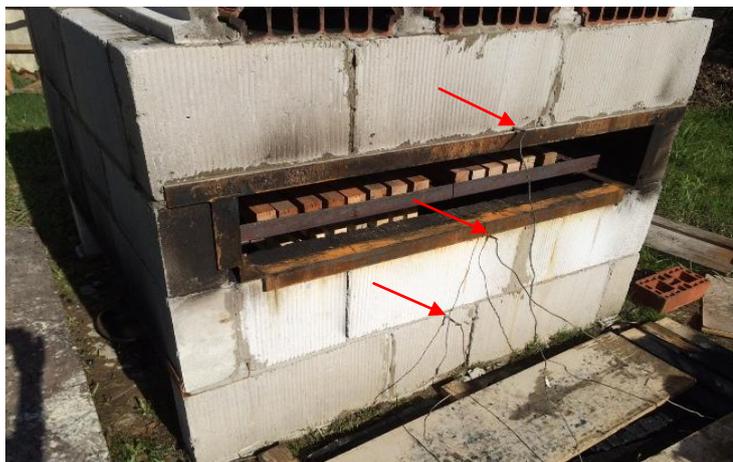
## 7.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A fim de se conhecer o desenvolvimento das temperaturas durante os ensaios, após a aplicação da carga de incêndio e ignição, utilizou-se 3 termopares tipo K. Os termopares foram posicionados da seguinte maneira ao longo da altura do forno.

- a) junto à carga de incêndio;
- b) junto aos corpos de prova, a 75 cm do piso;
- c) parte superior do forno, junto à cobertura do mesmo.

A figura 9 apresenta o posicionamento dos termopares junto ao forno.

Figura 9 – Posicionamento dos termopares tipo K



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.7 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados conforme os procedimentos listados abaixo:

- a) posicionamento do recipiente de aço de 50 x 40 x 5cm de altura sobre o piso;
- b) empilhamento da carga de incêndio sobre o recipiente de aço;
- c) colocação da grelha com os corpos de prova a 75 cm do piso;
- d) posicionamento dos termopares na cobertura, corpos de prova e carga de incêndio;
- e) disposição de 1 litro de combustível de ignição no recipiente metálico, e posterior ignição;

- f) no instante da ignição, inicia-se a cronometragem para obter o tempo de ensaio requerido;
- g) ao atingir o tempo necessário para o ensaio (2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 minutos), extingue-se o incêndio;
- h) repetição dos ensaios listados, com diferentes corpos de prova, nova carga de incêndio e diferentes tempos de ensaios;
- i) rompimento dos corpos de prova;
- j) análise dos resultados dos ensaios de flexão e compressão paralela as fibras, calculando-se em seguida as resistências características.

## 7.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os ensaios de ruptura a compressão paralela às fibras foram feitos conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p.52), a qual indica que os corpos de prova devem ser ajustados numa prensa que contenha uma rótula entre o atuador e o corpo de prova, aplicando uma carregamento monotônico crescente com uma taxa de 10MPa/min.

A figura 10 mostra o ensaio de compressão paralela às fibras sendo executado em laboratório.

Figura 10 – Ensaio de compressão paralela às fibras



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO

Os ensaios de resistência a flexão dos corpos de prova foram feitos conforme as determinações da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p.63), que indica que os corpos de prova devem ser “vinculados a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre apoios de 21h, sendo o equilíbrio do sistema garantido pelo atrito com o atuador”. O carregamento consiste de “uma carga concentrada aplicada por meio de um cutelo acoplado ao atuador [...]” e deve ser “[...] monotônico crescente, com uma taxa de 10 MPa/min.”.

A figura 11 mostra o ensaio de resistência flexão dos corpos de prova sendo realizado em laboratório.

Figura 11 – Ensaio de resistência à flexão



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.10 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DOS RESULTADOS

Conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p.48), os valores característicos das propriedades da madeira (tanto para os resultados de resistência à compressão como de resistência a flexão) devem ser estimados pela seguinte expressão:

$$\frac{\bar{x}}{n}$$

(fórmula 1)

Onde:

$x_{wk}$  = resistência característica;

$x_n$  = resistência da unidade amostral  $n$ .

Os valores das resistências das unidades amostrais devem ser colocados na ordem crescente  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ , “[...] desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não de tomando para  $x_{wk}$  valor inferior a  $x_1$  nem a 0,7 do valor médio ( $x_m$ ).”.

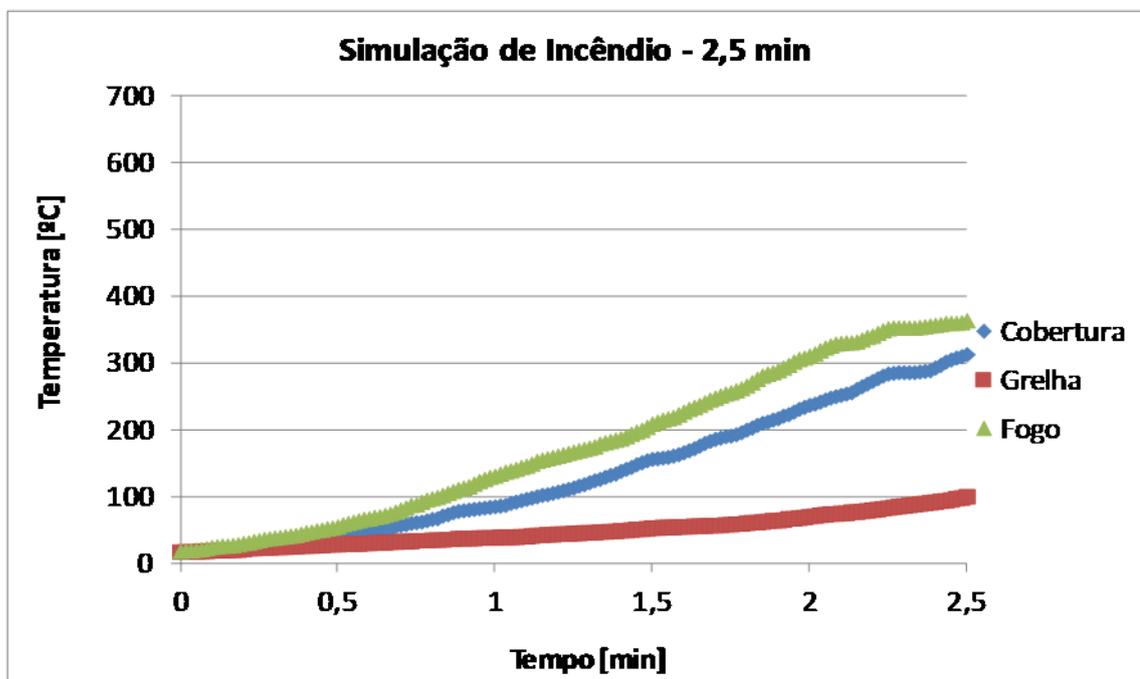
## 8 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as curvas de temperatura no interior do simulador de incêndio assim como os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão paralelamente às fibras e à flexão dos corpos de prova de madeira cedrinho.

### 8.1 CURVAS DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO SIMULADOR

São apresentados nesta seção os gráficos das curvas de temperatura que ocorreram durante os diferentes tempos de exposição dos corpos de prova à carga de incêndio. A figura 12 apresenta as temperaturas às quais os corpos de prova de compressão paralelamente às fibras e de flexão ficaram submetidos durante a simulação de incêndio com duração de 2,5 min. A temperatura elevou-se lentamente, atingindo temperatura inferior a 400°C.

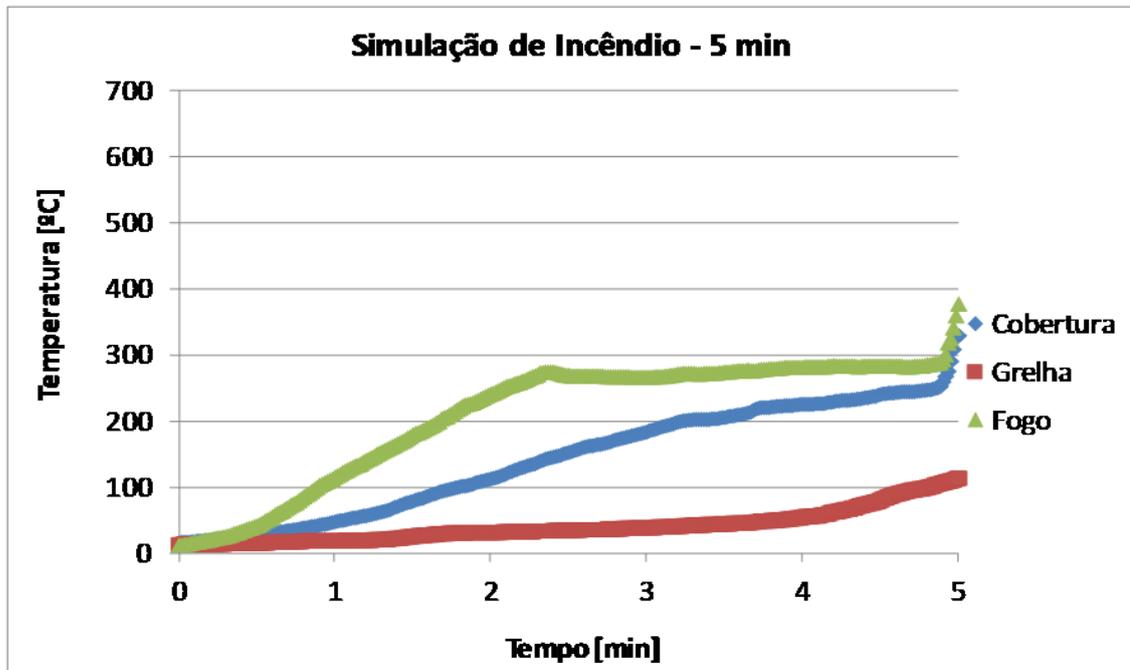
Figura 12 – Leitura dos termopares durante um período de 2,5 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 13 apresenta as temperaturas que ocorreram dentro do simulador durante o tempo de 5 minutos de exposição dos corpos de prova à situação de incêndio. Novamente a temperatura máxima não ultrapassou os 400°C.

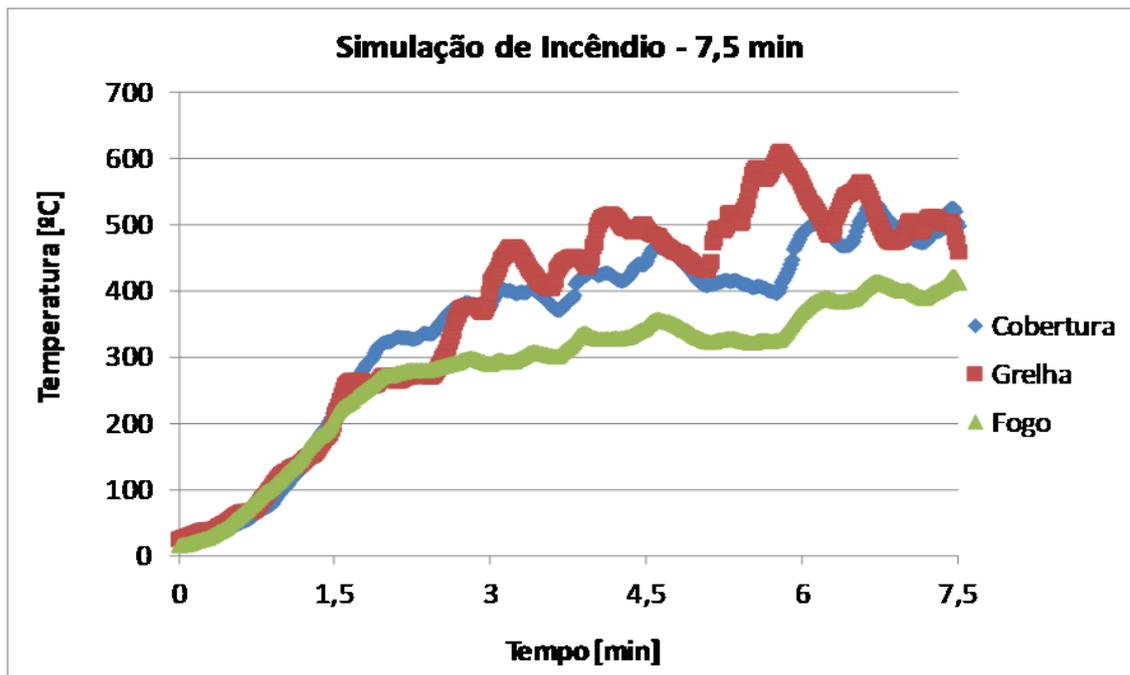
Figura 13 – Leitura dos termopares durante 5 minutos de incêndio.



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 14 apresenta as temperaturas em que os corpos de prova foram submetidos durante 7,5 minutos de ensaio. Os corpos de prova de flexão e compressão foram submetidos a temperaturas próximas a 600°C.

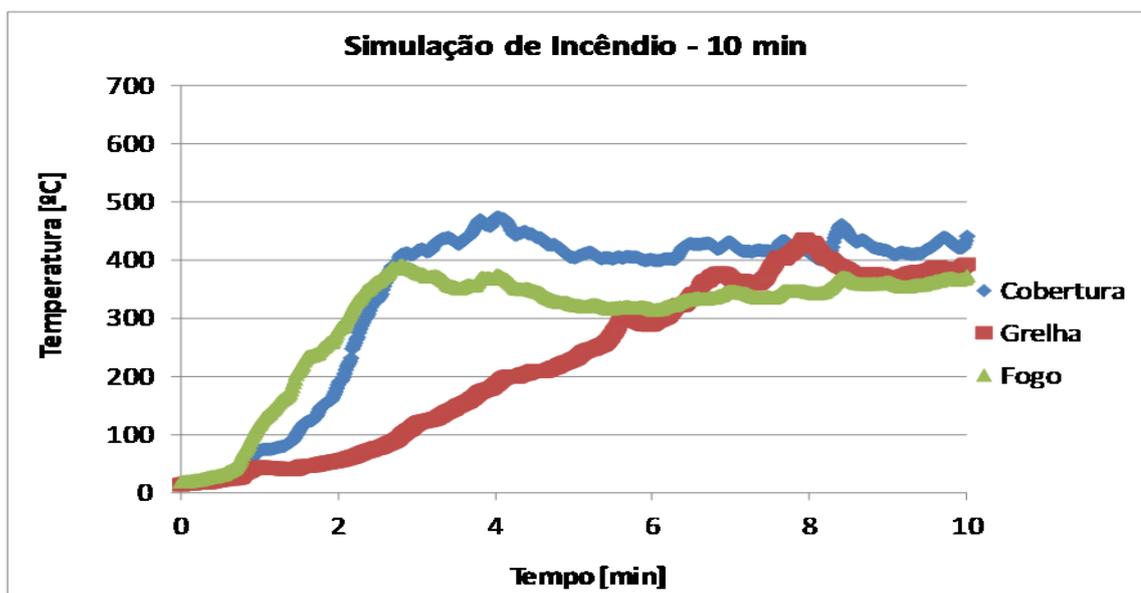
Figura 14 – Leitura dos termopares durante 7,5 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 15 apresenta as temperaturas em que os corpos de prova de compressão paralelamente as fibras e de flexão foram submetidos durante o ensaio de 10 minutos de simulação de incêndio. As temperaturas desta simulação de incêndio não ultrapassaram os 500°C, muito provavelmente porque estava ventando no momento que ocorria o ensaio.

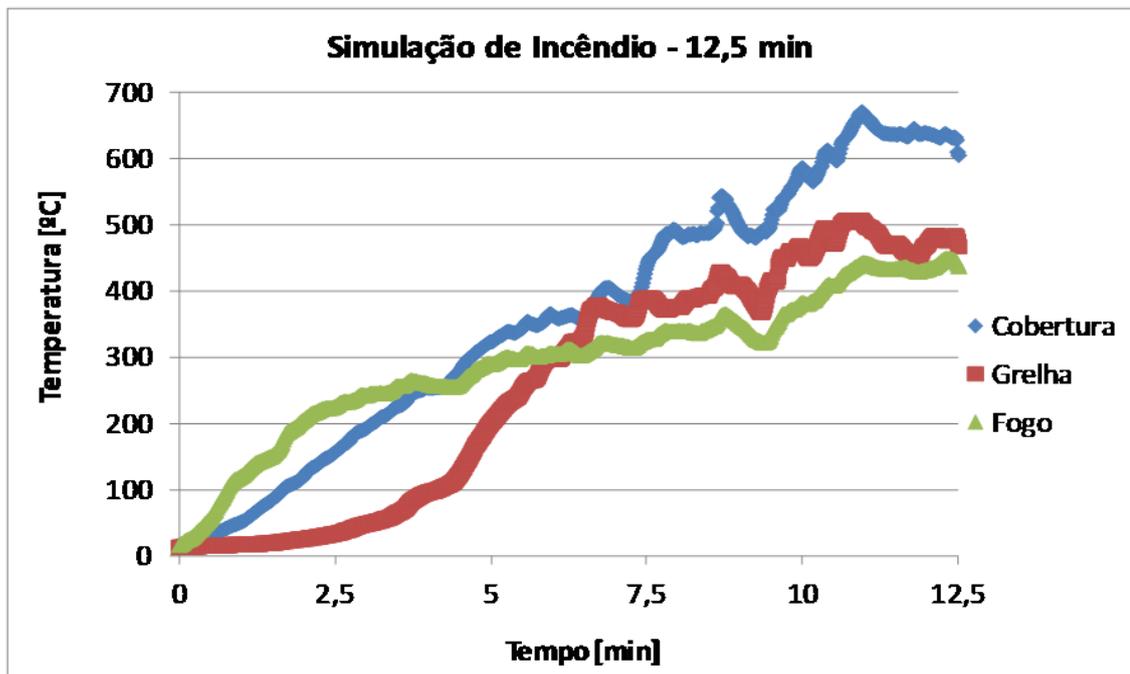
Figura 15 – leitura dos termopares durante 10 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 16 apresenta as temperaturas dentro do simulador de incêndio em que os corpos de prova de compressão e flexão foram submetidos durante a simulação de incêndio de 12,5 minutos. A temperatura interna não estabilizou e apresentou um crescimento constante, chegando a ultrapassar os 600°C. A temperatura nos corpos de prova chegou a um valor máximo de 500°C.

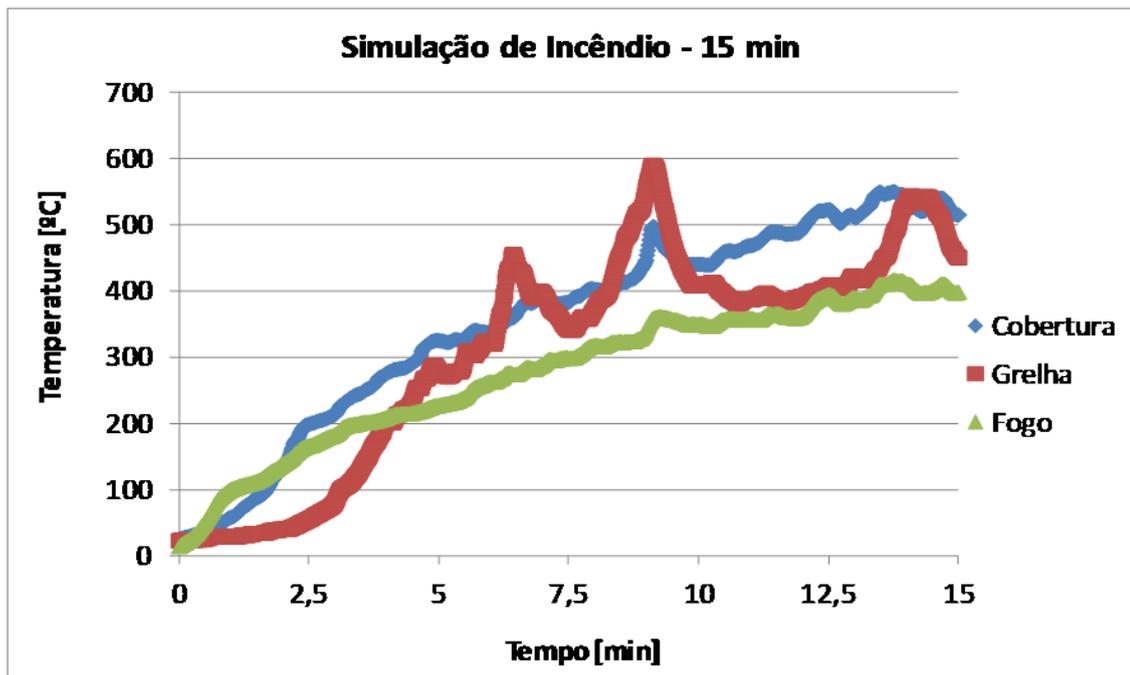
Figura 16 – Leitura dos termopares durante 12,5 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 17 apresenta as temperaturas internas do simulador de incêndio em que os corpos de prova de compressão e flexão foram submetidos durante 15 minutos de incêndio. A temperatura interna do simulador apresentou picos superiores a 500°C durante o ensaio.

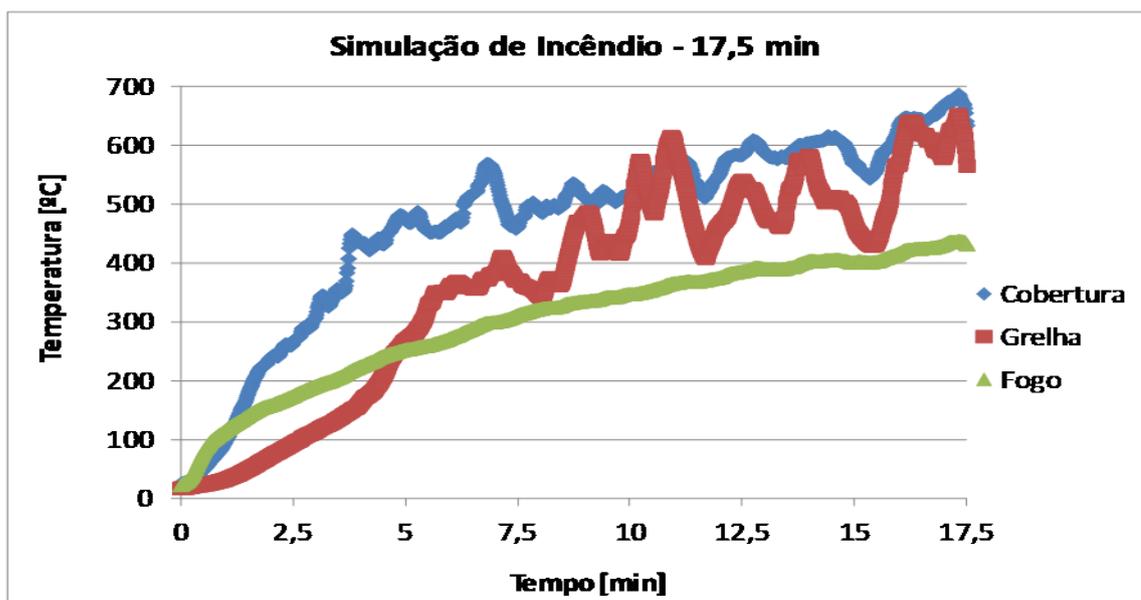
Figura 17 – Leitura dos termopares durante 15 minutos de incêndio.



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 18 apresenta as temperaturas internas do simulador de incêndio em que os corpos de prova de flexão e compressão foram submetidos durante 17,5 minutos de ensaio. A temperatura manteve-se acima dos 500°C na maior parte do tempo, com alguns picos acima dos 600°C.

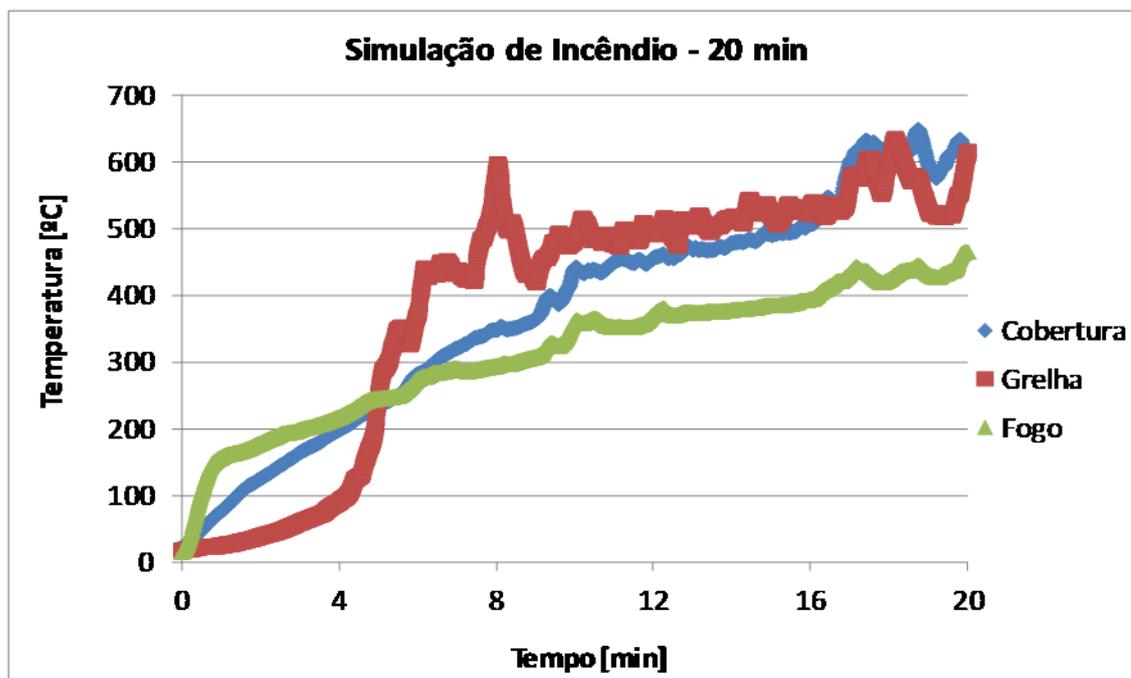
Figura 18 – Leitura dos termopares durante 17,5 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 19 apresenta as temperaturas internas do simulador de incêndio em que os corpos de prova de flexão e compressão foram submetidos durante 20 minutos de ensaio. A temperatura atingiu picos acima de 600°C durante o incêndio.

Figura 19 – Leitura dos termopares durante 20 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pelo autor)

Pode se observar nos gráficos que conforme o aumento do tempo das simulações de incêndio as temperaturas do fogo, grelha e cobertura tendem a ficar mais próximas. Notou-se que mesmo aos 20 minutos de exposição a uma situação de incêndio, as temperaturas internas não ultrapassaram os 700°C. Foi necessário utilizar areia a partir do tempo de 12,5 minutos de exposição à situação de incêndio, para cobrir os corpos de prova que eram retirados do simulador de incêndio, de maneira a extinguir as chamas das amostras.

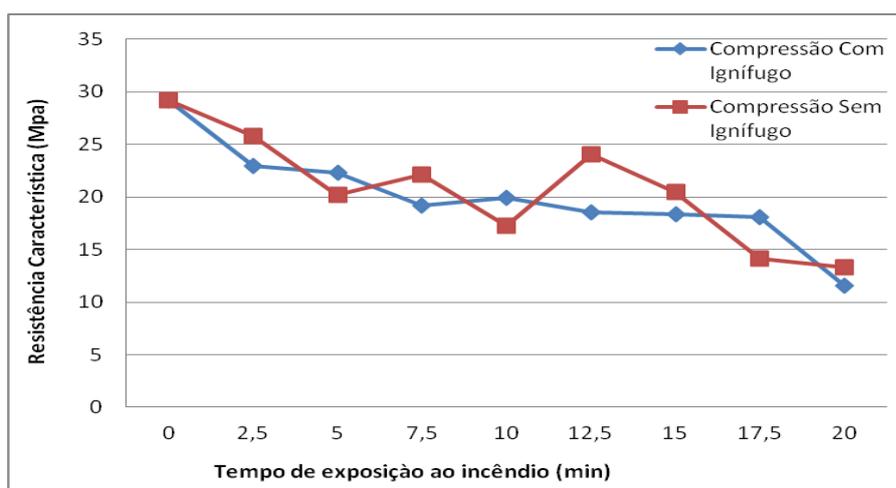
## 8.2 RUPTURA À COMPRESSÃO PARALELAMENTE ÀS FIBRAS

Ao romper os corpos de prova com tratamento ignífugo e sem tratamento à compressão paralelamente às fibras, foram registradas as cargas fornecidos pela prensa. Conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p.48), essas cargas foram convertidas em resistências características onde foi possível comparar as amostras que

receberam tratamento ignífugo com as amostras sem tratamento, conforme se pode observar na figura 20.

Os valores de resistência característica e de ruptura dos corpos de prova ensaiados à resistência à compressão podem ser encontrados no Apêndice A deste trabalho.

Figura 20 – Comparação das resistências das amostras com e sem tratamento ignífugo

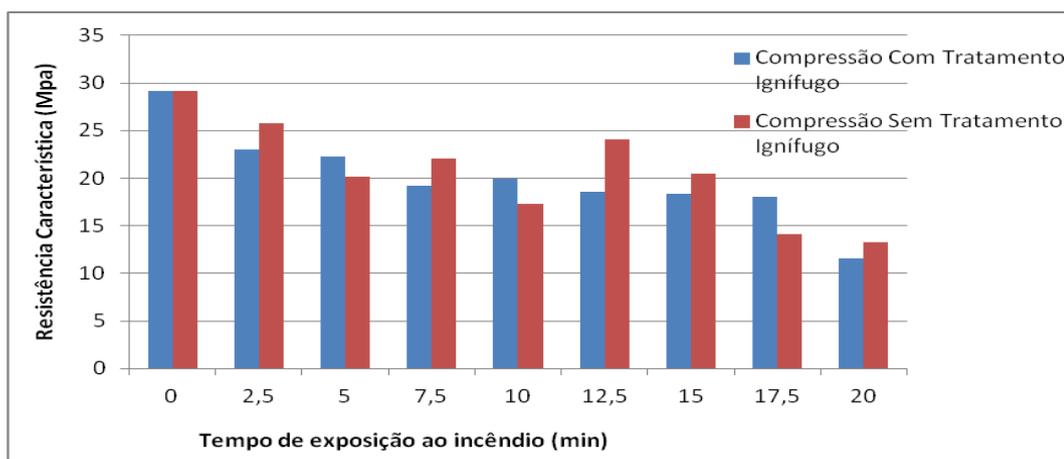


(fonte: elaborado pelo autor)

Observou-se que os corpos de prova com o tratamento ignífugo apresentaram resistência característica superior nos tempos de 5, 10 e 17,5 minutos. Estes mesmos corpos de prova mostraram um decréscimo constante de resistência característica à medida que aumenta o tempo de exposição ao incêndio. Quanto aos corpos de prova que não receberam o tratamento com a tinta, estes apresentaram resistência superior nos tempos de 2,5; 7,5; 12,5; 15 e 20 minutos, porém não houve um decréscimo constante de resistência, pois o ensaio de 7,5 minutos apresentou resistência superior ao de 5 minutos de exposição ao incêndio, assim como o ensaio de 12,5 minutos apresentou resistência característica superior ao ensaio de 10 minutos. Este fato pode ser atribuído à elevada variabilidade da madeira. A utilização de tinta ignífuga parece ter contribuído para uma melhor uniformidade e conseqüente menor variabilidade nos ensaios para estes corpos de prova.

A figura 21 compara as resistências dos ensaios de compressão paralelamente às fibras das amostras com tratamento ignífugo e sem tratamento para verificar a eficiência da tinta ignífuga.

Figura 21 – Análise da eficiência do tratamento com tinta ignífuga



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme a hipótese de pesquisa deste trabalho, esperava-se que as amostras que receberam tratamento com tinta ignífuga apresentassem resistência característica 30% maior comparativamente às amostras que não receberam tratamento nos ensaios de resistência a compressão paralelamente às fibras. No entanto foi verificado que no tempo de 2,5 minutos de exposição ao incêndio as amostras que não receberam tratamento com tinta ignífuga obtiveram resistência característica 11% maior que as amostras que receberam tratamento, o mesmo observou-se nos ensaios de 7,5; 12,5; 15 e 20 minutos que apresentaram 13%; 22,9%; 10% e 12,7% de resistência característica superior em relação às amostras com tratamento ignífugo. Já, nos ensaios de 5, 10 e 17,5 minutos de exposição ao incêndio, as amostras que receberam tratamento ignífugo obtiveram resistência característica superior às amostras sem tratamento, cerca de 9,5%, 13,4% e 21,6%, mas não alcançaram o rendimento de 30% proposto na hipótese do trabalho.

Analisando comparativamente as resistências características, não foi possível verificar um padrão de comportamento, uma vez que houve um revezamento dos resultados. A análise dos resultados dos ensaios de compressão paralelamente às fibras indica que o tratamento com a tinta ignífuga do fabricante em questão não parece ser eficiente.

O fabricante da tinta ignífuga utilizada neste trabalho indica no manual do uso do produto que se deve passar 2 demãos com intervalo de 1 hora entre aplicações. Como esperado, foi possível verificar durante a aplicação da tinta que algumas amostras absorviam melhor a tinta, isto se deve ao fato da madeira ser proveniente de um ser vivo e, conseqüentemente, suas

propriedades anisotrópicas mudam com as condições ambientais mesmo dentro de uma mesma espécie.

A disposição dos corpos de prova dentro do simulador poderia ser outro fator que contribuiu para aumentar a variabilidade da resistência das amostras, uma vez que os corpos de prova mais centralizados aparentavam maior degradação em comparação as amostras mais próximas das paredes internas do simulador de incêndio.

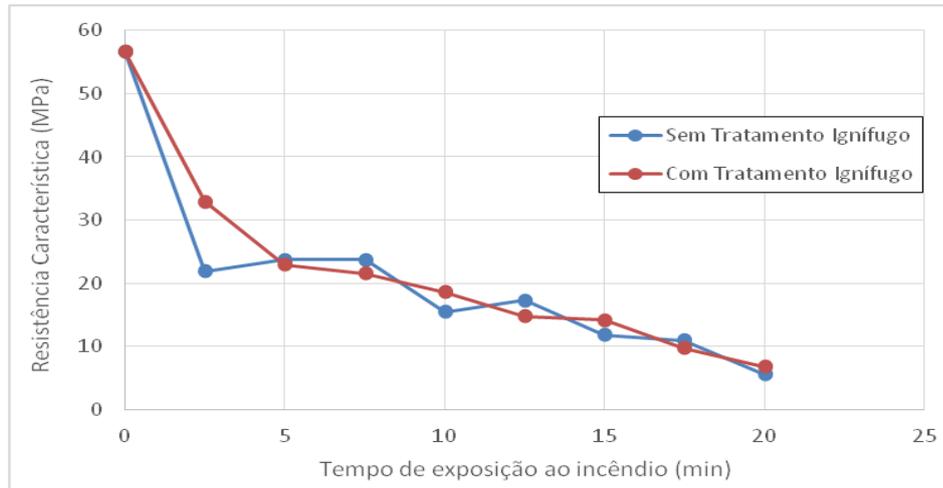
Esperava-se uma perda de resistência mecânica gradativa das amostras em função do tempo de exposição ao incêndio, o que não ocorreu principalmente nos ensaios das amostras sem tratamento ignífugo como se pode observar na comparação dos ensaios de 7,5 e 5 minutos de exposição e com os ensaios de 12,5 e 10 minutos de exposição ao incêndio. O que pode ser explicado devido ao fato da madeira possuir grande variabilidade das características físicas, e também pelo corte, uma vez que algumas amostras possuíam mais cerne e outras mais alburno.

### 8.3 RUPTURA A FLEXÃO

Ao romper os corpos de prova com tratamento ignífugo e sem tratamento à flexão, foram registradas as cargas fornecidas pela prensa. Conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p.48), essas cargas foram convertidas em resistências características onde foi possível comparar as amostras que receberam tratamento ignífugo com as amostras sem tratamento conforme se pode observar na figura 22.

Os valores de resistência característica e de ruptura dos corpos de prova ensaiados à resistência à flexão podem ser encontrados no Apêndice A deste trabalho.

Figura 22 – Comparação da resistência à flexão das amostras com e sem tratamento ignífugo

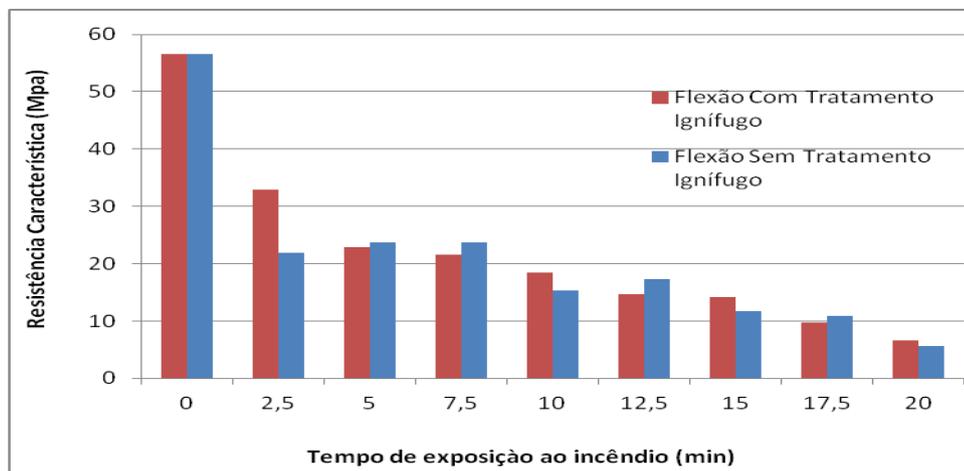


(fonte: elaborado pelo autor)

Observando os valores característicos dos ensaios de flexão, foi possível verificar que as amostras com tratamento ignífugo obtiveram resultados superiores às amostras sem tratamento nos tempos de 2,5; 10; 15 e 20 minutos de exposição ao incêndio. Já os ensaios que não obtiveram tratamento com ignífugo apresentaram resultados melhores nos tempos de 5; 7,5; 12,5 e 17,5 minutos de exposição ao incêndio. Porém, ambas apresentaram padrões próximos e constantes quanto à perda de resistência mecânica à flexão em função do tempo de exposição das amostras ao incêndio.

A figura 23 apresenta um gráfico comparativo das resistências características das amostras ensaiadas à flexão, para verificar a eficiência do tratamento com tinta ignífuga.

Figura 23 – Análise da eficiência do tratamento com tinta ignífuga



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme a hipótese de pesquisa deste trabalho, esperava-se que as amostras que receberam tratamento com tinta ignífuga apresentassem resistência característica 30% maior comparativamente às amostras que não receberam tratamento nos ensaios de resistência à flexão. Foi verificado, no entanto, que no ensaio de 5 minutos de exposição ao incêndio, às amostras sem tratamento ignífugo obtiveram resistência característica 3,2% superior as amostras que foram pintadas com a tinta ignífuga, o mesmo foi observado quanto aos tempos de 7,5; 12,5 e 17,5 minutos de exposição, onde as resistências foram 9%, 14,6%, 11,5% superiores as amostras que receberam tratamento, respectivamente. Já nos ensaios de 2,5; 10; 15 e 20 minutos, as amostras que receberam tratamento ignífugo apresentaram resistência superior às amostras sem tratamento com valores na ordem de 33% para o ensaio de 2,5 minutos de exposição ao incêndio, 17% para o ensaio de 10 minutos de exposição, 17% para o ensaio de 15 minutos e 17% para o ensaio de 20 minutos de exposição.

Apenas no ensaio de 2,5 minutos se confirmou a hipótese de pesquisa deste trabalho. Analisando as resistências características resultantes dos ensaios de flexão foi possível verificar que as amostras que foram tratadas com tinta ignífuga não apresentaram resistência mecânica superior ou inferior às amostras sem tratamento ignífugo, pois as diferenças de resistência apresentadas são próximas e se beneficiam de uma forma equilibrada de alternância de comportamento. A análise dos resultados dos ensaios de flexão indica que o tratamento com a tinta ignífuga do fabricante em questão não é eficiente quanto à resistência à flexão.

Assim como o ensaio de compressão paralelamente às fibras, o mesmo pode-se verificar quanto à variabilidade da madeira, absorção da tinta ignífuga e diferentes tipos de cortes que acabam beneficiando algumas amostras com mais cerne do que outras. A disposição dos corpos de prova dentro do simulador poderia ser outro fator que contribuiu para aumentar a variabilidade da resistência das amostras, pois os corpos de prova mais centralizados aparentavam maior degradação em comparação as amostras mais próximas das paredes internas do simulador de incêndio.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese para o trabalho foi elaborada estimando-se que ao submeter os corpos de prova a diferentes tempos de exposição a um incêndio de baixo risco, em todos os ensaios de compressão paralelamente às fibras e de flexão, as amostras que receberam o tratamento com tinta ignífuga apresentariam resistência característica 30% maior comparativamente às amostras que não receberam tratamento. Tal fato não se comprovou, pois não houve diferença considerável entre as resistências características das amostras que receberam tratamento em relação às amostras que não receberam a aplicação do produto. No entanto, não foi possível verificar um padrão de comportamento tanto das amostras com tratamento quanto às amostras sem tratamento ignífugo, pois houve muita variabilidade nos resultados. Uma vez que o tratamento com a tinta ignífuga do fornecedor em questão não resultou numa eficiência quanto às resistências à compressão paralelamente as fibras e à flexão, também não prejudicou a resistência em comparação aos corpos de prova sem tratamento com os corpos de prova com tinta ignífuga.

São limitações do trabalho a utilização de uma única espécie de madeira, a influência do vento e temperatura ambiente durante os ensaios assim como comprimento e a quantidade dos termopares tipo K que poderiam possibilitar um maior controle de temperaturas no interior do simulador de incêndio. As dimensões dos corpos de prova foram definidas por norma e não correspondem necessariamente às dimensões reais que podem ser utilizadas na estrutura de uma residência.

Com relação à construção do protótipo utilizado para a simulação das condições de incêndio de baixo risco, acredita-se que o mesmo pode ser utilizado para representar esta situação. As curvas de incêndio apresentadas mostraram que os patamares de temperatura foram bastante semelhantes nos diversos tempos de exposição adotadas, principalmente após os 5 minutos de simulação de incêndio.

A utilização de produtos ignífugos para a madeira na construção civil é de extrema importância e, portanto, deve-se atestar a eficiência dos produtos que estão disponíveis no mercado e que não necessariamente oferecem proteção contra incêndio. Sugere-se para pesquisas futuras verificar a eficiência de mais de um tipo de tintas ignífugas, assim como

aumentar o número de corpos de prova de 6 para 12 por ensaio, mesmo a madeira sendo de uma espécie conhecida, pois a madeira é um material que apresenta muita variabilidade de resistência. Além disso, poderiam ser testados outros tipos de proteção mecânica para retardar as chamas, como por exemplo, a utilização de gesso ou outros materiais com baixa reação ao fogo.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Aplicação da madeira na construção civil**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/111115856/N%C2%BA-24-Aplicacao-da-madeira-na-construcao-civil>>. Acesso em: 12 jul. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações . Rio de Janeiro. 2001.
- LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras – cedrinho**. Não paginado. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/9.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/9.htm)>. Acesso em 9 jul. 2014
- MADY, F. T. M. **Conhecendo a Madeira**. Não paginado. Disponível em: <<http://www.conhecendoamadeira.com/>>. <sup>11</sup>Acesso em: 12 out. 2013.
- OLIVEIRA, K. **Resistência Mecânica da madeira**: estudo da variação mediante ação do fogo. 2012. 59f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1975.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 8. ed. Porto Alegre: Globo, 1987.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**: dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-Americanas NDS e Européias EUROCODE 5. 6. ed. rev., atual. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- PIANCA, J. B. **Manual do construtor**. 9. ed. Porto Alegre: Globo, 1977. v. 1.
- RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. 2009. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009
- SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B. da; CARLO, U. Del; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

---

<sup>11</sup> Estando no site <[www.conhecendoamadeira.com](http://www.conhecendoamadeira.com)>, localize na parte superior da o link ‘Artigo’ após seleccione a opção ‘Mas afinal: o que é madeira’ seleccione em ‘Ler’ para abrir o arquivo.

**APÊNDICE A – Resistência característica e tensão de ruptura dos ensaios  
de compressão paralela às fibras e de flexão**

Tabela 1 – Resistência característica à compressão paralelamente às fibras

Tempo de Exposição das Amostras à Incêndio de Baixo Risco (min)	Resistência Característica das Amostras de Compressão Com Tratamento Ignífugo (MPa)	Resistência Característica das Amostras de Compressão Sem Tratamento Ignífugo (MPa)
0	29,172	29,172
2,5	22,960	25,793
5	22,276	20,156
7,5	19,204	22,076
10	19,932	17,264
12,5	18,572	24,076
15	18,372	20,420
17,5	18,056	14,148
20	11,58	13,268

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 2 – Resistência característica à flexão

Tempo de Exposição das Amostras à Incêndio de Baixo Risco (min)	Resistência Característica das Amostras de Flexão Com Tratamento Ignífugo (MPa)	Resistência Característica das Amostras de Flexão Sem Tratamento Ignífugo (MPa)
0	56,574	56,574
2,5	32,886	21,924
5	22,932	23,688
7,5	21,546	23,688
10	18,522	15,372
12,5	14,742	17,262
15	14,112	11,718
17,5	9,702	10,962
20	6,678	5,544

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 3 – Tensão de ruptura à compressão de amostras sem e com tratamento ignífugo

Sem / Com Tratamento	Tempo (min)	Resistência de Ruptura à Compressão (MPa)
Sem Ignífugo	0	29,0; 38,5; 32,0; 38,0; 29,2; 26,7
	2,5	25,0; 26,2; 40,8; 28,0; 31,2; 24,7
	5	22,8; 34,4; 27,7; 27,1; 20,2; 25,5
	7,5	27,1; 24,9; 28,4; 21,7; 24,7; 23,0
	10	29,7; 16,6; 23,4; 23,0; 24,4; 40,9
	12,5	35,6; 23,7; 25,8; 28,7; 34,8; 27,5
	15	21,2; 20,4; 25,1; 45,2; 30,7; 31,8
	17,5	17,4; 22,4; 20,0; 21,4; 26,1; 14,0
	20	14,2; 15,5; 20,0; 12,4; 14,6; 13,9
	Com Ignífugo	0
2,5		29,7; 29,7; 30,9; 23,7; 23,0; 36,6
5		33,6; 27,4; 30,0; 41,0; 27,4; 20,3
7,5		28,8; 32,0; 19,2; 28,6; 25,8; 29,2
10		23,1; 31,6; 19,5; 28,3; 32,2; 36,1
12,5		28,7; 17,1; 26,1; 29,0; 19,4; 38,9
15		30,4; 37,6; 24,4; 22,5; 18,3; 24,3
17,5		29,2; 33,1; 29,9; 20,7; 14,7; 27,2
20		18,2; 11,4; 11,2; 16,3; 20,8; 21,4

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Tensão de ruptura à flexão de amostras sem e com tratamento ignífugo

Sem / Com Tratamento	Tempo (min)	Resistência de Ruptura à Flexão (MPa)
Sem Ignífugo	0	53,6; 58,1; 60,1; 63,1; 76,1; 86,7
	2,5	21,9; 23,0; 30,9; 32,6; 32,7; 32,8
	5	21,9; 23,0; 30,9; 32,6; 32,7; 32,8
	7,5	23,8; 27,6; 31,3; 33,6; 40,8; 42,1
	10	13,2; 21,1; 21,7; 23,5; 25,0; 27,4
	12,5	13,1; 13,9; 20,6; 21,7; 26,2; 51,7
	15	10,1; 12,0; 15,5; 17,4; 22,4; 23,0
	17,5	5,1; 10,2; 11,8; 12,0; 27,0; 28,3
	20	2,8; 4,4; 7,2; 8,8; 9,1; 15,1
	Com Ignífugo	0
2,5		23,3; 42,3; 42,8; 55,4; 57,8; 60,0
5		21,6; 28,7; 30,1; 33,8; 35,0; 47,6
7,5		12,5; 22,4; 24,9; 35,8; 40,8; 48,7
10		15,0; 18,7; 25,3; 28,0; 29,2; 42,3
12,5		13,7; 14,6; 15,6; 19,2; 21,3; 42,1
15		9,9; 14,6; 17,8; 20,7; 22,7; 35,8
17,5		8,8; 10,3; 13,5; 15,2; 15,7; 19,7
20		5,7; 7,9; 8,5; 10,3; 10,5; 13,9

(fonte: elaborado pelo autor)