

UNESP 

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**Campus Experimental de Itapeva**

DANILO SOARES GALDINO

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESTRUTURA DE  
TELHADO APÓS A OCORRÊNCIA DE UM INCÊNDIO**

**ITAPEVA**  
**JUNHO, 2012**

**DANILO SOARES GALDINO**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESTRUTURA  
DE TELHADO APÓS A OCORRÊNCIA DE UM INCÊNDIO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira do Campus Experimental de Itapeva, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elen Aparecida M. Morales

ITAPEVA  
JUNHO, 2012

Galdino, Danilo Soares.

G149a      Análise das propriedades da madeira de estrutura de telhado após a ocorrência de um incêndio / Danilo Soares Galdino. -- Itapeva, SP, 2012  
73 f.; il.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Madeireira)  
- Universidade Estadual Paulista, Câmpus Experimental de Itapeva, 2012

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elen Aparecida Martines Morales  
Banca examinadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maristela Gava; Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros  
Inclui bibliografia

1. Madeira -- Propriedades mecânicas. 2. Madeira -- Estruturas. 3. Carbonização. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 620.11217



**UNESP** **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**Campus Experimental de Itapeva**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**Título: “ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESTRUTURA DE  
TELHADO APÓS A OCORRÊNCIA DE UM INCÊNDIO”**

**Aluno: DANILO SOARES GALDINO**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ELEN APARECIDA MARTINES MORALES**

**Aprovado pela Comissão Examinadora:**

**Prof. Dra. Elen Aparecida Martines Morales**  
**Orientadora – UNESP/CEI**

**Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros**  
**UNESP/CEI**

**Prof. Dra. Maristela Gava**  
**UNESP/CEI**

Data da realização: 25 de junho de 2012.

*À minha família pelo carinho e compreensão,  
aos amigos pela força e, principalmente, à  
presença de Deus em todos os momentos...*

## **AGRADEC**

Agradeço a Deus por...  
iluminar meu caminho e me dar

## **IMENTOS**

Agradeço a Deus por...  
forças para seguir em frente.

À professora Dr<sup>a</sup> Elen Aparecida M. Morales pela oportunidade fornecida, pela prova de confiança, amizade e orientação desse trabalho.

Aos professores Dr. Ricardo Barreiros, professora Dra. Maristela Gava e Prof.<sup>a</sup> Dra. Edna Moura Pinto pela colaboração aos trabalhos.

Ao funcionário Brito do Lab. de Prop. dos Materiais pela atenção.

A todos colegas, professores e funcionários da Unesp que me acolheram e contribuíram para minha formação.

Aos meus pais, por todos os ensinamentos.

À minha esposa, pelo companheirismo e compreensão e à minha filhinha

Lohane, por ter dado  
um novo sentido  
à minha  
vida.

## RESUMO

Neste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas de peças de madeira oriundas da estrutura do telhado de uma residência submetida a incêndio na zona rural do município de Itapeva/SP. A referida estrutura foi construída há 25 anos utilizando caibros de madeira da espécie Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*), de onde foram retirados os corpos de prova. A metodologia incluiu a avaliação qualitativa das amostras, estimativa da camada de carbonização e pirólise dessas madeiras, medição da densidade e os ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e cisalhamento. As propriedades mecânicas da madeira foram correlacionadas analiticamente com as camadas resultantes da carbonização que são influenciadas pela temperatura e tempo de incêndio, valores estes estimados em 1000 °C e duas horas para o caso em questão. Os resultados indicam que as propriedades de resistência da madeira degradada diferem da madeira sã. O nível da termodegradação, de maneira geral, pode ser aferido pela densidade, consequência da perda de massa resultante da decomposição dos componentes da madeira.

Palavras-chave: Carbonização, estrutura de madeira, degradação térmica, propriedades mecânicas, segurança.

## ABSTRACT

The present study evaluated the mechanical properties of pieces of wood coming from the roof structure of a residence subject fire in the rural area of Itapeva/SP. The structure was built 25 years ago using wooden beams of the species Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*), where the specimens were removed. The research methodology included qualitative evaluation of the samples, estimating the layer pyrolysis and carbonization of the wood, measuring of density and mechanical tests of compression parallel to grain, tension parallel to grain and shear. The mechanical properties of wood were analytically correlated with the layers carbonization and pyrolysis that are influenced by the temperature and time of fire; these values were estimated at 1000 °C and two hours for the case in question. The results indicate that the strength properties of degraded wood are different from a healthy wood. The level of thermodegradation, in general, can be measured by density, result in weight loss due to decomposition of the wooden components.

Keywords: Carbonization, structure of wood, thermal degradation, mechanical properties, security.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da celulose.....	19
Figura 2 - Forma de transferência de calor perpendicular a grã da madeira.....	21
Figura 3 - Imagem esquemática da pirólise e combustão da madeira.....	22
Figura 4 – Os dois principais caminhos da degradação térmica da madeira.....	23
Figura 5 - Divisão de moléculas de celulose na reação de formação do carvão. ....	23
Figura 6 – Divisão de moléculas de celulose na reação de formação de alcatrão.....	24
Figura 7 - Estrutura de um telhado após um incêndio.....	26
Figura 8 - Pilar roliço em situação de incêndio real.....	26
Figura 9 - Padrão de queima observado em pilares.....	27
Figura 10 – Degradação térmica da Madeira. ....	28
Figura 11 - Seção Carbonizada de Madeira .....	30
Figura 12 - Perda de massa dos componentes individuais da madeira. ....	31
Figura 13 - Compressão paralela às fibras relativa .....	35
Figura 14 - Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão.....	37
Figura 15 - Curva tempo x temperatura fornecida pela ISO 834/75.....	39
Figura 16 - Curva tempo x temperatura fornecida pela ASTM E119.....	39
Figura 17 - Estrutura de aço e madeira após incêndio .....	41
Figura 18 – Seção de uma viga exposta a curva padronizada. ....	42
Figura 19 - Desenho esquemático da estrutura de um telhado.....	46
Figura 20 - Casa de onde faziam parte as amostras .....	46
Figura 21 - Guarucaia ( <i>Peltophorum vogelianum</i> ).....	47
Figura 22 - Esquema de corte dos corpos de prova.....	48
Figura 23 – Processo de identificação dos corpos de prova.....	49
Figura 24 - Amostra 1.....	50
Figura 25 - Amostra 2.....	50
Figura 26 - Amostra 3.....	51

Figura 27 - Amostra 4.....	51
Figura 28 - Amostra 5.....	52
Figura 29 - Amostras prontas para serem seccionadas.....	53
Figura 30 - Diferentes perfis de corpo de prova gerado.....	54
Figura 31 - Corpos de prova das amostras I, II, III e IV. ....	54
Figura 32 - Corpos de prova da amostra V.....	54
Figura 33 - Estimativa de seção residual nos corpos de prova.....	56
Figura 34 - Valores de $f_{c0}$ ao longo de cada amostra.....	63
Figura 35 – Análise estatística de $f_{c0}$ médio ao longo das amostras.....	63
Figura 36 – Correlação entre $f_{c0}$ e densidade. ....	64
Figura 37 – Correlação entre $f_{c0}$ e porcentagem de carvão. ....	64
Figura 38 – Correlação entre $f_{c0}$ e porcentagem de pirólise. ....	65
Figura 39 - Correlação $E_{c0}$ e porcentagem de pirólise.....	66
Figura 40 – Correlação entre $f_v$ e densidade.....	66
Figura 41 – Comparativo dos valores obtidos nos ensaios e a NBR 7190/97. ....	67
Figura 42 - Detalhe do corpo de prova 2S1.....	67
Figura 43 - Correlação entre $f_v$ e porcentagem de carvão. ....	68
Figura 44 – Correlação entre $f_v$ e porcentagem de pirólise ....	68
Figura 45 - Amostra 5 (densidade e $f_{t0}$ ).....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensão das peças antes e depois de usinadas. ....	53
Tabela 2 - Características dos corpos de prova de compressão. ....	57
Tabela 3 - Características dos corpos de prova de cisalhamento. ....	58
Tabela 4 - Características dos corpos de prova de tração.....	58
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de $\rho_{ap(12\%)}$ , $f_{C0}$ , $E_{C0}$ e $f_V$ da Amostra 1.....	60
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de $\rho_{ap(12\%)}$ , $f_{C0}$ , $E_{C0}$ e $f_V$ da Amostra 2. ....	60
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de $\rho_{ap(12\%)}$ , $f_{C0}$ , $E_{C0}$ e $f_V$ da Amostra 3.....	60
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de $\rho_{ap(12\%)}$ , $f_{C0}$ , $E_{C0}$ e $f_V$ da Amostra 4. ....	61
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de $\rho_{ap(12\%)}$ , $f_{C0}$ , $E_{C0}$ , $f_V$ , $f_{t0}$ e $E_{t0}$ da Amostra 5. ....	61
Tabela 10 - Comparativo resultados obtidos e valores médios usais fornecidos pela NBR 7190 (1997) .....	61
Tabela 11 - Variação dos resultados obtidos por amostra em relação ao valor médio usual apontado na NBR 7190 (1997). ....	62

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA .....	17
2.1.1 Celulose.....	18
2.1.2 Hemiceluloses (polioses) .....	19
2.1.3 Lignina .....	19
2.1.4 Extrativos .....	20
2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CALOR NA MADEIRA .....	20
2.3 COMBUSTÃO DA MADEIRA .....	21
2.3.1 Inflamabilidade da madeira.....	24
2.3.2 Degradação Térmica da Madeira .....	27
2.3.3 Fases da degradação.....	28
2.4 CONSEQUÊNCIAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA .....	31
2.4.1 Influência sobre os polímeros .....	31
2.4.1.1 Celulose .....	32
2.4.1.2 Hemiceluloses.....	33
2.4.1.3 Lignina.....	33
2.4.2 Influência sobre as propriedades mecânicas .....	33
2.5 ESTUDO BÁSICO DOS INCÊNDIOS.....	35
2.5.1 Curvas tempo x temperatura .....	37
2.5.1.1 ISO 834 (1975) .....	38
2.5.1.2 ASTM E 119 (1918).....	39
2.6 ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	40

2.6.1 A redução de propriedades na seção remanescente .....	41
2.6.2 Efeito de arredondamento .....	42
2.6.3 Expressão da taxa de carbonização por modelo matemático .....	43
2.6.4 Norma brasileira .....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>45</b>
3.1 LOCAL E ORIGEM DAS AMOSTRAS .....	45
3.2 IDENTIFICAÇÃO BOTÂNICA .....	47
3.3 ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA .....	48
3.4 DETALHAMENTOS DAS AMOSTRAS.....	50
3.4.1 Amostra 1 .....	50
3.4.2 Amostra 2 .....	50
3.4.3 Amostra 3 .....	51
3.4.4 Amostra 4 .....	51
3.4.5 Amostra 5 .....	52
3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	52
3.6 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA.....	53
3.7 MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	55
3.8 DIMENSÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	55
3.9 ESTIMATIVA DA SEÇÃO RESIDUAL.....	56
3.10 TABULAÇÃO DOS DADOS .....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As características do comportamento dos materiais construtivos frente ao fogo podem desempenhar papel preponderante na evolução de um eventual incêndio, dificultando ou contribuindo para que um estágio crítico seja alcançado.

Tais características dizem respeito à facilidade com que os materiais sofrem ignição, à capacidade de sustentar a combustão, à rapidez com que as chamas se propagam pelas superfícies, a quantidade e taxa de desenvolvimento de calor liberados no processo de combustão, ao desprendimento de partículas em chamas/brasa e ao desenvolvimento de fumaça e gases nocivos.

Nenhum material usado na construção é totalmente seguro à ação do fogo. A finalidade dos estudos sobre incêndios em estruturas é minimizar o risco à vida e a perda patrimonial. O risco à vida surge devido à exposição à fumaça, calor e desabamento de elementos construtivos sobre usuários e equipes de combate ao fogo. A perda patrimonial se refere à destruição parcial ou total da edificação e de todos os pertences nele contidos.

O incêndio em edificações em alvenaria apresenta-se rápido, porém restrito a um compartimento, haja vista a delimitação do calor e das chamas pelo teto e pelas paredes. Os pontos atingidos somente pela fumaça apresentarão bastante fuligem, geralmente nas paredes na parte superior e teto.

Já nas edificações típicas de favelas, constituídas normalmente de telhado de fibrocimento e paredes de madeira e seus derivados, material de fácil combustão, é comum o abastecimento irregular de energia elétrica (gatos) ou uso cotidiano de velas, o que aumenta o risco de um sinistro.

A queima apresenta-se extremamente agressiva, atingindo altas temperaturas em um espaço de tempo reduzido, conseqüentemente, os vestígios para a investigação do incêndio são drasticamente reduzidos ou comprometidos face ao alto grau de destruição da edificação.

As causas mais comuns de ocorrência de incêndio, tanto em edificações em alvenaria como em madeira, tem origem na ação pessoal que, por sua vez, pode ter origem acidental ou intencional. A ação pessoal acidental é toda origem de incêndio decorrente de ação humana sem intenção de causar dano. Por exemplo, velas esquecidas acesas, cigarros mal apagados.

Também conhecido como incêndio criminoso, a ação pessoal intencional envolve a intenção de causar o incêndio. Em geral, são caracterizados pela presença de múltiplos focos iniciais, comportamento de queima anômalo ou a presença de agentes aceleradores como gasolina, álcool, querosene, entre outros.

Enfim, a investigação de incêndio, especificamente o comportamento dos materiais sob ação do fogo, é um assunto muito amplo e exige estudo aprofundado. Antes de começar a averiguar um incêndio, o investigador precisa ter grandes conhecimentos sobre o comportamento do fogo, uma ciência complexa que envolve conhecimentos de física, química, engenharia, etc.

O presente trabalho não pretende, e nem é capaz, de esgotar o conteúdo, mas pretende mostrar que a investigação desse tipo de ocorrência revela toda sua importância, em especial, no fornecimento de informações que contribuam a prever o comportamento termomecânico de estruturas de madeira em situação de incêndio.

Nesse contexto, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o comportamento da madeira a temperaturas elevadas, abordando assuntos relativos à degradação térmica, à taxa de carbonização e à influência dessa temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira.

## 1.1 OBJETIVOS

### **1.1.1 Objetivo geral**

Realizar um estudo de caso sobre algumas propriedades mecânicas de madeira proveniente de estrutura de telhado de uma edificação de Itapeva/SP após a ocorrência de um incêndio real.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Estudar a variação dos valores de propriedades mecânicas em peças de madeira pós-incêndio de acordo com seu nível de termodegradação;
- Fornecer ao perito criminal ou investigador elementos técnico-científicos que possam contribuir a firmar sua convicção a respeito de determinadas cenas de crime como tempo aproximado, intensidade e foco do incêndio;
- Contribuir com informações que possam auxiliar a prever o comportamento termomecânico de estruturas de madeira em situação de incêndio com vistas a melhoria na segurança de estruturas pós-incêndio.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A composição química da madeira é constituída principalmente por dois tipos de compostos: os componentes estruturais e os componentes não estruturais. Nos componentes estruturais incluem-se a celulose, as hemiceluloses e a lignina, que são macromoléculas responsáveis pelas propriedades mecânicas da madeira.

Os componentes não estruturais são constituídos por substâncias com massa molecular baixa ou média, do tipo orgânico ou inorgânico, vulgarmente denominados por extrativos e cinzas.

A composição química da madeira (Quadro 1) oscila percentualmente entre 40 a 47% de celulose, 25 a 35% de hemiceluloses e 15 a 30% de lignina. Quimicamente, a madeira pode conter outros constituintes como extrativos numa percentagem que varia entre 0 e 8% (KLOCK *et al*, 2005).

Quadro 1 - Composição química da madeira

<b>Constituinte</b>	<b>Folhosas</b>	<b>Coníferas</b>
Celulose	45 ± 2%	42 ± 2%
Hemiceluloses	30 ± 5%	27 ± 2%
Lignina	20 ± 4%	28 ± 2%
Extrativos	3 ± 2%	5 ± 3%

Fonte: Klock *et al* (2005)

A substância química mais abundante numa árvore viva é a água, mas na madeira em base seca, toda sua parede celular é formada por polímeros de açúcares que são combinados com a lignina (ROWELL *et al*, 2005). As proporções e composição química da lignina e hemiceluloses diferem em coníferas e folhosas, enquanto que a celulose é um componente uniforme da madeira (KLOCK *et al*, 2005).

A combinação de celulose e de hemiceluloses é chamada holocelulose, que compreende em torno de 65 – 70% da madeira seca. Estes polímeros são ricos em grupos hidroxila responsáveis pela adsorção da umidade (ROWELL *et al*, 2005).

Em relação à composição química elementar da madeira, pode-se afirmar que não há diferenças consideráveis, levando-se em conta as madeiras de diversas espécies. A análise da composição química elementar da madeira de diversas espécies, coníferas e folhosas, é demonstrada no Quadro 2, em relação ao peso seco. Além destes elementos citados encontram-se pequenas quantidades de Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e outros, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira. (KLOCK *et al*, 2005):

Quadro 2 - Composição química elementar da madeira

<b>Elemento</b>	<b>Percentagem</b>
C	49 - 50
H	6
O	44 - 45
N	0,1 - 1

Fonte: Klock *et al* (2005)

### 2.1.1 Celulose

A celulose é o polissacarídeo mais abundante da natureza e a molécula orgânica mais abundante da face da terra (ROWELL *et al*, 2005). Trata-se de um polímero de alto peso molecular (300.000 a 500.000 g/mol) de repetição linear formada por um único tipo de unidade de açúcar (Figura 1). Em termos simples, é o principal elemento estrutural e os principais constituintes da parede celular de plantas e árvores (KLOCK *et al*, 2005).

As cadeias de celulose nas paredes celulares das plantas são arranjadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas, devido ao elevado número de ligações de hidrogênio que resulta na forte interação entre suas moléculas, embora medidas de raios-X indicam que, a cada 600 Å de celulose cristalina, a estrutura apresenta regiões amorfas (ROWELL *et al*, 2005).

A Figura 1 mostra uma estrutura parcial da celulose. Sua fórmula empírica é  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

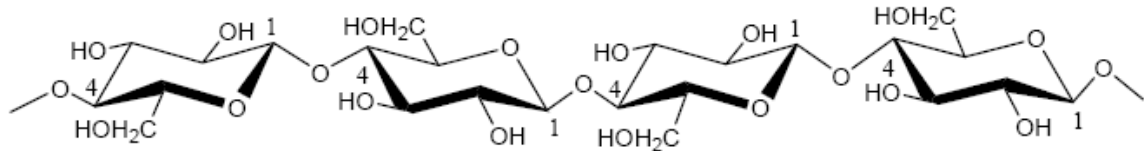


Figura 1 - Estrutura da celulose

### 2.1.2 Hemiceluloses (polioses)

Componente da madeira que, como a celulose, é um polissacarídeo, porém menos complexo e facilmente hidrolisável. Difere da celulose por ser constituída por vários tipos de unidades de açúcares, além de ser ramificada e essencialmente amorfa. As hemiceluloses têm menor grau de polimerização, com peso molecular entre 25.000 e 35.000 g/mol (KLOCK *et al*, 2005).

Cinco açúcares neutros, as hexoses: glucoses, manose e galactose; e as pentoses: xilose e arabinose são as principais constituintes das polioses. Esses polissacarídeos estão associados com a celulose na parede celular e são constituídos por cadeias poliméricas menores que as da celulose, embora exerçam função estrutural análoga (FIGUEROA; MORAES, 2009).

### 2.1.3 Lignina

As ligninas possuem cor marrom e são moléculas amorfas, altamente complexas, cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano, que é considerada uma substância incrustante. Estão sempre associadas com as hemiceluloses,

não só através da interação física como também de ligações covalentes (ROWELL *et al*, 2005).

Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando o tecido da madeira, dando-lhe rigidez e resistência (KLOCK *et al*, 2005).

#### **2.1.4 Extrativos**

Além dos polímeros citados, a madeira é impregnada por outros de baixo peso molecular, presentes em menor quantidade, conhecidos genericamente como extrativos. Essas substâncias são responsáveis por inúmeras características da madeira, embora sua atuação não esteja ainda bem determinada. Nas coníferas, predominam, em diferentes composições, as terebintinas, que são voláteis, e o breu, não volátil. Nas folhosas, a variedade de extrativos é bem maior, englobando compostos fenólicos, aromáticos, taninos, compostos nitrogenados e inúmeros carboidratos (ROWELL *et al*, 2005).

## **2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CALOR NA MADEIRA**

Há três mecanismos essenciais de transporte do calor: a radiação, a convecção e a condução, sendo os dois últimos mecanismos de maior eficiência na transferência de calor na madeira (PINTO, 2005). A Figura 2 ilustra os mecanismos de transferência de calor na madeira.

A transmissão de calor por condução é característica do transporte através dos sólidos, sendo que a madeira é má condutora de calor devido à sua estrutura celular com numerosas massas de ar aprisionadas e sua constituição por membranas celulósicas (MADY, 2008).

A composição dos elementos estruturais da madeira, de baixa condutividade térmica, resulta em um aquecimento lento, de forma ainda que próximo à superfície da

madeira, a temperatura tende a se equilibrar a do ambiente externo, enquanto no interior da seção as propriedades isolantes da madeira colaboram para que o processo da degradação seja mais lento (PINTO, 2005).

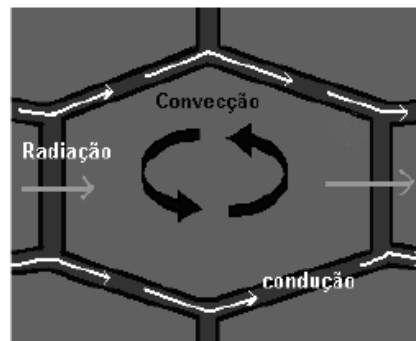


Figura 2 - Forma de transferência de calor perpendicular a grã da madeira.  
Fonte: Pinto (2005)

A condutividade térmica para qualquer espécie depende do peso específico e do teor de umidade contido na peça de madeira. Quanto mais alto o peso específico e a umidade, maior será a capacidade da madeira em conduzir calor. Madeiras secas apresentam melhor desempenho como isolante. A propagação do calor na madeira é maior no sentido paralelo às fibras e menor no sentido perpendicular (MADY, 2008).

### 2.3 COMBUSTÃO DA MADEIRA

O processo de combustão envolve diversas reações químicas que liberam energia na forma de calor e luz. As principais reações desse processo ocorrem entre os componentes do combustível e o ar atmosférico.

Em condições normais, a combustão da madeira é baseada na pirólise (decomposição térmica) da celulose e as reações dos produtos da pirólise com os gases no ar, principalmente do oxigênio, que após a ignição irá formar a chama na superfície, dando início a uma reação em cadeia ilustrada na Figura 3 (PINTO, 2001).

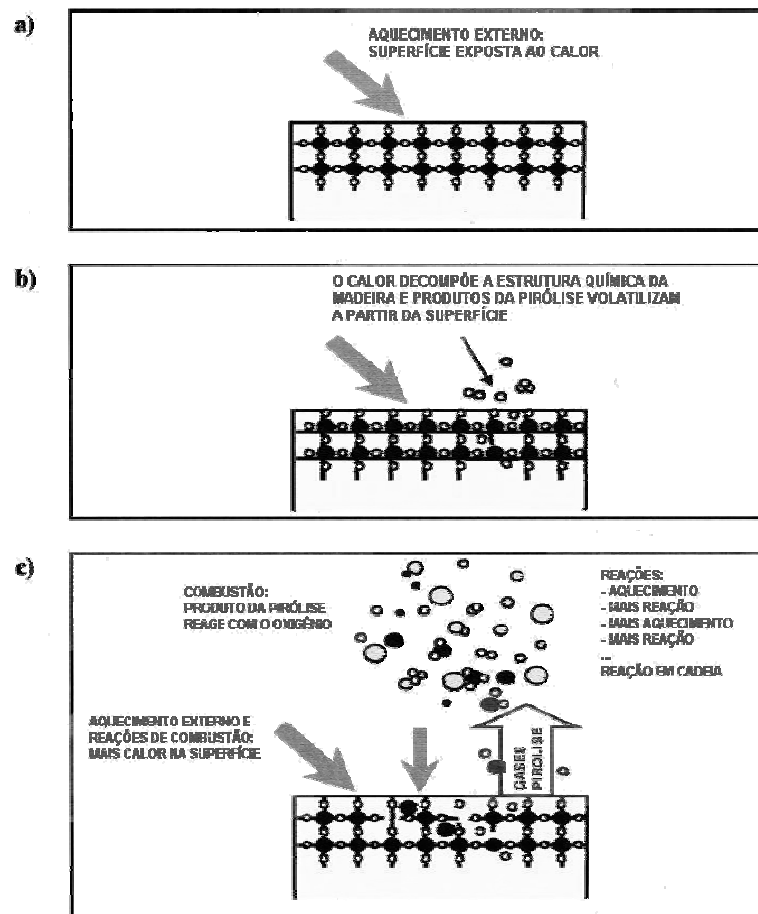


Figura 3 - Imagem esquemática da pirólise e combustão da madeira  
 Fonte: Adaptado de Östman *et al* (2005)

Fase: a) O aquecimento externo aumenta a temperatura da madeira. b) A pirólise começa e a estrutura química da madeira é decomposta. Produtos mais leves da pirólise volatilizam a partir da superfície. c) A combustão é iniciada. Produtos da pirólise reagem com o oxigênio e produzem mais calor, causando uma reação em cadeia em franco crescimento.

Desse modo, para que ocorra o fogo é necessária a presença simultânea dos seguintes elementos: o calor (faísca, chama, radiação térmica), o combustível (ex. madeira) e o comburente, que tornam a combustão da madeira uma complexa série de transformações físicas e químicas (PINTO, 2001).

Durante o aquecimento da madeira, 85% de materiais voláteis são produzidos e liberados, tais como álcoois, resinas e terpenos. São eles que participam na reação em cadeia durante o processo de combustão da madeira (ÖSTMAN *et al*, 2005; FIGUEROA; MORAES, 2009; PINTO, 2001).

Dependendo das condições ambientais envolvidas, como temperatura, concentração de oxigênio, umidade, pH, entre outros, a combustão é conduzida à queima normal da madeira ou à formação do carvão (ÖSTMAN *et al*, 2005). As duas reações concorrentes ocorrem simultaneamente e são representados pela Figura 4.

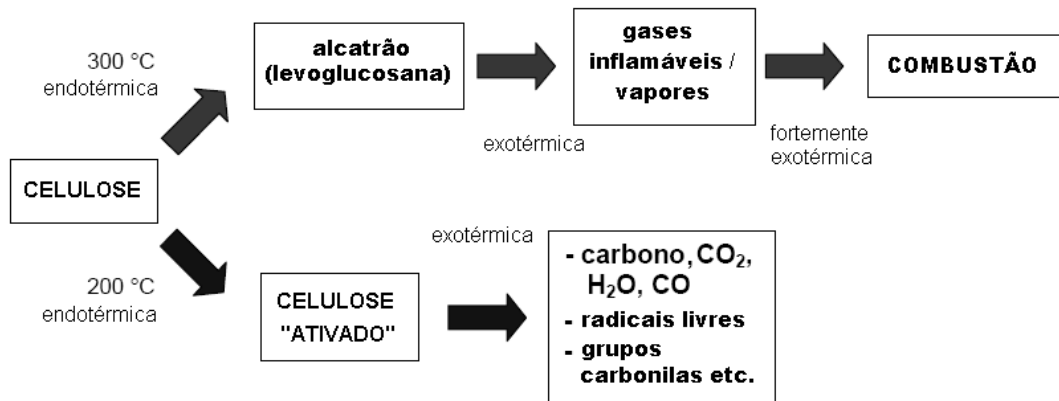


Figura 4 – Os dois principais caminhos da degradação térmica da madeira.  
Fonte: Adaptado de Östman *et al* (2005)

Na carbonização, primeiro a celulose é transformada em “celulose ativa” que se decompõe, formando em sua essência dióxido de carbono, água e cadeias de carbono menores (ÖSTMAN *et al*, 2005). A formação do carvão ocorre quando a reação não tem o aporte suficiente de oxigênio, ou o aporte é controlado (FIGUEROA; MORAES, 2009). A Figura 5 mostra como ocorre a formação das cadeias de carbono menores residuais.

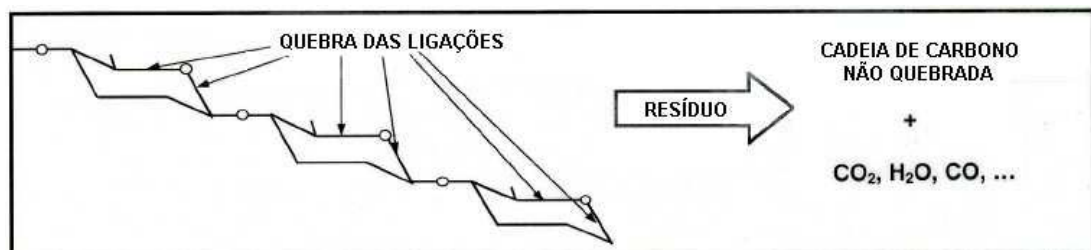


Figura 5 - Divisão de moléculas de celulose na reação de formação do carvão.  
Fonte: Adaptado de Östman *et al* (2005)

Para a queima “normal” da madeira, relata Pinto (2005), que existe uma estreita relação entre a formação de chamas e a produção de alcatrões, de modo que a proporção de gases, vapores, alcatrões e a proporção de não inflamáveis e inflamáveis produzidos na pirólise varia em função da temperatura, pressão, tempo e dimensão da peça que sofre combustão.

Para Östman *et al* (2005), a temperatura que leva à queima “normal” da madeira e a formação do alcatrão está situada em torno dos 300° C quando a pirólise produz uma grande quantidade de alcatrão, incluindo o composto levoglucosana, que se decompõe facilmente em gases da queima sob influência do calor (Figura 6).

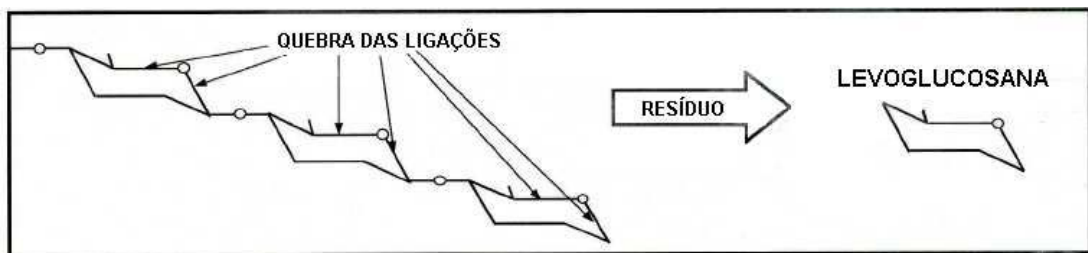


Figura 6 – Divisão de moléculas de celulose na reação de formação de alcatrão  
Fonte: Adaptado de Östman *et al* (2005)

### 2.3.1 Inflamabilidade da madeira

Inflamabilidade é definida como a facilidade com que algo queima ou entra em ignição, causando fogo ou combustão. Como visto anteriormente, para que a madeira possa inflamar, sua temperatura deve ser alta o suficiente para que a reação química da pirólise ocorra e dê início à combustão. Portanto, a ignição de um produto de madeira é dependente da forma de aquecimento, das propriedades térmicas do material e da maneira de ataque de calor sobre o mesmo.

Produtos de madeira não têm uma temperatura de ignição explícita, mas um intervalo de temperatura onde a probabilidade de ignição se torna maior. A temperatura



para a ignição de madeira está na faixa dos 300 - 350 °C <sup>1</sup>. Já a temperatura mínima em que a madeira começa a desprender seus gases para combustão é de aproximadamente 150 °C <sup>2</sup> (ÖSTMAN *et al*, 2005).

Para Östman *et al* (2005), os fatores que afetam a ignição da madeira são em geral bem conhecidos: madeira seca, pedaço de madeira fina e espécies de madeira menos densas queimam mais rapidamente do que as inversas.

A razão de madeira seca queimar mais rapidamente do que madeira úmida está relacionada ao teor de umidade que tem um efeito sobre a ignição principalmente como um dissipador de calor. O alto conteúdo de umidade dificulta o processo de combustão porque o vapor resultante baixa a temperatura da área de combustão (a madeira se resfria pois cede energia para a evaporação da água) e reduz a quantidade de oxigênio (os espaços vazios são ocupados com vapor d'água) (PINTO, 2001).

A ignição de produtos de madeira possui também dependência com a dimensão e forma da seção transversal das peças. Peças de seção retangular carbonizam mais rapidamente do que peças de seção circular, visto que existe maior área de exposição ao calor nas arestas do material (PINTO, 2005).

Para peças pequenas a taxa de carbonização é maior, isto é, peça fina de madeira pega fogo mais rapidamente do que uma peça de espessura maior (FIGUEROA; MORAES, 2009; ÖSTMAN *et al*, 2005).

A Figura 7 apresenta a estrutura de um telhado depois de um incêndio. Nela observa-se que as peças de seção menores (ripas) foram totalmente consumidas pelo fogo, enquanto as peças de seção maiores (caibros, terças e vigas) pouco foram afetadas pela ação do fogo.

---

<sup>1</sup> Chamado de **ponto de combustão** - temperatura mínima necessária para que um combustível desprenda vapores ou gases combustíveis que, combinados com oxigênio do ar e em contato com uma chama ou centelha (agente ígneo) externa, se inflamam;

<sup>2</sup> Chamado de **ponto de fulgor** ou **ponto de inflamação** - é a menor temperatura na qual um combustível libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável por uma fonte externa de calor.



Figura 7 - Estrutura de um telhado após um incêndio.  
Fonte: Próprio Autor (2008)

Quando um produto de pequenas dimensões é exposto ao calor de um lado, o seu lado oposto aquece muito perto da temperatura do lado exposto. No caso de um produto de espessura maior, o lado oposto não aquece, mas permanece à temperatura ambiente quando a peça se inflama (ÖSTMAN *et al*, 2005). A Figura 8 ilustra a proposição feita pelo autor em que é apresentado um pilar roliço em situação de incêndio real onde apenas a região exposta ao calor sofreu a carbonização, enquanto sua face oposta permaneceu com sua estrutura inalterada.



Figura 8 - Pilar roliço em situação de incêndio real.  
Fonte: Próprio Autor (2009)

Há ainda os fatores externos que influenciam a ignição, que são as intensidades de exposição do calor e sua forma efetiva (por exemplo, a distância de chamas a partir da superfície), de forma que o elemento madeira quanto mais perto da fonte de calor, mais será degradado pelo fogo (ÖSTMAN *et al*, 2005).

A Figura 9 mostra um padrão de queima de pilares de madeira em uma situação de incêndio real, onde se observa que a região de maior atuação do fogo têm os pilares mais danificados.



Figura 9 - Padrão de queima observado em pilares.  
Fonte: Próprio Autor (2009)

### 2.3.2 Degradação Térmica da Madeira

Como apresentado em figuras anteriores, quando a madeira é exposta a temperaturas elevadas, mudanças físico-químicas ocorrem em sua estrutura afetando o seu desempenho.

A alteração na estrutura química pode ser manifestada de maneira discreta com a simples perda de água higroscópica e de óleos voláteis, como também podem ocorrer modificações químicas mais drásticas caracterizadas pela redução de seu peso,

consequência da perda de carboidratos (LEVAN, 1989). Essa perda que se acentua a partir de temperaturas próximas de 300°C está relacionada à temperatura de carbonização da madeira, ou seja, aquela na qual a madeira é convertida totalmente em carvão (PINTO e CALIL JR., 2010).

Quando exposta a temperaturas elevadas, a madeira maciça é convertida em gases pela quebra das ligações carbono-carbono, carbono-oxigênio e carbono hidrogênio. A extensão dessas mudanças em sua estrutura depende do nível de temperatura e o período de exposição (PINTO, 2001).

A degradação térmica em geral não é considerada quando a madeira está submetida a temperaturas abaixo 100° C. Abaixo desta faixa de temperatura não ocorre nenhuma perda significativa de carboidratos, de modo que a degradação térmica é então considerada somente acima dos 100° C (LEVAN, 1989).

### 2.3.3 Fases da degradação

Pinto (2001) divide as fases da degradação térmica (Figura 10) como: pirólise lenta (II), pirólise rápida (entre II e III), combustão flamejante (III) e combustão incandescente (IV), restando como resíduo da combustão incompleta da madeira a fumaça (V).

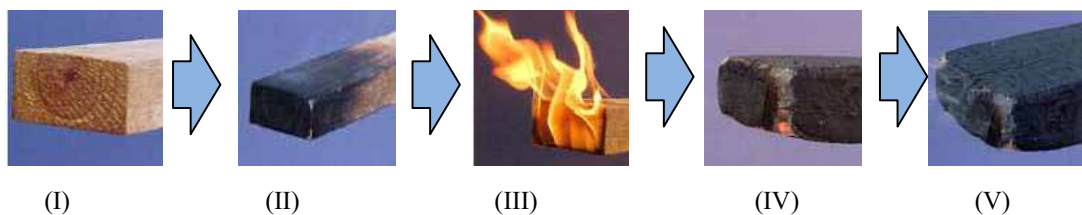


Figura 10 – Degradação térmica da Madeira.  
Fonte: Adaptado de Pinto (2001)

#### 2.3.3.1 Pirólise lenta

Nesta fase a madeira não se igniza. Quando a madeira é aquecida, o primeiro efeito é endotérmico, ou seja, ocorre o ganho da energia com desprendimento de água absorvida

por higroscopicidade. Nesta fase não há geração de gases inflamáveis, sendo que a madeira libera apenas resquícios de compostos orgânicos e dióxido de carbono, ocasião em que as substâncias constituintes da madeira são transformadas em compostos de reduzido peso molecular. Este processo continua mesmo com temperaturas acima de 200° C (PINTO, 2001).

#### 2.3.3.2 Pirólise rápida

A pirólise rápida ocorre em temperaturas que variam dentro do intervalo de 260°C a 360°C, com a formação de monóxido de carbono, metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrogênio, além de alcatrões altamente inflamáveis. Esta fase pode ser considerada como a fase onde acontece a ignição da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2009).

O resíduo da pirólise rápida completa da madeira é o carvão vegetal. A pirólise rápida tende a produzir menor quantidade de carvão e maior volume de gases e alcatrões do que a pirólise lenta, a qual tende a produzir mais carvão e um pequeno volume de gases inflamáveis (SCHAFFER, 1966 *apud* PINTO, 2001).

#### 2.3.3.3 Combustão flamejante

Ocorre quando os gases inflamáveis e alcatrões liberados durante a pirólise rápida reagem com o oxigênio. O calor gerado pela combustão é adicionado ao processo global de degradação térmica, aumentando significativamente a pirólise.

A combustão flamejante ocorre geralmente a uma certa distância da superfície da madeira. A camada de carvão vegetal age como isolante para as camadas subjacentes evitando as temperaturas de pirólise exotérmica (PINTO, 2001). A Figura 11 ilustra o gradiente de temperatura que se forma e sua consequência na estrutura da madeira.

#### 2.3.3.4 Combustão incandescente

É caracterizada pela ausência de chamas e ocorre quando o carvão sólido residual é aquecido até a emissão de luminosidade. A combustão incandescente é auto-sustentada e continuará até que o carvão seja completamente consumido.

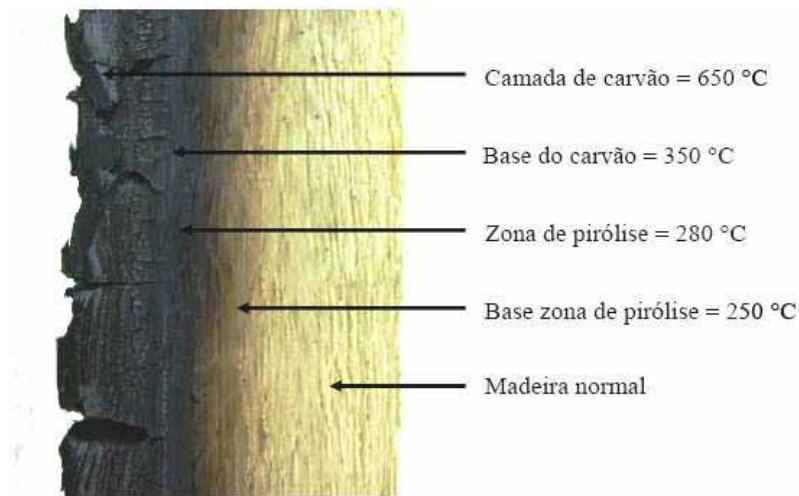


Figura 11 - Seção Carbonizada de Madeira  
 Fonte: Figueroa e Moraes (2009)

### 2.3.4 Carbonização

A taxa, ou velocidade na qual a madeira se converte em carvão é o fator mais importante de análise em condições de incêndio em habitações. A falha de elementos estruturais de madeira e de seus derivados ocorre, principalmente, pela redução da seção transversal resistente durante a exposição ao incêndio. Essa redução pode ser estimada em modelos empíricos formulados a partir de dados experimentais ou por modelos teóricos baseados em princípios físicos e químicos. Pode ser expressa pela perda de massa (g/s) ou pelo avanço da carbonização (mm/min) (PINTO, 2005).

A maioria dessas propriedades está relacionada a fatores intrínsecos à madeira, como a densidade, teor de umidade, orientação da grã, composição química, permeabilidade, condutividade térmica e a fatores extrínsecos como as temperaturas de exposição ao fogo, duração da exposição e a ventilação no ambiente (WHITE; NORDHEIM, 1992). Modelos lineares e unidimensionais de carbonização são bastante difundidos junto à normalização internacional.

## 2.4 CONSEQUÊNCIAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA

A degradação térmica da madeira pode ser representada como a soma das reações de degradação da celulose, hemiceluloses e lignina que, por sua vez, acarreta em algumas mudanças na constituição da madeira.

### 2.4.1 Influência sobre os polímeros

Para Levan (1989), a influência dos componentes individuais da madeira nas reações de degradação térmica pode ser visto traçando-se a perda de peso percentual de cada substância em função da temperatura (Figura 12).

Os polímeros da madeira apresentam estabilidade térmica diferenciada em função da rede cristalina de cada um. Até 600 °C, a perda de massa alcança mais de 80%, 95% e 60% para a celulose, a hemicelulose e a lignina respectivamente (FIGUEROA; MORAES, 2009).

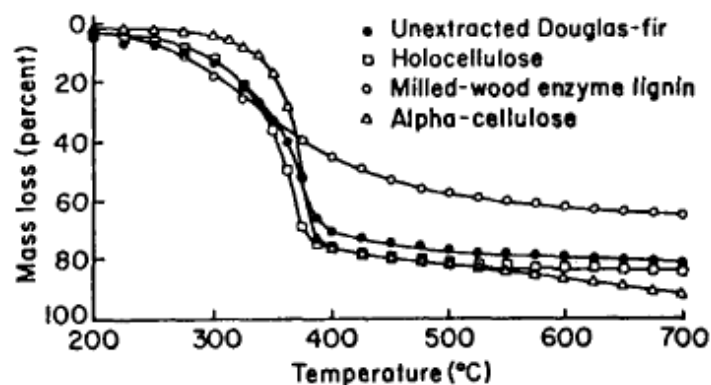


Figura 12 - Perda de massa dos componentes individuais da madeira.  
Fonte: Figueroa e Moraes (2009)

O Quadro 3, mostrado a seguir, foi sintetizado por Schaffer (1973) *apud* Figueroa e Moraes (2009) e aponta as variações físico-químicas mais significativas na madeira submetida à ação do calor:

Quadro 3 - Alterações provocadas termicamente na madeira

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Alterações na madeira</b>
55	A estrutura da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retração transversal da madeira.
110	A lignina lentamente começa a perder peso.
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir e a celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é liberada.
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar.
180	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4%. A lignina da membrana de pontuação escoa.
200	A madeira começa a perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada
280	A lignina atinge 10% da perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira.
300	O cerne amolece irrecuperavelmente.
320	A hemicelulose é completamente degradada.
370	A celulose apresenta perda de 83% de seu peso inicial.
400	A madeira é completamente carbonizada.

Fonte: Schaffer (1973) *apud* Figueroa e Moraes (2009)

#### 2.4.1.1 Celulose

Segundo estudos feitos por Levan (1989), a degradação da madeira se assemelha mais ao padrão da alfa-celulose e holoceluloses do que o padrão de degradação da lignina, uma vez que a celulose e holocelulose compõe 50% e 75% de madeira, respectivamente.

A perda de massa proveniente da degradação térmica da celulose ocorre às temperaturas entre 200 °C e 280 °C, com uma degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação. Nas temperaturas superiores a 280 °C, ocorre uma rápida volatilização dos componentes químicos (FIGUEROA; MORAES, 2009).



A alfa-celulose e a madeira em si parecem degradar em taxas semelhantes, embora a madeira comece a degradar a temperaturas ligeiramente inferiores enquanto a alfa-celulose em temperaturas mais altas (LEVAN, 1989).

#### 2.4.1.2 Hemiceluloses

As hemiceluloses degradam às temperaturas entre 200 °C e 260° C aproximadamente, sendo o primeiro carboidrato da madeira a se degradar, devido a sua estrutura heterogênea, à natureza não cristalina de sua estrutura e a seu baixo peso molecular em relação aos outros polímeros da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2009).

As hemiceluloses são menos estáveis termicamente do que a celulose, emitem mais gases não combustíveis e menos alcatrão. Grande parte do ácido acético liberado da pirólise da madeira é atribuída à desacetilação das hemiceluloses (LEVAN, 1989).

Das hemiceluloses, a xilana é menos estável termicamente, porque pentosanas são mais suscetíveis à hidrólise e reações de desidratação (LEVAN, 1989).

#### 2.4.1.3 Lignina

A lignina é termicamente mais resistente que os demais carboidratos que compõem a madeira. Sua degradação térmica é uma reação exotérmica, em temperaturas entre 225 ° C e 450 ° C. Entre 150 °C e 300 °C ocorre o rompimento das ligações de carbono e, em torno de 300 °C, as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático (LEVAN, 1989; FIGUEROA; MORAES, 2009).

### **2.4.2 Influência sobre as propriedades mecânicas**

Para Figueroa e Moraes (2009), a influência da temperatura sobre as propriedades da madeira pode ter caráter temporário ou permanente, dependendo do grau de degradação do material causado pela exposição ao calor e pela temperatura.

Os efeitos permanentes não desaparecem depois do resfriamento da madeira e ocorrem a temperaturas superiores a 65 °C, sem perda significativa de peso dos carboidratos, manifestando-se, basicamente, de três modos: redução do teor de umidade, aparecimento de tensões internas nas fibras de madeira e a degradação térmica dos componentes químicos (FIGUEROA; MORAES, 2010).

Ainda segundo os mesmos autores, à temperatura ambiente as propriedades mecânicas da madeira estão relacionadas, principalmente, com a densidade, a anatomia e o teor de umidade, entretanto, quando este material é submetido a altas temperaturas são completamente alteradas.

Segundo Figueroa e Moraes (2009) vários trabalhos foram realizados sobre a influência da temperatura nos polímeros da madeira, principalmente sobre seu amolecimento, o qual é caracterizado pela temperatura de transição vítrea. A transição vítrea é a passagem de um estado desordenado rígido (vítreo) do polímero para um estado desordenado maior, no qual as cadeias poliméricas possuem uma maior mobilidade. Essa mobilidade, no caso de algumas classes de polímeros naturais como as hemiceluloses, a celulose e a lignina, dá origem a um comportamento menos rígido.

A temperatura de transição vítrea é a temperatura na qual um polímero amorfo começa a amolecer. Abaixo da temperatura o polímero apresenta as características de um vidro (rigidez, etc.) (KLOCK *et al*, 2005). A lignina e as hemiceluloses são polímeros amorfos e essencialmente termoplásticos para os quais o principal ponto de amolecimento é aquele da transição vítrea, sendo influenciada por fatores como teor de umidade e peso molecular do polímero (FIGUEROA; MORAES, 2009).

A lignina, sendo um polímero amorfo, possui um ponto de transição vítrea (ou de amolecimento), que varia entre as temperaturas de 135 a 190°C (KLOCK *et al*, 2005) . Para a celulose, a temperatura de transição situa-se entre 200 °C e 250 °C. Para as hemiceluloses, a transição vítrea é observada na faixa de 150 °C a 220 °C (FIGUEROA; MORAES, 2009).

O amolecimento dos polímeros é acompanhado de mudanças importantes nas propriedades mecânicas do material, principalmente do módulo de elasticidade influenciando no desempenho mecânico da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Na Figura 13, pode-se ver a influência da temperatura sobre a resistência à compressão normalizado em relação àqueles obtidos à temperatura ambiente feito por três diferentes estudos. A degradação dos polímeros da madeira reflete na perda de resistência da madeira independente da espécie.

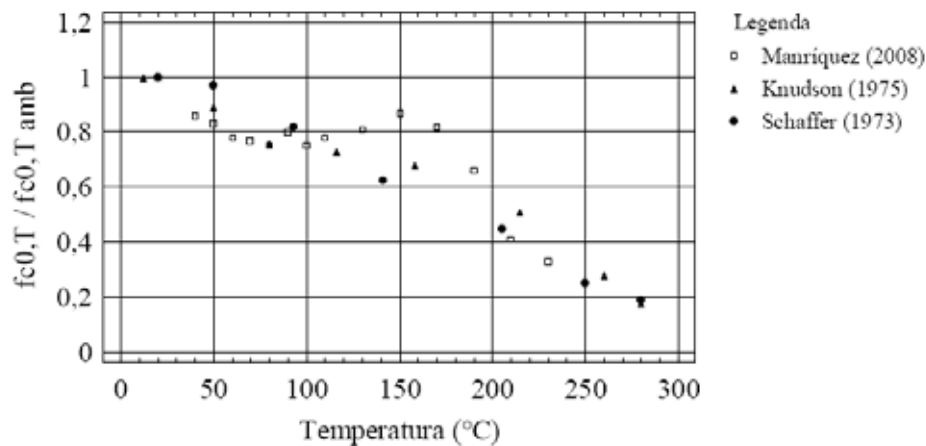


Figura 13 - Compressão paralela às fibras relativa  
Fonte: Figueroa e Moraes (2009)

## 2.5 ESTUDO BÁSICO DOS INCÊNDIOS

Um fogo real em um edifício é composto de três fases essencialmente: ignição, aquecimento (aumento de temperatura) e resfriamento (diminuição da temperatura). O período de maior crescimento da temperatura num incêndio compartimentado ocorre no período seguinte ao “flashover”, ponto esse onde todo material orgânico entra em combustão espontânea (FIGUEIREDO, 1998; COSTA; SILVA, 2006).

A duração do incêndio (período do instante em que surge a chama inicial até a extinção total deste) vai depender da quantidade de material combustível e

disponibilidade de oxigênio para combustão. Esses fatores caracterizam o cenário do incêndio, possibilitando infinitas combinações (COSTA; SILVA, 2006).

O começo do incêndio é marcado pela ignição do material contido no ambiente, resultado de seu lento aquecimento até a temperatura de combustão, em função da quantidade de calor recebida pelo início da ignição. A ventilação do ambiente, a natureza e fonte da ignição e os fatores intimamente relacionados às propriedades dos materiais e desempenho destes ao serem expostos a elevadas temperaturas (inflamabilidade, liberação de calor, combustibilidade, propagação de chamas, entre outros) conhecidos como a reação ao fogo, interagem na fase inicial (PINTO, 2005).

Na segunda fase, após atingirem um nível suficiente de radiação, todos os materiais combustíveis do compartimento se ignizam rapidamente envolvendo todo o compartimento, configurando o ponto mais crítico do incêndio: a inflamação generalizada (*flashover*), transição entre a fase de aquecimento e a fase de queima (PINTO; CALIL, 2002).

Nesta segunda fase, a temperatura se eleva de forma brusca e o incêndio se propaga rapidamente. O aquecimento dos gases no ambiente atinge estágios suficientes para romperem os vidros, produzindo um súbito contato com o oxigênio externo. É caracterizada por explosões e grandes chamas causadas por um processo de combustão extremamente violento (FIGUEIREDO, 1998).

O combate nesta fase de incêndio torna-se mais difícil porque a energia térmica liberada é mais elevada, o que torna os recursos e esforços de combate insuficientes, geralmente, exigindo a resistência da edificação para prevenir o alastramento do fogo e o colapso estrutural (PINTO, 2001).

Por fim, tem-se a fase do resfriamento, região que representa a redução gradativa da temperatura dos gases no ambiente, após a completa extinção do material combustível durante a fase de aquecimento, definindo a terceira fase do incêndio (FIGUEIREDO, 1998; COSTA; SILVA, 2006)

### 2.5.1 Curvas tempo x temperatura

O incêndio pode ser modelado por meio de curvas temperatura-tempo que associam a elevação da temperatura em função do tempo de duração do incêndio, permitindo estimar a máxima temperatura dos gases quentes no ambiente em chamas. Essas curvas são parametrizadas pela carga de incêndio<sup>3</sup>, pelo grau de ventilação e pelas características dos elementos de compartimentação.

Costa e Silva (2006), entretanto, alertam que conclusões tomadas com base nessa curva devem ser analisadas com cuidado, pois o incêndio-padrão não corresponde ao incêndio real. A Fig. 14 faz a comparação da curva temperatura-tempo do incêndio do modelo do incêndio natural em relação ao modelo de incêndio-padrão.

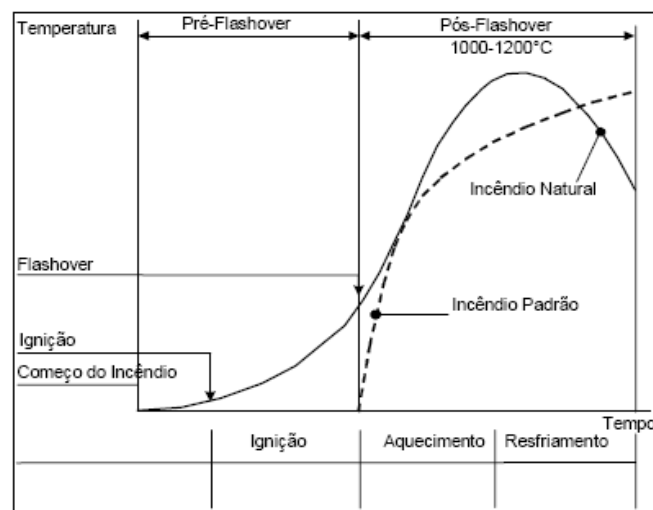


Figura 14 - Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão.  
Fonte: Costa e Silva (2006)

Para Pinto (2005), os custos elevados envolvidos com a realização de ensaios com elementos e sistemas estruturais expostos ao fogo, sejam com relação aos equipamentos necessários, sejam com custos da realização dos ensaios, dificultam a realização e reprodução de pesquisas na área, fazendo com que o desenvolvimento de modelos torne-

<sup>3</sup> A carga de incêndio (ou carregamento) é constituída por todo o material combustível contido no compartimento em chamas.

se um método favorável cada vez mais adotado mundialmente em todas as áreas de pesquisa.

Deste modo, o incêndio-padrão é o modelo de incêndio idealizado para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas. Na ausência de dados realísticos, as curvas padronizadas podem ser consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado.

As curvas-padrão independem da influência da carga de incêndio e do grau de ventilação do compartimento e das propriedades térmicas dos materiais da compartimentação, de forma que não representam uma situação real de incêndio, uma vez que as características do cenário do incêndio podem variar de um compartimento para o outro; contudo, elas são usadas para facilitar os ensaios em série de elementos construtivos para avaliar a sua resistência a fogo (COSTA; SILVA, 2006).

Entre as principais curvas de incêndio padrão normalizadas, têm-se aquelas fornecidas pela ISO e pela ASTM, empregadas para combustão de materiais celulósicos.

#### 2.5.1.1 ISO 834 (1975)

Em 1975, a *International Organization for Standardization* publicou a norma ISO 834 “*Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction*”, fornecendo a Equação (3) para estimar a temperatura em função do tempo do incêndio-padrão.

$$T - T_0 = 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (3)$$

onde:

$t$  - Tempo, em minutos

$T$  - Temperatura no instante  $t$  (°C)

$T_0$  - Temperatura inicial (suposta 20 °C)

A mesma curva está esquematizada na Figura 15:

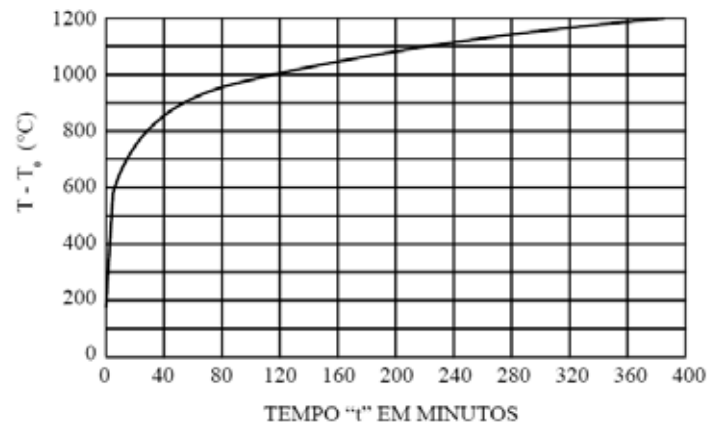


Figura 15 - Curva tempo x temperatura fornecida pela ISO 834/75.

#### 2.5.1.2 ASTM E 119 (1918)

A curva da ASTM E119 – *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* tem sido adotada desde 1918. Os valores dessa curva são baseados nas temperaturas máximas de incêndios reais, tomando por referência o ponto de fusão de materiais já conhecido naquela época. A curva fornecida pela ASTM E119 está esquematizada na Figura 16:

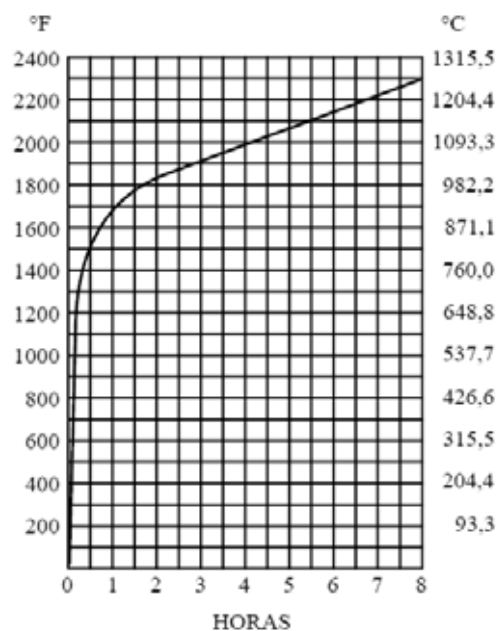


Figura 16 - Curva tempo x temperatura fornecida pela ASTM E119.

## 2.6 ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A madeira como material de construção tem a limitação de ser inflamável. Conseqüentemente, estruturas de madeira são vistas por muitos como um ambiente menos seguro do que as estruturas construídas com aço e alvenaria.

No entanto, a experiência tem mostrado que algumas estruturas de madeira têm uma resistência ao fogo comparável, ou maior do que a de muitas alternativas não combustíveis. Isso se deve a estudos feitos principalmente por países europeus, norte-americanos e asiáticos, que possibilitaram o emprego da madeira em locais da construção habitacional onde antes ela representava um risco, rompendo, assim, o preconceito quanto a sua utilização (PINTO, 2001).

Erroneamente, a madeira é considerada um material de baixa resistência ao fogo. Isto se deve, principalmente, à falta de conhecimento das suas propriedades de resistência, quando submetida a altas temperaturas e quando exposta à chama, pois, sendo bem dimensionada, ela apresenta resistência ao fogo superior à de outros materiais estruturais (SZUCS *et al*, 2006).

Segundo a literatura relativa ao assunto, o aço a temperaturas em torno de 500°C a 700°C, tem sua resistência diminuída em 50%, o concreto a 540°C, perde 90% de sua resistência à compressão e o alumínio perde sua resistência aos 200°C, fundindo aos 600°C (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, 1984 *apud* PINTO, 2001).

A Figura 17 mostra, por exemplo, uma estrutura metálica que é de reação não inflamável, mas que perdeu a sua resistência mecânica quando em presença de temperaturas elevadas, ao contrário da viga de madeira que, apesar de carbonizada, permaneceu resistente.



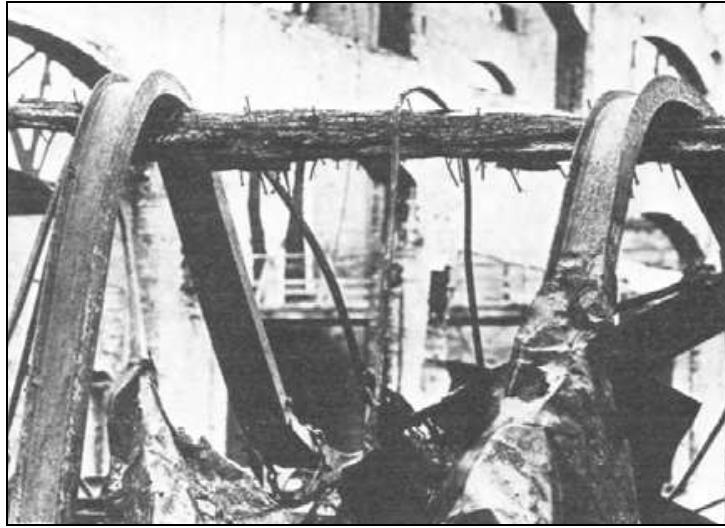


Figura 17 - Estrutura de aço e madeira após incêndio  
Fonte: Autor desconhecido

Pinto (2001) explica, que peças robustas como apresentada na Figura 17 acima, quando sob a ação das chamas, forma uma camada de carvão isolante, que impede a saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para seu interior, auxiliando, assim, na contenção do incêndio e evitando que toda a peça seja destruída.

Nesse mesmo contexto, Szucs *et al* (2006) cita que mesmo que a madeira venha a ser queimada em 2 cm, por exemplo, o núcleo restante é suficiente para continuar resistindo mecanicamente o tempo que se quiser estimar. Isto faz com que a madeira tenha comportamento perfeitamente previsível. As coníferas, por exemplo, queimam até 2 cm em 30 minutos e 3,5 cm em 60 minutos. É devido a esse comportamento da madeira perante o fogo, que alguns documentos normativos preveem uma espessura a mais nas dimensões da seção transversal da peça de madeira.

### **2.6.1 A redução de propriedades na seção remanescente**

Para Pinto e Calil (2002), a seção residual do elemento estrutural, na Figura 18, responde pela função estrutural, consideradas as alterações nas propriedades de

resistência e de rigidez, que podem ser estimadas por meio da combinação do gradiente de temperatura e da redução das propriedades mecânicas.



Figura 18 – Seção de uma viga exposta a curva padronizada.  
Fonte: Pinto (2005)

### 2.6.2 Efeito de arredondamento

Pinto (2004) explica que durante a exposição ao fogo, a queima de um elemento estrutural de seção retangular se processa com maior velocidade nos cantos da peça, resultando em um arredondamento que pode ou não ser considerado nos cálculos para determinação da espessura de madeira carbonizada. A espessura de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento dos cantos, é assumida como constante e pode ser calculada pela Equação (4):

$$D_n = b_n t \quad (4)$$

onde:

$D_n$  = espessura da carbonização, incluindo o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras

$b_n$  = taxa de carbonização estimada, incluindo o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras

$t$  = tempo de exposição ao fogo

### 2.6.3 Expressão da taxa de carbonização por modelo matemático

Schaffer (1967) propôs um modelo em função do teor de umidade e da massa específica para as espécies *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus* spp e *Quercus* spp, dado pela Equação 5.

$$t = C \cdot xc \quad (5)$$

onde  $t$  é tempo, em min;  $C$  é taxa de carbonização, em min/mm; e  $xc$  é espessura de madeira carbonizada, em mm.

A taxa de carbonização ( $C$ ) foi determinada considerando-se a temperatura convencional de carbonização de 288 °C, resultando a Equação 6 para o *Pseudotsuga menziesii*, a Equação 7 para o *Pinus* spp e a Equação 8 para o *Quercus* spp.

$$C = (0,002269 + 0,00457 \mu)\rho + 0,331 \quad (6)$$

$$C = (0,000461 + 0,00095 \mu)\rho + 1,016 \quad (7)$$

$$C = (0,001583 + 0,00318 \mu)\rho + 0,594 \quad (8)$$

nas quais  $\mu$  é o teor de umidade, em %, e  $\rho$  é a massa específica da madeira, em kg/m<sup>3</sup>.

Conforme ressaltado por Figueroa e Moraes (2009), no Brasil, existem poucos resultados na literatura, senão os apresentados por Pinto (2005) que apresenta valores de taxa de carbonização para a espécie *Corimbya citriodora* e *Eucalyptus grandis*, para teor de umidade aproximado de 24% e massa específica de 1.060 e 880 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Um valor típico da taxa de carbonização de madeira é de aproximadamente 0,5-1 mm / min como pode ser visto no Quadro 4, onde  $b_n$  representa a taxa de carbonização estimada, incluindo o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras e  $b_0$  a taxa de carbonização estimada, sem considerar o efeito de arredondamento.

Quadro 4 – Taxas de carbonização encontrados na literatura.

Espécie da Madeira	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Taxa de carbonização não linear (mm/min)		Bibliografia
		b <sub>0</sub>	b <sub>n</sub>	
<i>Basswood</i>	399	0,56	-	Wood Handbook (1999)
<i>Hard maple</i>	691	0,56	-	Wood Handbook (1999)
<i>Red oak</i>	664	0,58	-	Wood Handbook (1999)
<i>Yellow</i>	504	0,70	-	Wood Handbook (1999)
<i>Corimbya citriodora</i>	1060	0,58	-	Pinto (2005)
<i>Eucalyptus gradis</i>	880	0,58	-	Pinto (2005)
Madeira maciça de Conífera	≥ 290	0,65	0,80	Eurocódigo 5
Madeira maciça de Folhosa	≥ 290	0,65	0,70	Eurocódigo 5
Madeira maciça de Folhosa	≥ 450	0,50	0,55	Eurocódigo 5
Folhosas: carvalho, doussie, sipo, teca, makore	-	0,50	-	Norma Francesa
Outras espécies de Folhosas	-	0,60	-	Norma Francesa
Folhosas teor de umidade de 18%	≥ 650	0,50		Norma Britânica

Fonte: Adaptado de Figueroa e Moraes (2009)

#### 2.6.4 Norma brasileira

O dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio para materiais como o aço e o concreto é previsto pela normalização, mas o Brasil não possui uma norma para dimensionamento de estruturas de madeira expostas a situações de incêndio. Neste sentido, uma revisão da atual NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira está sendo prevista ao considerar a inclusão de um anexo que trate sobre o tema.

Na ausência de norma nacional, a Instrução Técnica nº 08 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo aconselha a consulta à normalização internacional reconhecida. A Norma de dimensionamento de estruturas de madeira internacional Eurocode 5: *Design of timber structures*, Part 1-2 (2002) considera a atuação do fogo prevendo que a estabilidade das estruturas deve ser verificada pela combinação das ações nela aplicadas, considerando a redução da seção transversal da peça devido à combustão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Foram utilizadas neste trabalho madeiras provenientes de um incêndio real. Por não existirem tantas ocorrências de incêndio ou por aquelas que se enquadram (que tenham o material com a integridade necessária) nem sempre disponibilizarem este material, o trabalho foi limitado ao estudo de um único caso.

Todo o trabalho foi desenvolvido no Câmpus Experimental da UNESP no município de Itapeva, sendo os corpos de prova confeccionados no laboratório de Beneficiamento. A preparação das peças compreendeu: avaliação inicial do estado das peças, medição das seções originais, usinagem, pesagem, tomada das medidas finais.

Muito embora a principal força atuante nas estruturas do telhado seja a flexão, em função da limitação de material, outros ensaios foram selecionados para serem realizados: de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento (que compõem essa solicitação) e densidade aparente. Esses são considerados os ensaios principais segundo a NBR 7190/97 para a caracterização mínima de espécies. Através destes valores podemos estimar alguns valores, como por exemplo, compressão normal às fibras, segundo expressões fornecidas pela própria norma para caracterização simplificada.

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Propriedades dos Materiais em conformidade com as prescrições do documento normativo NBR 7190/97 em uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 30 toneladas.

Os dados foram analisados através de tabelas e gráficos com a utilização de planilhas eletrônica e comparada, quanto à análise de variância, através do *software* estatístico SISVAR 5.3.

#### 3.1 LOCAL E ORIGEM DAS AMOSTRAS

O material foi retirado da zona rural do município de Itapeva, no Bairro Taquaral, localizado a 10 Km do perímetro urbano. A obtenção das peças realizou-se no dia 11 de

março de 2012, uma semana após a ocorrência do incêndio, sendo estas caibros da estrutura do telhado (Figura 19).

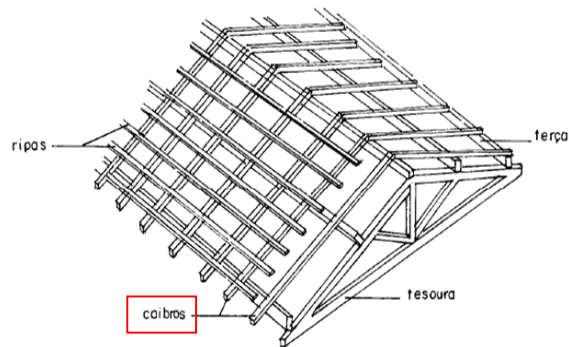


Figura 19 - Desenho esquemático da estrutura de um telhado, mostrando a parte da estrutura que pertenciam as amostras.

Embora a coleta tenha sido feita uma semana após a ocorrência do incêndio, parte da estrutura do telhado já havia sido reconstruída (Figura 20), restando o material usado no trabalho, amontoado em um canto da propriedade. O descarte desse material permitiu que fossem recolhida uma amostra adequada ao estudo pretendido.



(a)

(b)

Figura 20 - Casa de onde faziam parte as amostras com a estrutura do telhado já reconstruída: (a) vista externa e (b) vista interna

Segundo informações cedidas pelo Corpo de Bombeiros local e pelo proprietário do imóvel, o incêndio ocorreu na tarde do dia 4 de março de 2012, por volta das 13hs. O

fogo teria surgido acidentalmente no interior da residência, não se sabendo informar o que deu início às chamas, mas que o mesmo fora agravado pela presença de muito material combustível armazenado em um dos cômodos (feno seco).

Devido ao fato de não haver um registro formal a respeito da edificação, torna-se extremamente difícil precisar as reais características da madeira analisada. O registro existente baseia-se apenas no conhecimento do atual proprietário que informa que o imóvel foi comprado no ano 1986 e que esta foi a primeira vez em que estava sendo realizado algum tipo de reparo naquele telhado.

Do local foram coletados quatro caibros de 1,30 metros e um caibro de 3,10 metros, de seção nominal 6 x 5 cm.

### 3.2 IDENTIFICAÇÃO BOTÂNICA

A identificação botânica foi realizada com base na análise da anatomia do lenho. As peças de madeira tiveram sua espécie identificada no Laboratório de Anatomia da Madeira da Unesp de Itapeva e foi confirmada na Xiloteca do IPT como sendo de Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*), conforme Figura 21.

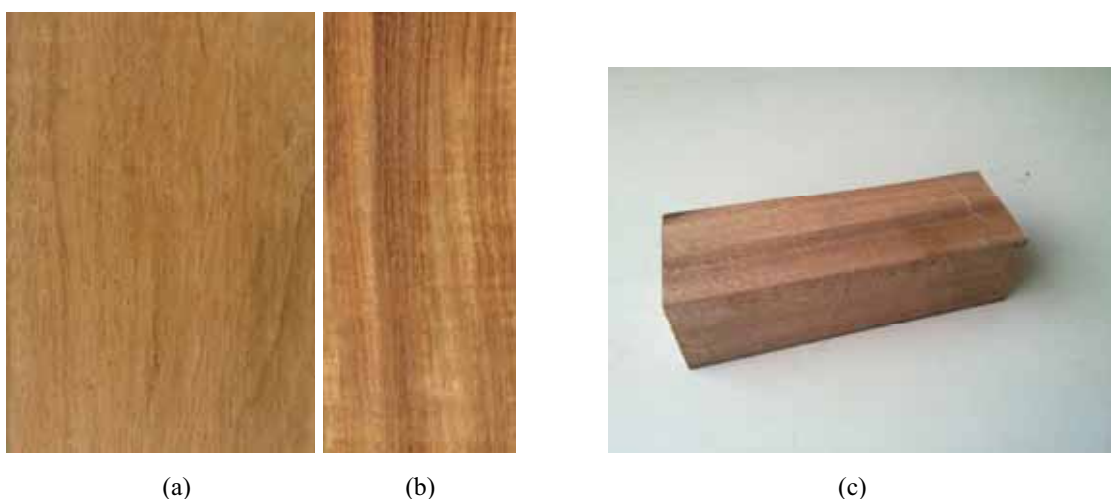


Figura 21 - Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*): Fotos do acervo do IPT da face tangencial (a) e radial (b) e da espécie. (c) Um dos corpos de prova usados nos ensaios de compressão.

A Guarucaia é identificada pela distinção da cor entre o cerne e alborno, sendo que o cerne apresenta cor castanho-rosado, com veios mais escuros formando desenhos. Possui cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta, grã reversa e textura grossa, sendo a mesma empregada em sistemas estruturais de telhado (IPT, 1989).

A identificação da espécie é importante na comparação das propriedades mecânicas dessa madeira de acordo com o padrão específico da espécie caracterizada em laboratório, constante no Anexo E da Norma NBR 7190/97 – Valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de florestamento e manual.

### 3.3 ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA

A Figura 22 é utilizada para ilustrar o esquema de corte de uma das amostras.

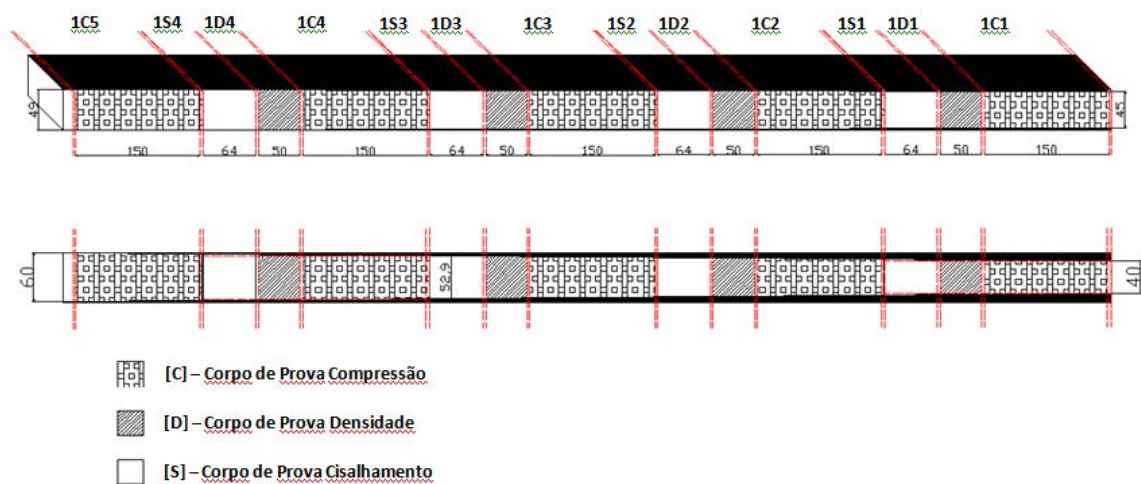


Figura 22 - Esquema de corte dos corpos de prova.

Como pode ser visto na Figura 22, cada corpo de prova apresenta uma identificação composta por um número, uma letra e outro número, que representam, sequencialmente, as seguintes informações:

- número da amostra



- tipo de ensaio a ser realizado
- número de identificação do corpo de prova

O número de identificação indica de qual região da amostra foi retirado o corpo de prova, em números sucessivos que vão do mais degradado para o menos degradado. Dessa forma, o número **1C1** da Figura 23 representa o corpo de prova mais degradado da amostra, enquanto o **1C3** o corpo de prova menos degradado.

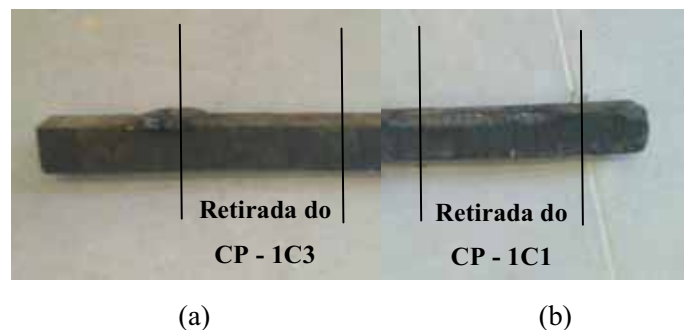


Figura 23 – Processo de identificação dos corpos de prova. (a) Extremidade **menos** degradada pela ação do fogo. (b) Extremidade **mais** degradada pela ação do fogo

Ressalta-se, entretanto, que o número retirado de corpos de prova foi inferior ao número de corpos de prova previstos (constante do esquema de corte), tendo em vista, a grande incidência de defeitos nas peças, sobretudo a presença de pregos que consequentemente ocasionavam fendas em áreas adjacentes à sua colocação.

Em cada peça, o número de corpos de prova ficou limitado a três ou quatro para cada tipo de ensaio. No total das cinco peças, foram retirados: 16 corpos de prova para os ensaios de compressão, 15 corpos de prova de cisalhamento, 15 corpos de prova para densidade e 5 corpos de prova para tração, estes últimos retirados exclusivamente da amostra 5 devido seu maior comprimento entre as demais.

### 3.4 DETALHAMENTOS DAS AMOSTRAS

#### 3.4.1 Amostra 1

A amostra 1 (Figura 24) aparentou ser a menos degradada, sendo retirado desta os corpos de prova de compressão 1C1, 1C2 e 1C3; os corpos de prova de cisalhamento 1S1, 1S2, 1S3 e 1S4 e os corpos de prova de densidade 1D1, 1D2, 1D3 e 1D4.



Figura 24 - Amostra 1

#### 3.4.2 Amostra 2

A Amostra 2 (Figura 25) apresentava-se razoavelmente degradada na extensão de 50 cm de uma de suas extremidades sendo esta bastante danificada pelo efeito de arredondamento. Foram retirados os corpos de prova de compressão 2C1, 2C2, 2C3 e 2C4; os corpos de prova de cisalhamento 2S1, 2S2, 2S3 e 2S4 e os corpos de prova de densidade 2D1, 2D2 e 2D3.



Figura 25 - Amostra 2

### 3.4.3 Amostra 3

A amostra 3 (Figura 26) estava bastante degradada na extensão de 30 cm de uma de suas extremidades com uma relação de carvão bastante alta, precisando ser descartada. Foram retirados desta amostra os corpos de prova de compressão 3C1, 3C2 e 3C3; os corpos de prova de cisalhamento 3S1, 3S2, 3S3 e 3S4 e os corpos de prova de densidade 3D1, 3D2 e 3D3.



Figura 26 - Amostra 3

### 3.4.4 Amostra 4

A amostra 4 (Figura 27) aparentou ser a mais degradada de todas sendo aproveitada pouco mais de sua metade para retirada dos corpos de prova de compressão 4C1, 4C2 e 4C3; os corpos de prova de cisalhamento 4S1 e 4S2 e os corpos de prova de densidade 4D1, 4D2 e 4D3.



Figura 27 - Amostra 4.

### 3.4.5 Amostra 5

A amostra 5 (Figura 28) constituía-se na maior de todas com pouco mais de 3,0 metros de extensão. Apenas uma pequena parte de sua extremidade estava degradada pelo fogo. Por se tratar de uma amostra de grande comprimento, a mesma foi focada para retirada dos corpos de prova de tração 5T1, 5T2, 5T3, 5T4 e 5T5. Entre os corpos de prova de tração, foram retirados três corpos de prova de compressão 5C1, 5C2 e 5C3, além de um de cisalhamento e um de densidade, identificados como 5S1 e 5D1, respectivamente.



Figura 28 - Amostra 5.

## 3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram confeccionados em dois dias de trabalho, sendo no primeiro dia retirados os corpos de prova da amostra I, II, III e IV e no seguinte os corpos de prova da amostra V.

Todas as amostras antes de serem seccionadas transversalmente passaram por uma usinagem preliminar, sendo retirado de cada aresta de 2-3 mm de espessura de madeira degradada em cada lado. A medida se fez necessária a fim de dar a uniformidade aos corpos de prova, bem como para que fossem retirados os defeitos de superfície que não poderiam ser considerados como área útil nos cálculos de resistência (Figura 29).



Figura 29 - Amostras prontas para serem seccionadas.

A Tabela 1 faz a comparação da seção original e seção usinada das peças.

**Tabela 1** - Dimensão das peças antes e depois de usinadas.

	Seção original		Seção usinada	
	largura	altura	largura	altura
Amostra 1	49,5	60,8	45,2	54,6
Amostra 2	48,3	60,5	42	53,5
Amostra 3	44	57,9	39,8	52,7
Amostra 4	51	58,2	45,2	52,8
Amostra 5	49,8	59,5	45,2	51,8

### 3.6 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA

O critério de confecção dos corpos de prova a serem ensaiados foi a retirada de peças de dimensões aproximadas ao longo da extensão de cada uma das amostras, independente do seu grau de carbonização.

Isso resultou na retirada de corpos de prova de diferentes perfis, mantendo a área sugerida pela norma, variando a porcentagem de área de madeira sã e de madeira queimada, seja somente pelo efeito da pirólise ou totalmente carbonizada.

Os diferentes perfis gerados dos corpos de compressão paralela em relação à carbonização podem ser vistos na Figura 30.



Figura 30 - Diferentes perfis de corpo de prova gerado.

Os corpos de prova retirados das amostras I, II, III e IV podem ser vistos na Figura 31, enquanto os corpos de prova retirados da amostra V podem ser vistos na Figura 32.

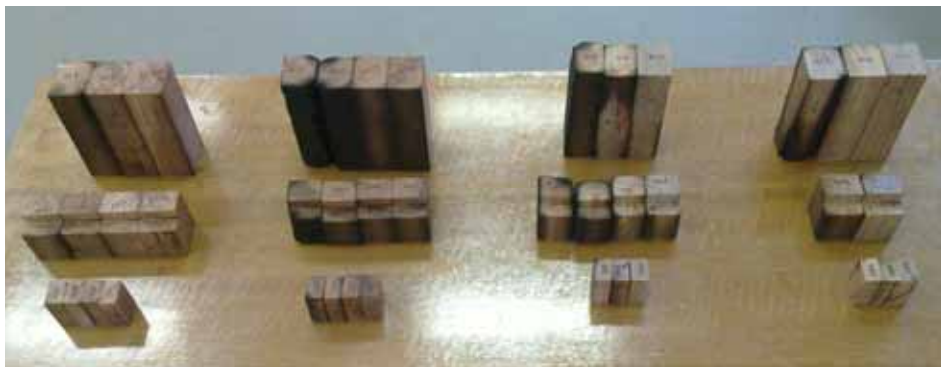


Figura 31 - Corpos de prova das amostras I, II, III e IV.



Figura 32 - Corpos de prova da amostra V.

### 3.7 MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade é uma característica física importante para o controle da resistência da madeira, pois suas propriedades físicas variam em função da água presente. A norma ABNT NBR 7190:1997 recomenda o ajuste das propriedades de resistência da madeira em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas de madeira.

Na referida norma, os valores das propriedades de resistência e rigidez da madeira se constituem na condição padrão de referência, ou seja, na umidade de equilíbrio a 12%. Os corpos de prova tiveram sua umidade verificada com uso de um medidor de umidade por contato, apresentando teores de umidade estáveis em torno de 10 – 12%, portanto, pode-se considerar que os ensaios foram realizados na condição padrão de referência pela norma.

### 3.8 DIMENSÃO DOS CORPOS DE PROVA

A norma ABNT NBR 7190:1997 estabelece ainda os critérios de fabricação dos corpos de prova para cada tipo de ensaio, por exemplo, para ensaios de compressão paralela às fibras os mesmos devem ter forma prismática com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento de 15,0 cm na direção paralela às fibras. Todavia, o mesmo documento permite que se trabalhe com corpos de prova de dimensões reduzidas, com pelo menos 1,8 cm de lado e comprimento três vezes o lado da seção transversal.

Dessa forma, na impossibilidade de retirada de corpos de prova de seção transversal 5 x 5 cm e ainda sabendo-se que o valor de resistência é o resultado da atuação de uma Força Máxima sobre uma determinada área, teve-se a necessidade de adaptação dos corpos de prova em dimensões mais próximas possíveis da recomendada.

Assim, os corpos de compressão e de cisalhamento tiveram suas dimensões reduzidas. Já os corpos de tração tiveram suas dimensões dentro do estipulado pela norma.

### 3.9 ESTIMATIVA DA SEÇÃO RESIDUAL

A estimativa da seção residual de cada corpo de prova, isto é, da área que responde definitivamente pela função estrutural do mesmo (soma da área de pirólise e de madeira sã), foi estimada utilizando-se o *software AutoCad 2010*.

As seções de cada corpo de prova foram inicialmente fotografadas e em seguida importadas ao *software*, onde foram demarcadas as áreas de transição. A partir de tal procedimento, foi possível estimar a área percentual de madeira normal (madeira sã), de madeira com efeito da pirólise e de madeira carbonizada.

Uma mostra do procedimento realizado pode ser visto na Figura 33, que mostra a seção transversal dos corpos de provas 1C1 e 3C1 e suas respectivas estimativas de área feitas no *software*.

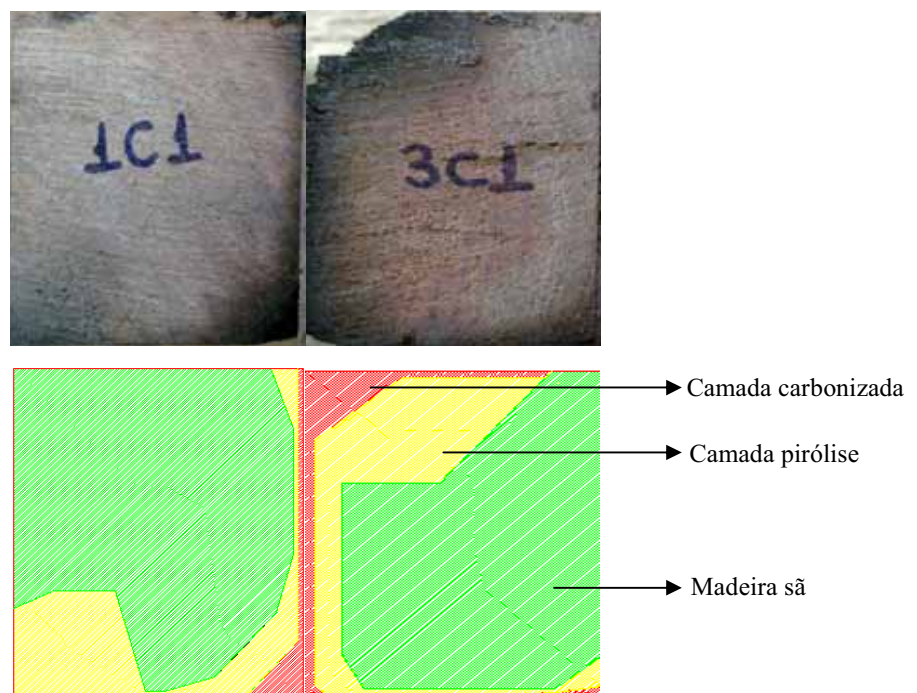


Figura 33 - Estimativa de seção residual nos corpos de prova.



### 3.10 TABULAÇÃO DOS DADOS

As propriedades levantadas de cada corpo de prova como dimensões, massa, densidade e porcentagem de área residual foram então tabeladas, como mostrado para os corpos de prova de compressão paralela às fibras e cisalhamento, respectivamente nas Tabelas 2 e 3.

A porcentagem de carvão e da camada de pirólise em cada corpo de prova, como explicado anteriormente, é apenas uma estimativa tendo em vista a dificuldade em sua mensuração, principalmente devido à queima irregular.

Tabela 2 - Características dos corpos de prova de compressão.

CP	Massa (g)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Compr. (mm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	% Carvão	% Pirólise	% Normal
1C1	303,23	54,40	45,19	150,00	0,82	1,95%	21,50%	76,55%
1C2	317,22	54,60	45,22	150,00	0,86	0,00%	8,87%	91,13%
1C3	323,64	54,76	45,32	150,00	0,87	0,00%	0,00%	100,00%
2C1	229,12	52,71	41,75	150,00	0,69	10,79%	22,60%	66,61%
2C2	244,99	53,54	42,08	150,00	0,72	12,03%	25,91%	62,06%
2C3	294,08	53,56	42,02	150,00	0,87	0,00%	15,82%	84,12%
2C4	319,05	53,7	42,13	150,00	0,94	0,00%	4,49%	95,45%
3C1	243,55	52,63	39,57	150,00	0,78	8,06%	25,76%	66,18%
3C2	268,58	52,77	39,87	150,00	0,85	2,38%	13,43%	84,19%
3C3	268,16	52,74	39,95	150,00	0,85	0,00%	1,19%	98,81%
4C1	258,38	52,65	45,16	150,00	0,72	10,20%	40,03%	49,77%
4C2	294,23	52,7	45,1	150,00	0,83	0,00%	6,39%	93,61%
4C3	297,65	52,91	45,23	150,00	0,83	0,00%	0,00%	100,00%
5C1	302,05	51,67	47,6	150,00	0,82	1,19%	2,57%	96,25%
5C2	287,02	51,89	41,82	150,00	0,88	0,00%	2,13%	97,87%
5C3	300,81	51,86	46,32	150,00	0,83	0,00%	0,00%	100,00%

Tabela 3 - Características dos corpos de prova de cisalhamento.

CP	Massa (g)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Seção crítica (cm <sup>2</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	% Carvão	% Pirólise	% Normal
1S1	113,89	50,86	45,38	23,08	0,87	0,00%	0,11%	99,89%
1S2	119,38	50,89	45,51	23,16	0,91	0,00%	0,00%	100,00%
1S3	117,27	50,99	45,44	23,17	0,90	0,00%	0,00%	100,00%
1S4	120,30	50,84	45,31	23,04	0,92	0,00%	0,00%	100,00%
2S1	90,31	50,65	42,17	21,36	0,69	0,04%	0,15%	99,81%
2S2	104,68	50,7	42,4	21,50	0,80	0,00%	0,08%	99,92%
2S3	114,12	50,91	42,34	21,56	0,87	0,00%	0,04%	99,96%
2S4	110,95	50,26	42,21	21,21	0,85	0,00%	0,02%	99,98%
3S1	90,60	50,81	44,37	22,54	0,69	0,10%	0,33%	99,58%
3S2	92,74	50,74	44,58	22,62	0,71	0,11%	0,34%	99,54%
3S3	101,05	50,68	40,00	20,27	0,77	0,00%	0,15%	99,85%
3S4	100,78	50,86	40,20	20,45	0,77	0,00%	0,04%	99,96%
4S1	109,72	50,78	45,02	22,86	0,84	0,00%	0,04%	99,96%
4S2	110,99	50,93	45,20	23,02	0,85	0,00%	0,00%	100,00%
5S1	115,04	47,89	45,79	21,93	0,88	0,00%	0,00%	100,00%

Da mesma forma, a Tabela 4 apresenta as características dos corpos de prova usados nos ensaios de tração.

Tabela 4 - Características dos corpos de prova de tração

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
5T1	49,45	6,86	279,79	0,86
5T2	51,87	7,22	280,26	0,86
5T3	52,05	6,99	285,82	0,87
5T4	50,10	7,63	314,91	0,96
5T5	51,39	7,56	294,06	0,90

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras ensaiadas, mesmo após o incêndio, continuaram apresentando uma densidade média alta de  $815 \pm 58 \text{ kg/m}^3$ , com coeficiente de variação de cerca de 7%, considerado baixo. Todavia, sua densidade é inferior ao valor médio usual fornecido pelo Anexo E da NBR 7190 (1997) para a madeira de Guarucaia que é de  $919 \text{ kg/m}^3$ .

Para Pinto e Calil Jr. (2010), a perda da densidade está relacionada com a temperatura na qual a madeira é submetida, sendo esta perda acentuada em peças que sofrem a carbonização, como as madeiras utilizadas neste trabalho. Essa perda de densidade, segundo Figueroa e Moraes (2009), é oriunda das reações de despolimerização e refletem diretamente nas propriedades mecânicas da madeira, influenciando-as de maneira negativa.

As Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 mostram os valores das propriedades de resistência ( $f_{c0}$ ) e modulo de elasticidade ( $E_{c0}$ ) na compressão paralela às fibras, resistência ( $f_{t0}$ ) e modulo de elasticidade ( $E_{t0}$ ) na tração paralela às fibras e resistência ao cisalhamento ( $f_v$ ) para os corpos de prova ensaiados, com suas respectivas densidade aparente a 12% de umidade  $P_{ap(12\%)}$ .

Os resultados individuais para cada corpo de prova (CP) estão acompanhados dos valores médios ( $\bar{x}$ ), desvios padrões ( $s$ ) e coeficientes de variação (CV) obtidos para cada amostra, onde  $n$  representa o número de corpos de prova ensaiados.

Dessas tabelas se verifica que nas amostras 1 e 5, que aparentavam ser menos degradadas pela ação do fogo, obtiveram-se os maiores valores médios para resistência à compressão paralela as fibras, enquanto a amostra 2 teve um melhor desempenho em relação à resistência ao cisalhamento e a amostra 3 ao módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de  $\rho_{ap(12\%)}$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{co}$  e  $f_v$  da Amostra 1.

CP	$\rho_{ap(12\%)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{co}$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	CP	$f_v$ [MPa]
1C1	822	67,9	27129	1S1	13,5
1C2	857	75,5	25608	1S2	15,1
1C3	869	70,9	16005	1S3	15,0
-	-	-	-	1S4	16,6
$\bar{x}$	849	71,5	22914	$\bar{x}$	15,0
s	24	3,8	6032	s	1,3
CV	3	5,3	26	CV	8,4

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de  $\rho_{ap(12\%)}$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{co}$  e  $f_v$  da Amostra 2.

CP	$\rho_{ap(12\%)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{co}$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	CP	$f_v$ [MPa]
2C1	694	42,9	8837	2S1	17,7
2C2	725	54,0	11525	2S2	16,6
2C3	871	57,6	11197	2S3	17,0
2C4	940	38,3	6388	2S4	20,8
$\bar{x}$	808	48,2	10520	$\bar{x}$	18,0
s	117	9,1	1466	s	1,9
CV	15	18,8	14	CV	10,6

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de  $\rho_{ap(12\%)}$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{co}$  e  $f_v$  da Amostra 3.

CP	$\rho_{ap(12\%)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{co}$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	CP	$f_v$ [MPa]
3C1	780	55,5	31821	3S1	10,6
3C2	851	59,4	29705	3S2	7,8
3C3	848	74,6	21371	3S3	12,7
-	-	-	-	3S4	17,4
$\bar{x}$	826	63,2	27632	$\bar{x}$	12,1
s	41	10,1	5525	s	4,1
CV	5	16,0	20	CV	33,6

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de  $\rho_{ap(12\%)}$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{co}$  e  $f_v$  da Amostra 4.

CP	$\rho_{ap(12\%)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{co}$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	CP	$f_v$ [MPa]
4C1	724	48,6	32699	4S1	7,1
4C2	825	74,1	16933	4S2	14,3
4C3	829	61,6	17954	-	-
$\bar{x}$	793	61,4	22529	$\bar{x}$	10,7
s	59	12,7	8823	s	5,1
CV	7	20,7	39	CV	47,7

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de  $\rho_{ap(12\%)}$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{co}$ ,  $f_v$ ,  $f_{t0}$  e  $E_{t0}$  da Amostra 5.

CP	$\rho_{ap(12\%)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{co}$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	CP	$f_v$ [MPa]	CP	$f_{t0}$ [MPa]	$E_{t0}$ [MPa]
5C1	819	63,3	16318	5S1	12,2	5T1	18,2	11467
5C2	882	73,0	17407	-	-	5T2	34,3	23558
5C3	835	62,3	26809	-	-	5T3	60,2	16543
-	-	-	-	-	-	5T4	52,9	17446
-	-	-	-	-	-	5T5	53,5	17385
$\bar{x}$	845	66,2	20178	$\bar{x}$	12,2	$\bar{x}$	43,8	17464
s	33	5,9	5768	-	-	s	17,3	4936
CV	4	8,9	29	-	-	CV	39,4	28

Na Tabela 10, os valores médios obtidos em todos os ensaios são apresentados juntamente com os valores médios fornecidos pela NBR 7190 (1997) para efeito de comparação.

Tabela 10 - Comparativo resultados obtidos e valores médios usais fornecidos pela NBR 7190 (1997)

Espécie	Amostras ensaiadas					NBR 7190 - Anexo E				
	$\rho_{ap(12\%)}$ kg/m <sup>3</sup>	$f_{co}$ [MPa]	$f_{t0}$ [MPa]	$f_v$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]	$\rho_{ap(12\%)}$ kg/m <sup>3</sup>	$f_{co}$ [MPa]	$f_{t0}$ [MPa]	$f_v$ [MPa]	$E_{co}$ [MPa]
Guaruaia	815	62,8	43,8	14,3	18911	919	62,4	70,9	15,5	17212

Na mesma tabela, pode-se observar que os valores médios de resistência e rigidez obtidos das amostras ensaiadas apresentaram-se próximos aos apontados pela NBR 7190 (1997) para os ensaios de compressão paralela às fibras e cisalhamento, mas valores médios bem inferiores para a resistência à tração paralela às fibras. O módulo de

elasticidade na compressão paralela às fibras também foi superior ao módulo de elasticidade apontado na NBR 7190 (1997).

Esses valores mostraram-se um pouco contraditórios já que com a perda de massa decorrente da termodegradação se esperava que houvesse a diminuição de todas as forças, como apontado por Figueroa e Moraes (2009) e no Eurocode 5 que concluem que a temperatura influencia de forma inversa as propriedades mecânicas da madeira.

Os resultados mostrados na Tabela 11 mostram a variação de cada amostra em relação aos valores médios usuais apontados na NBR 7190/97. Nela observa-se que as peças, mesmo com densidades mais baixas, em determinados tipos de ensaios obtiveram valores de resistência superiores, enquanto para outros inferiores, variando em uma mesma amostra.

Tabela 11 - Variação dos resultados obtidos por amostra em relação ao valor médio usual apontado na NBR 7190 (1997).

	Variação $P_{ap(12\%)}$	Variação $f_{co}$	Variação $E_{co}$	Variação $f_v$	Variação $f_{t0}$
Amostra 1	-8%	15%	33%	-3%	-
Amostra 2	-12%	-23%	-39%	16%	-
Amostra 3	-10%	1%	61%	-22%	-
Amostra 4	-14%	-2%	31%	-31%	-
Amostra 5	-8%	6%	17%	-22%	-38%

A Figura 34 faz uma análise um pouco mais refinada em relação a cada amostra, ao apresentar os valores de resistência à compressão paralela às fibras variando ao longo de sua extensão, da região da amostra mais degradada (à esquerda) para a menos degradada (à direita).

Nesse gráfico observa-se que corpos de prova retirados das extremidades mais influenciadas pela ação do fogo, como previsto, obtiveram, em geral, valores de resistência mais baixos. Entretanto, corpos de prova retirados da extremidade oposta, menos influenciadas pela ação do fogo, não obtiveram os melhores resultados para três das cinco amostras analisadas.

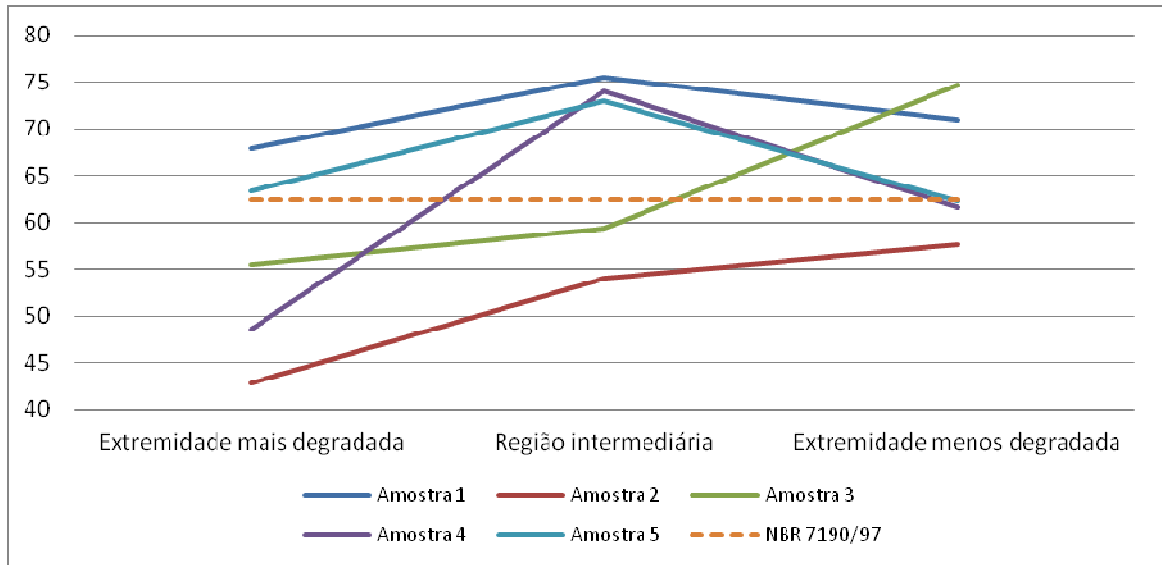


Figura 34 - Valores de  $f_{c0}$  ao longo de cada amostra

Ainda em relação à Figura 34, observa-se que houve uma tendência de valores mais altos do que os estabelecidos pela NBR 7190/1997 para regiões das amostras que provavelmente sofreram pouca influência do calor.

Apesar da aparente diferença nos valores de resistência, de uma extremidade à outra da amostra, fazendo-se uma análise estatística através da análise de variância dos dados e do teste de Tukey, pode-se dizer que não houve diferença estatística significativa entre os mesmos (Figura 35), a um nível de 5% de confiabilidade. Entretanto, tal resultado pode se dever ao número reduzido de corpos de prova ensaiados.

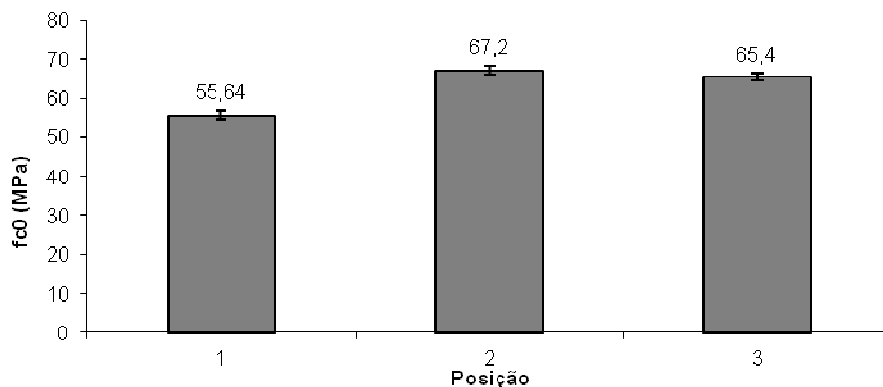


Figura 35 – Análise estatística de  $f_{c0}$  médio ao longo das amostras.

A relação entre densidade e  $f_{c0}$  foi analisada através de um gráfico de dispersão, sendo em seguida plotada uma reta de tendência, onde se pode observar uma interação considerada moderada entre essas duas variáveis. A Figura 36 mostra essa correlação.

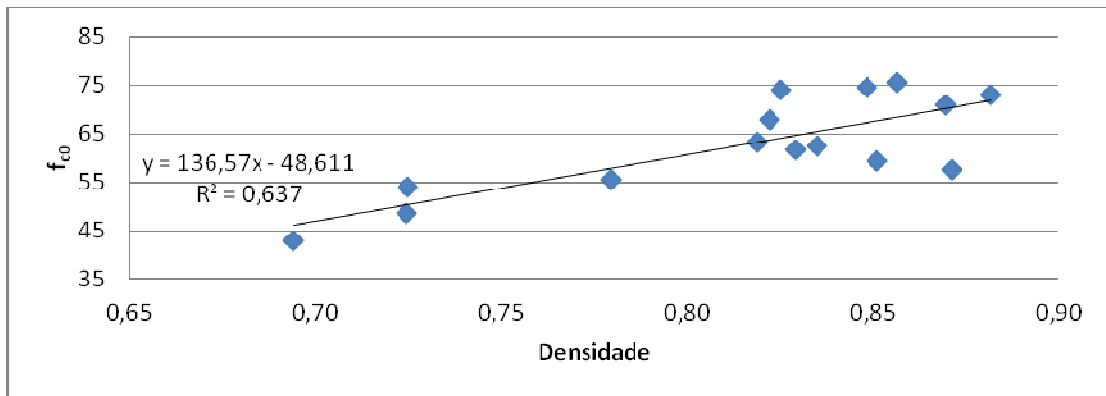


Figura 36 – Correlação entre  $f_{c0}$  e densidade.

Analogamente procedeu-se a análise com outras variáveis, como por exemplo, a porcentagem de área de carvão existente nos corpos de prova de compressão paralela às fibras, de forma que a perda de massa decorrente da degradação térmica, afetou as propriedades de resistência da madeira à compressão paralela às fibras, como demonstrado na Figura 37.

Pinto e Calil Jr. (2010) explicam que o carvão não possui capacidade resistente. Portanto, quanto maior a formação do carvão, menor será a capacidade do elemento estrutural resistir as solicitações a que é submetido.

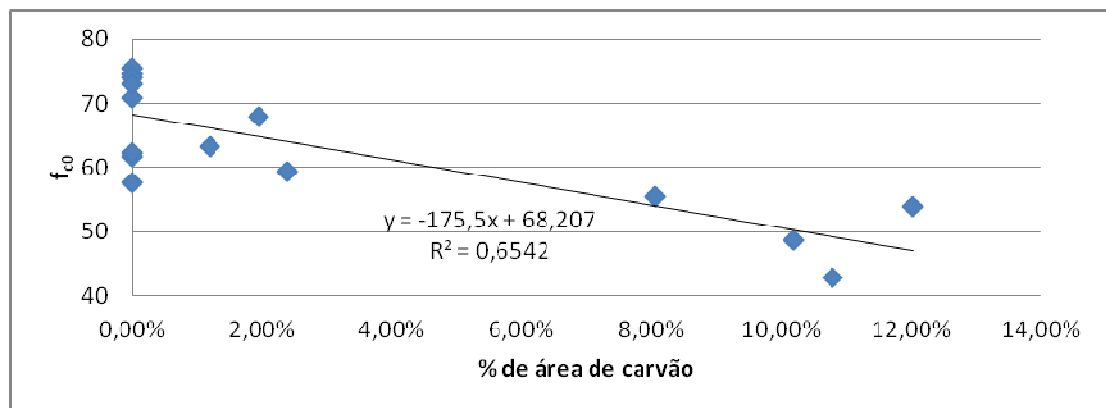


Figura 37 – Correlação entre  $f_{c0}$  e porcentagem de carvão.



As propriedades mecânicas da madeira também parecem sofrer, mesmo que em menor correlação, influência da camada de pirólise, pois como mostra a Figura 38, quanto maior foi esta camada, menor foi a resistência à compressão paralela às fibras da peça. Pinto e Calil Jr. (2010) explicam que as mudanças nas propriedades mecânicas a partir dos 60 °C já são significativas nesta região devido à degradação dos seus principais polímeros.

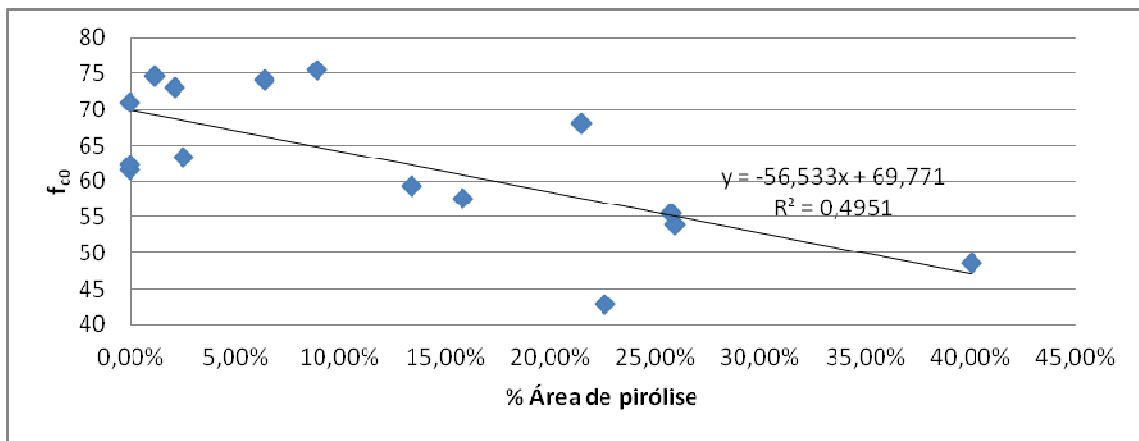


Figura 38 – Correlação entre  $f_{c0}$  e porcentagem de pirólise.

Pinto e Calil Jr. (2010) ainda citam que ao tempo que ocorre a diminuição da resistência da madeira, ocorre a alteração da rigidez, em decorrência do gradiente térmico. Figueroa e Moraes (2009) apontam para valores de redução encontrados na literatura internacional em torno de 30 a 50% do módulo de elasticidade relativo para temperaturas a partir do 250 °C.

Nos ensaios deste trabalho foi constatada esta correlação, entretanto em nível considerado bem baixo (Figura 39). Esta avaliação, entretanto, deve ser tomada com cautela pela dificuldade de mensuração da camada de pirólise existente na madeira, como explicado no capítulo anterior.

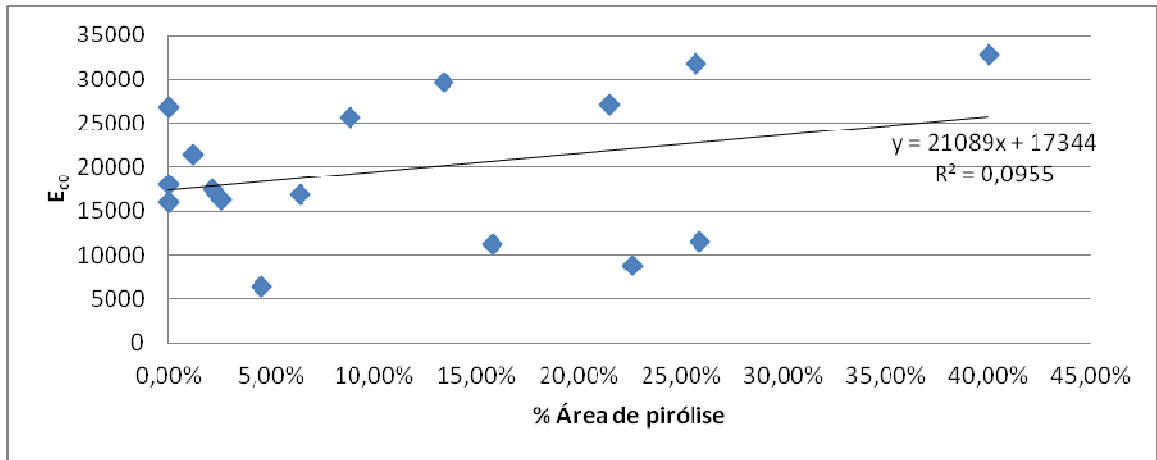


Figura 39 - Correlação  $E'_{co}$  e porcentagem de pirólise.

Em relação aos ensaios de cisalhamento, analisando o resultado de todos os corpos de prova e traçando o gráfico da Figura 40, observa-se a existência de uma correlação bem fraca entre densidade e  $f_v$ .

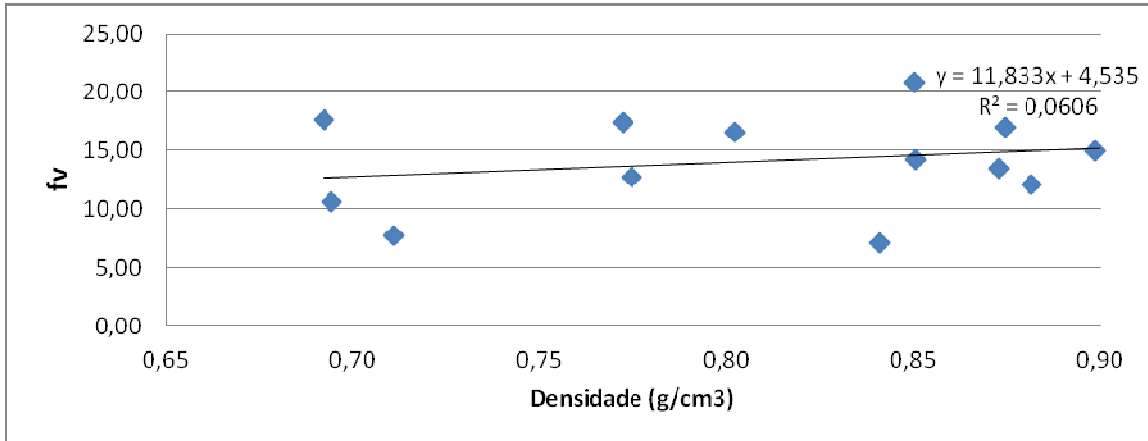


Figura 40 – Correlação entre  $f_v$  e densidade.

Analisando os resultados de  $f_v$  para todos os corpos de prova, percebe-se que a amostra 2 apresentou valores de  $f_v$  superiores em relação às demais amostras como se verifica na Figura 41.

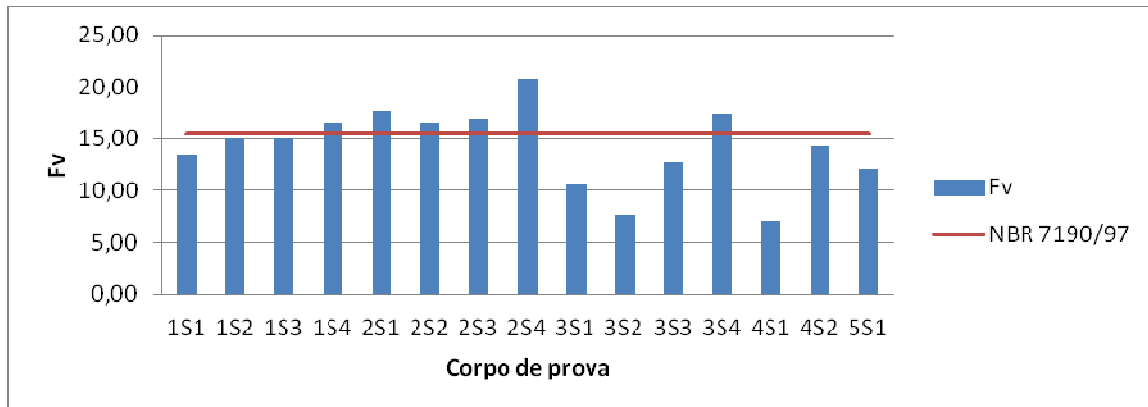


Figura 41 – Comparativo dos valores obtidos nos ensaios e a NBR 7190/97.

Todos os corpos de prova da amostra 2 apresentaram resistência ao cisalhamento superior ao valor médio usual da NBR 7190/97, principalmente corpos de prova com extrema incidência de carvão, explicando em parte a baixa interação entre as variáveis  $f_v$  e densidade.

A Figura 42 mostra o estado do corpo de prova 2S1, apesar de ser o mais degradado de todos os corpos de prova da amostra, obteve o segundo melhor resultado de todos os ensaios de cisalhamento realizados, atingindo o valor de resistência de 17,65 MPa.



Figura 42 - Detalhe do corpo de prova 2S1.

Essa correlação fraca pode ser explicada ainda devido ao comportamento imprevisível de alguns corpos de prova, que mesmo sem a presença de carvão obtiveram valores mais baixos para  $f_v$ , como pode ser visto na Figura 43.

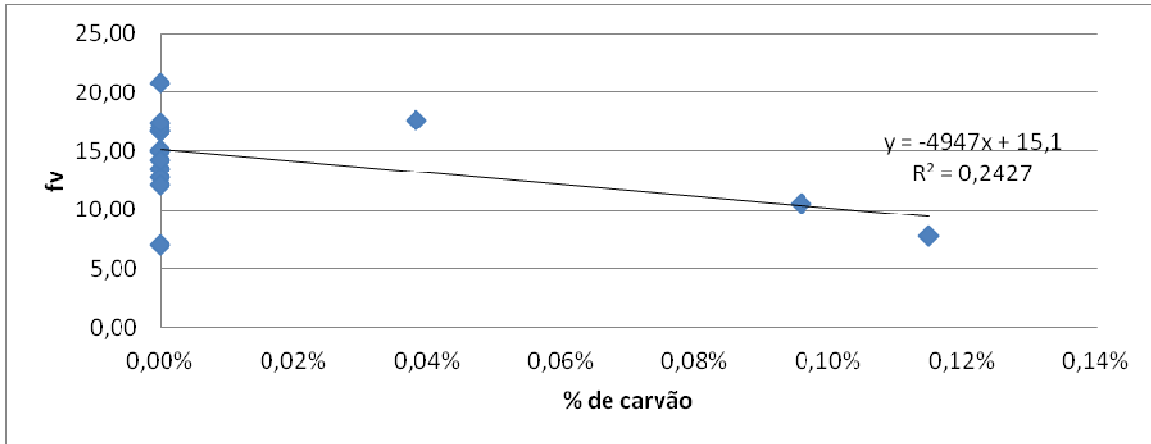


Figura 43 - Correlação entre  $f_v$  e porcentagem de carvão.

A influência da camada de pirólise sobre  $f_v$  pode ser vista na Figura 44, onde se obteve valor de  $R^2$  de 0,25, ou seja, uma correlação considerada fraca. Figueroa e Moraes (2010), no entanto, citam em seus estudos com madeira de Paricá que a influência da temperatura sobre o cisalhamento é menor do que aquela exercida sobre a compressão paralela às fibras.

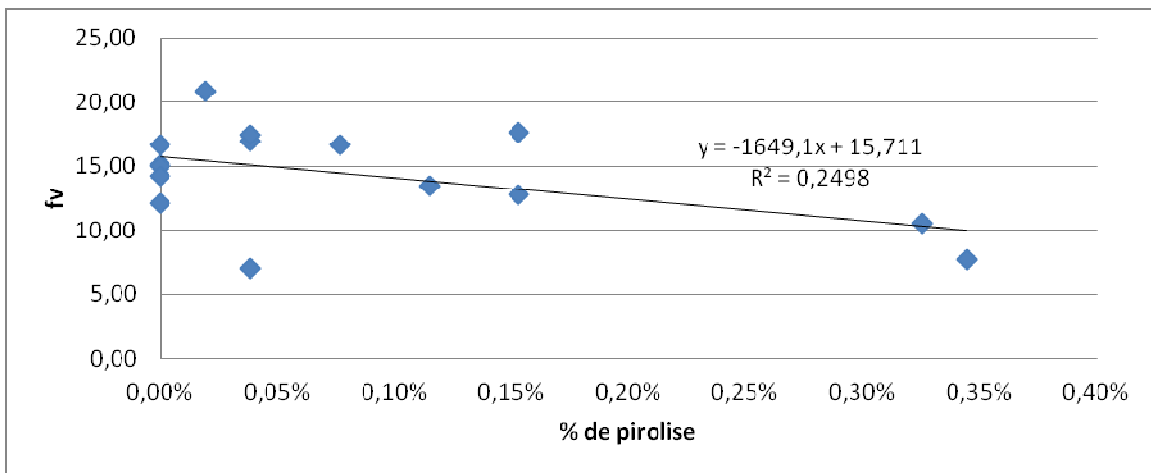


Figura 44 – Correlação entre  $f_v$  e porcentagem de pirólise

Por fim, a Figura 45 mostra o comportamento da amostra 5 em relação à densidade e resistência à tração paralela às fibras. Nela, verifica-se uma tendência de aumento da resistência de  $f_{t0}$ , que tende a se estabilizar no meio da peça.

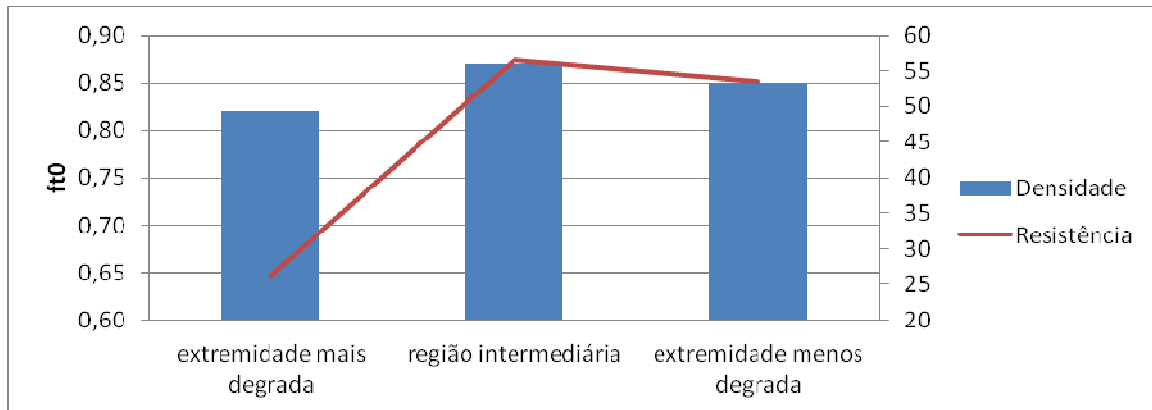


Figura 45 - Amostra 5 (densidade e  $f_{t0}$ )

Assim como já havia ocorrido nos ensaios de compressão, notou-se uma tendência dos corpos de prova situados mais próximos das extremidades das peças apresentarem valores de resistência mais baixos, o que já foi observado por Pinto (2005) ao avaliar que a degradação é ligeiramente maior no topo, seguida pela quina e posteriormente pela face da peça.

Outro fator que contribui para a perda da capacidade resistente da peça, além da formação do carvão, é a redução das propriedades mecânicas na seção remanescente. Para o Eurocode 5 (2002) se a taxa de carbonização for  $b_0$  (unidimensional – fogo em apenas uma das faces) o efeito de arredondamento da quina da seção não está incluso.

Assim, o valor de  $b_0$  é fornecido no Eurocode 5 para diversos tipos de madeira (Quadro 4) que variam entre 0,5 a 0,8 mm/min. Na ausência de dados específicos para a madeira de Guaruaia, utiliza-se o valor de 0,5 para madeira maciça de folhosa com densidade  $\geq 450$ .

O dimensionamento dos elementos estruturais adota simplesmente o valor da espessura nominal da peça ( $x_c$  da Equação 5), assim para um caibro de seção 5 x 6 cm para ser consumido totalmente seria necessário, segundo a Equação 4:

$$t = \frac{60mm}{0,55} = 109 \text{ minutos}$$

Logo, a temperatura do incêndio alcançada, estimada pelas Figuras 15 e 16 foi de aproximadamente 1000 °C.

Como se vê, o estudo de uma cena de incêndio real não está limitado apenas à descoberta da causa ou da determinação se o incêndio foi criminoso ou acidental. Ela pode chegar a ter um sentido mais amplo, chegando à engenharia de segurança contra incêndio.

Com base em trabalhos do tipo que prevê o início para estudos mais aprofundados, a indústria madeireira pode melhorar seus produtos e atualizar normas de proteção contra incêndio.

Certos detalhes construtivos devem ser contemplados no projeto de habitações visando à proteção dos seus elementos estruturais. Já o desempenho de peças de madeira perante o fogo deve ser melhorado através das modificações químicas, bioquímicas e físicas dos seus elementos constituintes, os polímeros.

No tratamento contra o calor, por exemplo, podem ser empregadas substâncias químicas, como vernizes ou tintas, que revistam a madeira e melhore sua propriedade de propagação do fogo. Além disso, utilizando vácuo ou sobrepressão, a madeira pode ser impregnada com algum tipo de retardador de fogo e, no caso de painéis particulados, esta substância pode ser já adicionada durante seu processo de fabricação.

Pesquisas em relação aos nanocompósitos também pode ser uma alternativa com a criação de uma espécie de camada isolante que proteja os produtos da madeira da degradação do fogo. Enfim, trata-se de um ramo promissor, onde o lançamento de produtos adequados ao fim pode alargar de vez a utilização da madeira como material construtivo.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo como referência os resultados encontrados, especificamente para os materiais e procedimentos adotados no presente trabalho, pôde-se concluir que:

- A redução das propriedades mecânicas de resistência ocorreu devido principalmente à diminuição gradual da seção resistente, substituída pelo carvão, efeito provável da degradação térmica dos componentes da madeira.

- A redução em relação às propriedades à temperatura ambiente foi considerável, tendo em vista o comparativo feito com os valores usuais estabelecidos pela NBR 7190/07 para a espécie em questão.

- A influência da temperatura sobre o cisalhamento foi menor em relação às resistências na tração e compressão paralela às fibras.

- A taxa de carbonização da madeira é um elemento útil para interpretar cenas de incêndio. Um investigador pode observar o padrão de queima para determinar o foco do incêndio e medir a profundidade de carvão. A taxa de carvão irá permitir o cálculo do tempo de exposição e a temperatura mínima alcançada no incêndio.

- O tempo de duração do incêndio apresentado neste trabalho, em específico, de acordo com dados da literatura, foi de aproximadamente duas horas, confirmando o que foi relatado por testemunhas do sinistro.

- A temperatura estimada alcançada neste incêndio foi cerca de 1000 °C.

- Em geral, apesar das muitas variáveis envolvidas, os resultados baseados em madeiras de um incêndio real mostraram consonância com os fornecidos pela literatura em simulações de incêndio. Por se tratar de um estudo de caso, indica-se o prosseguimento de pesquisas nessa linha de investigação com um maior número de corpos de prova e com outras espécies de madeira, em laboratório com controle do experimento, bem como da análise termogravimétrica e química após a madeira passar por altas temperaturas.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 107 p.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de Incêndio**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU 2006: INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SUSTENTABILIDADE. São Paulo: FAU/USP, 2006. 13 p.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. **Eurocode 5**: design of timber structures, part 1-2: general rules-structural fire design. European Committee for standardization, Bruxelas, 2002. 74 p.

FIGUEIREDO, L. M. B. **Projeto e construção de pilares mistos aço-concreto**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. IX, p. 157-174, out/dez 2009.

\_\_\_\_\_. **Fatores de redução das propriedades mecânicas da madeira devidos a temperaturas elevadas**. In: XII EBRAMEM, Lavras, Julho 2010. 8 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Fichas de Características das Madeiras Brasileiras**. 2a ed. São Paulo: IPT, 1989. 418p. (publicação IPT N° 1791).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834**. Fire-resistance tests – Elements of building construction, 1975. 16 p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. de. **Química da Madeira** (Apostila). UTFPR - Universidade Federal do Paraná. 3ª ed. Curitiba/PR, 2005. p. 86.

LEVAN, S. L. **Thermal Degradation**. SCHNIEWIND, A. P. (Ed.): Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials Exeter., Elmsford, NY, n. 1, p. 271-273, 1989.



MADY, F. T. M. A condutividade térmica na madeira. **REVISTA DA MADEIRA**, n. 112, Abril 2008.

ÖSTMAN, B.; TSANTARIDIS, L.; HAKKARAINEN, T.; MIKKOLA, E.; BRUMER, H.; PIISPANEN, P.. **InnoFireWood – Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications**. Swedish Institute for Wood Technology Research. Stockholm, 2005.

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. Dissertação (Mestre em Arquitetura) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

\_\_\_\_\_. Taxa de carbonização da madeira x resistência ao fogo. **Revista Técnica**. Ed. 92. Nov, 2004.

\_\_\_\_\_. **Determinação de um Modelo de Taxa de Carbonização Transversal a Grã para o Eucalyptus Citriodora e Eucalyptus Grandis**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PINTO, E. M.; CALIL JR., C. Ensaio para avaliação do comportamento de materiais expostos ao fogo: resistência e reação. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, set/dez 2002.

\_\_\_\_\_. **O comportamento da madeira exposta ao fogo**. In: XII EBRAMEM, Lavras/MG, Julho 2010.

ROWELL, R. M.; PETERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABADALA, M. A. Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL, R. M (Org). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005. Cap. 3, p. 35-73.

SZUCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A. do; MORAES, P. D. de. **Estruturas de Madeira (Apostila)**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. 1 ed. Florianópolis/SC, p. 186. 2006.

WHITE, R. H.; NORDHEIM, E. V. Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure. **Fire Technology**, v. 28, n. 1, p. 5-27, feb 1992.