

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

ANDRÉ GOMES DE LIMA

**ESTUDO DA RIGIDEZ DA MADEIRA DE CAMBARÁ  
(*Qualea* sp.) SUBMETIDA A ALTAS TEMPERATURAS**

Itapeva - SP  
2012

ANDRÉ GOMES DE LIMA

**ESTUDO DA RIGIDEZ DA MADEIRA DE CAMBARÁ  
(*Qualea* sp.) SUBMETIDA A ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientadora: Profª. Drª. Elen Aparecida M. Morales

Itapeva - SP  
2012

## FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, André Gomes de

L732e      Estudo da rigidez da madeira de Cambará (*Qualea* sp.)  
submetida a altas temperaturas/ André Gomes de Lima – – Itapeva,  
2012

54 f.: il. 30 cm

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial  
Madeira apresentado ao Campus Experimental de Itapeva –  
UNESP, 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 -- Proteção contra o fogo. 2. Altas temperaturas. 3.  
Incêndios. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial  
Madeira.

CDD 628.922

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

**ESTUDO DA RIGIDEZ DA MADEIRA DE CAMBARÁ  
(*Qualea* sp.) SUBMETIDA A ALTAS TEMPERATURAS**

**ANDRÉ GOMES DE LIMA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO  
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi  
Coordenador de Curso

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dra. Elen Aparecida M. Morales  
Orientadora – Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros  
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dra. Maristela Gava  
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

*A minha querida e amada família, nas  
pessoas de meus pais que deram início a  
minha vida e a minha noiva que dará  
continuidade na formação de uma nova  
família.*

## AGRADECIMENTOS

Ah Deus como agradecer o que fez por mim, sem eu merecer vem provar o seu amor sem fim, as vozes de um milhão de anjos não poderiam expressar a gratidão que sinto em meu ser. A Deus seja a glória.

A minha família que sempre esteve ao meu lado, me apoiando, me incentivando e me inspirando a sempre fazer o meu melhor. Nunca deixando que as pedras no caminho me deixassem ao chão.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Elen Aparecida Martines Morales que sem hesitar esteve sempre pronta a ajudar e auxiliar nas soluções necessárias, conforme foram surgindo os desafios, para elaboração deste trabalho, tornando-se mais que uma professora e mestre e sim uma amiga.

Na pessoa do Prof<sup>o</sup>. Dr. Ricardo Marques Barreiros estendo meu muito obrigado a todos os professores que auxiliaram na minha formação, pelos seus ensinamentos, pela paciência, pela atenção e dedicação dispensados a mim, contribuindo não somente para minha formação acadêmica, mas sim para formação de um caráter mais digno.

Nas pessoas dos Técnicos Brito e Waldecir agradeço a todos os demais funcionários da UNESP/Itapeva que proporcionaram condições para execução deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de classe que sempre estiveram dispostos a me ajudar prestando auxílio em qualquer dificuldade.

Aos meus companheiros de farda me faltam palavras para agradecer todos os esforços dedicados a formação e conclusão desta etapa da minha vida. Foram realmente mais que amigos, foram irmãos sempre presentes nas alegrias e tristezas.

E por fim a minha companheira, Luana, que confiou em mim e sempre esteve ao meu lado, muitas vezes abdicando de suas próprias vontades. Todos os demais foram de suma importância para execução deste trabalho e sem eles nada teria sido feito, mas a minha querida Luana agradeço não somente pelo apoio e sim por fazer parte da minha vida sendo minha maior motivação.

*“Do atrito de duas pedras chispam  
faíscas; das faíscas vem o fogo; do fogo  
brota a luz”.*

*Victor Hugo*

## RESUMO

O trabalho apresenta um estudo da rigidez da madeira de Cambará (*Qualea* sp.) exposta a elevadas temperaturas, procurando verificar aspectos de segurança contra incêndio nas estruturas de telhados, avaliando um método alternativo de estudo das propriedades mecânicas da madeira submetidas a altas temperaturas. O trabalho foi desenvolvido no Campus Experimental de Itapeva – UNESP. Para exposição a elevadas temperaturas foi utilizada uma Mufla com os corpos de prova sendo submetidos, um por vez, a partir dos 200°C, elevando-se a temperatura de 100°C em 100°C até serem alcançados os 1000°C ou até os corpos de prova resistirem o ensaio de compressão paralela às fibras. A máxima temperatura alcançada foi de 700°C, sendo que após essa marca os corpos de prova foram seccionados para continuidade nos estudos. O método utilizado assemelhou-se a um incêndio real e mostrou-se eficiente, visto que, de acordo com o Eurocode 5 (2002), a taxa de carbonização da madeira de Cambará em estudo foi semelhante ao que prescreve esse documento normativo.

**Palavras-chave:** Eurocode 5, NBR 7190/97, taxa de carbonização, propriedades mecânicas, segurança contra incêndio.

## ABSTRACT

The paper presents a study of stiffness of wood Cambará (*Qualea* sp.) exposed to high temperatures, trying to verify aspects of fire safety in roof structures evaluating an alternative method of study of the mechanical properties of wood subjected to high temperatures. The study was conducted at the Campus Experimental de Itapeva - UNESP. For exposure to high temperatures muffle was used with the samples being subjected one at a time from 200°C rising to 100°C to 100°C, up to the 1000°C or even specimen withstand the test of compression parallel to grain. The maximum temperature reached was 700°C, and after that mark the specimens were sectioned to continue their studies. The method resembled a real fire and was efficient since, according to the Eurocode 5 (2002), the rate of carbonization of wood Cambará study was similar to that prescribes that the normative document.

**Keywords:** Eurocode 5, NBR7190/97, rate of charring, mechanical properties, fire safety.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tetraedro do fogo.....	13
Figura 2 - Formas de propagação de calor (a) convecção, (b) condução e (c) irradiação. Fonte: MFCB (2006). .....	18
Figura 3 - Pontos de fulgor, combustão e ignição. ....	19
Figura 4 - Reações sofridas nos combustíveis sólidos com a elevação da temperatura. ....	20
Figura 5 - Viga de madeira sustentando estrutura metálica. ....	23
Figura 6 - Carbonização em uma peça de madeira laminada colada. ....	24
Figura 7 - Relação entre a velocidade de combustão e a densidade da madeira. Fonte: Desconhecida. ....	25
Figura 8 - Carbonização da madeira (exposição de 15 minutos). ....	26
Figura 9 - Taxa de carbonização para algumas espécies de madeira Norte-Americanas de coníferas e folhosas, obtidas por meio de ensaio padronizado ASTM E-119 (1995). ....	27
Figura 10 - Taxa de carbonização para cálculo de madeira, $\beta_0$ e $\beta_n$ . ....	27
Figura 11 - Curva tempo x temperatura, ISO 834/75. ....	28
Figura 12 - Curva tempo x temperatura, ASTM E119/18. ....	29
Figura 13 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real.....	30
Figura 14 - Fluxograma: Aspectos a serem observados para controle de incêndio em edificações de madeira. ....	31
Figura 15 - Madeira <i>Qualea sp.</i> em suas faces tangencial (a) e radial (b) e em fotomicrografia aumentada em 10 vezes (c). ....	34
Figura 16 - Madeira da espécie <i>Qualea sp.</i> conhecida popularmente como Cambará.....	34
Figura 17 - Mufla com suporte de cerâmica. ....	35
Figura 18 - Corpos de prova do teste incinerados a 1000°C por 2 h e 16 min..	36
Figura 19 - Ensaio para comparação entre corpo de prova de 5 x 10 x 30 cm (a) com corpo de prova com 5 x 5 x 15 cm (b). ....	37
Figura 20 - Corpos de prova de dimensões 5 x 10 x 30 cm. ....	37
Figura 21 - Corpo de prova dentro da Mufla.....	39

Figura 22 - Peça seccionada ao meio para verificação da seção carbonizada e a seção de madeira efetiva. ....	40
Figura 23 - Corpos de prova ao iniciar os experimentos (a) e após serem expostos a 200°C (b), 300°C (c), 400°C (d), 500°C ( e), 600°C (f) e 700°C (g). 43	43
Figura 24 - Corpo de prova em chamas após abertura da Mufla aos 600°C, produzindo o efeito “Backdraft”. ....	44
Figura 25 - Corpos de prova 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) seccionados ao meio para verificação de seção carbonizada e efetiva. ....	45
Figura 26 - Gráfico da relação do módulo de elasticidade com a temperatura, com as áreas feitas por aproximação. ....	48
Figura 27 - Gráfico da relação do módulo de elasticidade com a temperatura, com as áreas feitas por estimativa a partir da perda de massa. ....	48
Figura 28 - Posicionamento das "garras" do extensômetro. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais em relação às dimensões, umidade, massa e a densidade dos corpos de prova. ....	42
Tabela 2 - Massa dos corpos após cada patamar de 100°C.....	44
Tabela 3 - Relação entre massas e áreas iniciais e finais dos corpos de prova. ....	46
Tabela 4 - Estimativa das áreas dos corpos de prova a partir do percentual de perda de massa.....	46
Tabela 5 - Módulo de elasticidade para cada corpo de prova ensaiado, com as áreas feitas por aproximação. ....	47
Tabela 6 - Módulo de elasticidade para cada corpo de prova ensaiado, com as áreas estimadas a partir da perda de massa. ....	47
Tabela 7 – Resistências e módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras dos corpos de prova testemunhas.....	49
Tabela 8 - Resistências e módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras obtidas dos corpos de prova após ensaio de 700°C. ....	50
Tabela 9 - Dados de $f_{t0}$ e $E_{t0}$ dos corpos de prova de tração paralela às fibras. ....	50

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	15
2.1 Objetivo geral .....	15
2.1.2 Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
3.1 O fogo .....	16
3.1.1 Calor.....	17
3.1.2 Combustível .....	19
3.1.2.1 Processos de queima .....	20
3.1.3 Comburente.....	21
3.1.4 Reação em cadeia.....	21
3.1.5 Fases do fogo.....	21
3.2 Relação fogo - madeira .....	22
3.3 Taxa de carbonização.....	25
3.4 Curva de incêndio padronizada.....	27
3.5 Proteção contra-incêndio .....	30
3.5.1 Proteção ativa .....	31
3.5.2 PROTEÇÃO PASSIVA .....	32
4. MATERIAIS E MÉTODO .....	33
4.1 Origem das amostras.....	33
4.2 Identificação botânica .....	33
4.3 Dimensões e confecção dos corpos de prova.....	34
4.4 Determinação do tempo .....	38
4.6 PROCEDIMENTO .....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
6. CONCLUSÃO.....	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

Ao se pensar em estruturas de madeira, um dos principais infortúnios que surge é o que diz respeito à combustibilidade da madeira. Por tratar-se de um combustível sólido, a madeira sofre grande preconceito em sua utilização na construção, em especial no Brasil, onde a cultura construtiva tange em sua maioria a construções de alvenaria.

A maioria das construções de madeira no país é formada por barracos advindos de comunidades carentes, as populares favelas, e a pequena parcela, que não se enquadra nas condições anteriormente citadas, são construções de alto padrão, que apresentam alto custo para sua implementação, deste modo sendo inviável para maioria da população.

Estes são alguns dos motivos pelos quais a madeira não é muito utilizada de forma mais ampla em edificações, remetendo a outros problemas como a falta de uma legislação específica que trate de construções em madeira e de incentivo a estudos do comportamento de estruturas de madeira submetidas ao fogo diferentemente de países europeus, que apresentam um “código” específico para utilização da madeira e a possível ocorrência de incêndios em tais estruturas.

Como a madeira é um material heterogêneo, a ocorrência de diferenças em suas propriedades mecânicas pode existir mesmo em peças de madeira retiradas de uma mesma árvore, explicitando, assim, a complexidade dos estudos relacionados a esse material e em suas diversas utilizações. Em situações de exposição a elevadas temperaturas, ocorrem mudanças na madeira, podendo ser mínimas como, por exemplo, a perda de água a extremas como a total calcinação do material.

Neste contexto, o presente trabalho procura averiguar variações nas propriedades mecânicas de uma espécie de madeira usual em estruturas de telhados, em especial na rigidez, buscando relações principalmente com o tempo, para o estudo de possíveis colapsos estruturais.

Realiza-se ainda uma revisão bibliográfica, que mostra o comportamento físico-mecânico da madeira exposta ao fogo ou a altas temperaturas e aspectos que possam tornar as edificações constituídas de

madeira mais seguras, como proteção passiva e proteção ativa. Destaca-se, assim, a importância de estudos como este, que mostre o comportamento da madeira em ocorrência de incêndio, para prever as diversas situações que possam ocorrer em uma estrutura, para minimizar a perda do patrimônio e melhorar as condições de segurança, tanto dos ocupantes da edificação em uma possível fuga, como das equipes de socorro que estarão prestando auxílio, valorizando esse tipo de utilização para esse material tão nobre.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Estudar a variação da rigidez da madeira de Cambará (*Qualea* sp.) submetida a temperaturas elevadas de 200 °C a 700 °C, em escala laboratorial, através da análise dos módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras.

#### 2.1.2 Objetivos específicos

- Estudar o comportamento mecânico, especificamente a rigidez, a perda de massa e a mudança nos aspectos visuais da madeira de Cambará, submetida a uma situação próxima a de um incêndio real.

- Obter dados sobre o comportamento mecânico da madeira de Cambará para auxiliar na Segurança contra incêndio em estruturas.

- Avaliar um método alternativo de estudo de madeiras submetidas à altas temperaturas.

- Obter dados, para estimativa do colapso estrutural, com elevação da temperatura variando de 100°C, avaliando o tempo ideal para prestar socorro em uma edificação em ocorrência de incêndio.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O fogo

Para o efetivo controle de um incêndio, o conhecimento da natureza química e física do fogo é essencial. Informações sobre fontes de calor, composição e características dos combustíveis e as condições necessárias para combustão são imprescindíveis para o entendimento de sua natureza.

De acordo com o Manual de Fundamentos do Corpo de Bombeiros – MFCB (2006), combustão é uma reação química de oxidação, auto-sustentável, com liberação de luz, calor, fumaça e gases.

Didaticamente adota-se o tetraedro do fogo para exemplificar e explicar a combustão. A Figura 1 representa o tetraedro do fogo, apresentando os quatro elementos do fogo, que são: Calor, Combustível, Comburente e Reação Química em Cadeia.



Figura 1 - Tetraedro do fogo.

Fonte: MFCB (2006).

### 3.1.1 Calor

Calor é definido como sendo a energia térmica em trânsito e que flui de um corpo para outro em razão da diferença da temperatura existente entre eles, sempre do corpo mais quente para o corpo mais frio. O calor pode ser gerado através de energia química, elétrica, mecânica e nuclear (MFCB, 2006).

É uma forma de energia que provoca alterações químicas e físicas nos corpos e causa efeitos fisiológicos nos seres vivos. A elevação da temperatura ocorre em consequência do aumento de intensidade do calor. Fisicamente aumenta o volume dos corpos e altera o estado físico da matéria, quimicamente muda o estado químico da matéria e dentre seus efeitos aos seres vivos incluem-se desidratação, fadiga, insolação e queimaduras, que podem até levar a morte.

O calor pode se propagar de três maneiras diferentes. A primeira forma de propagação é a convecção, que é dada pela transferência de calor através da movimentação de massas de gases, a segunda forma é a condução, que é a transferência de calor através de corpos sólidos de molécula a molécula e a terceira é a irradiação, que é a transmissão de calor por ondas de energia calorífica que se deslocam através do espaço, ocorrendo no vácuo. A Figura 2 ilustra as formas de propagação de calor por convecção (a), condução (b) e irradiação (c).

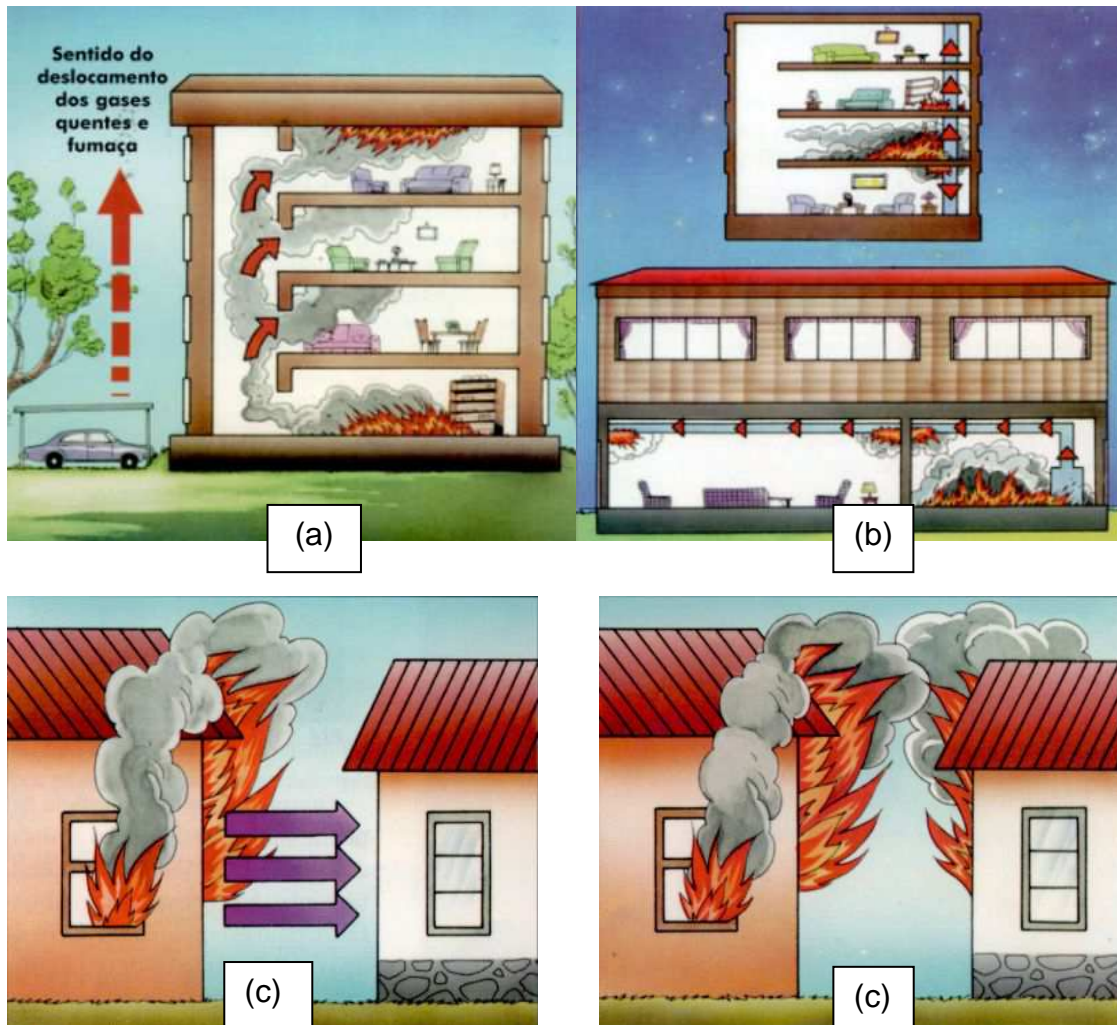


Figura 2 - Formas de propagação de calor (a) convecção, (b) condução e (c) irradiação. Fonte: MFCB (2006).

Os combustíveis são transformados pelo calor que, com auxílio do oxigênio, resultam em combustão, e cada um deles apresenta três pontos distintos, especiais e variáveis com o aumento da temperatura. Um deles é o ponto de fulgor, em que mesmo com a presença de uma fonte externa de fogo a combustão não se mantém, o outro é o de combustão, onde com uma fonte externa de fogo o incêndio se mantém auto-sustentável e o terceiro é o de ignição, em que a combustão se inicia mesmo sem auxílio algum de fonte externa, devido à elevação da temperatura. A Figura 3 ilustra os pontos de fulgor, combustão e ignição.

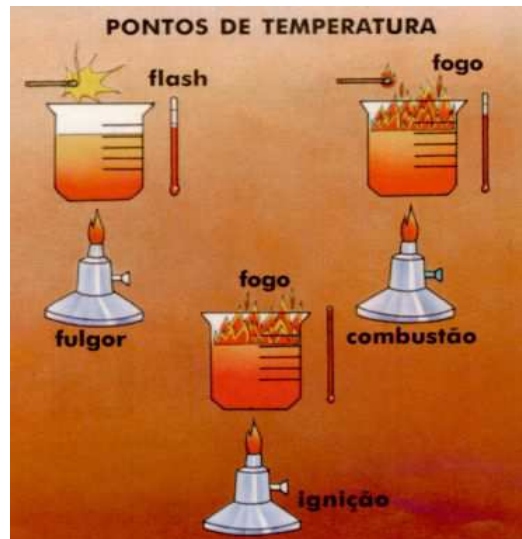


Figura 3 - Pontos de fulgor, combustão e ignição.  
Fonte: MFCB (2006).

### 3.1.2 Combustível

Toda substância capaz de queimar e alimentar a combustão é denominada combustível. Os combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos e em geral precisam passar para o estado gasoso para combinar-se com o oxigênio, assim completando a reação de combustão. A velocidade de combustão depende diretamente da afinidade do combustível em combinar-se com o oxigênio e de sua área de contato com o oxigênio.

Alguns dos combustíveis sólidos, antes de transformarem-se em gases, passam pelo estado líquido e posteriormente ao gasoso, como ferro, parafina ou cobre, sendo que os combustíveis sólidos queimam em superfície e em profundidade deixando resíduos. Os líquidos inflamáveis escoam facilmente e assumem a forma de seu recipiente, assim fazendo com que o fogo propague rapidamente. Eles queimam somente na superfície e não deixam resíduos.

Os combustíveis gasosos não apresentam volume definido e o seu peso em relação ao ar deve ser conhecido para previsão de seu trajeto e acúmulo. Os gases, para entrarem em combustão, devem atender a uma mistura ideal com o ar atmosférico, que é definida pelos limites de inflamabilidade de cada gás.

### 3.1.2.1 Processos de queima

Para ocorrer a combustão, é necessário que os combustíveis passem para o estado gasoso, processo que ocorre pela elevação da temperatura. Gases combustíveis são obtidos a partir de combustíveis sólidos pela pirólise, que consiste na decomposição química de uma matéria ou substância através do calor. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 indica as reações sofridas nos combustíveis sólidos com a elevação da temperatura.

<b>PIRÓLISE</b>	
Temperatura	Reação
200 °C	Produção de vapor d'água, dióxido de carbono e ácidos acético e fórmico.
200 °C – 280 °C	Ausência de vapor d'água – pouca quantidade de monóxido de carbono – a reação ainda está absorvendo calor.
280 °C – 500 °C	A reação passa a liberar calor, gases inflamáveis e partículas; há a carbonização dos materiais (o que também liberará calor).
Acima de 500 °C	Na presença do carvão, os combustíveis sólidos são decompostos, quimicamente, com maior velocidade.

Figura 4 - Reações sofridas nos combustíveis sólidos com a elevação da temperatura. Fonte: MFCB (2006).

Como regra geral, os materiais combustíveis queimam no estado gasoso, ocorrendo a mudança em seu estado pela elevação da temperatura. Porém, existem algumas raras exceções como o enxofre e os metais alcalinos (potássio, cálcio, magnésio, etc.), que queimam diretamente no estado sólido.

### 3.1.3 Comburente

É o elemento que intensifica a combustão pela abundância de oxigênio. A atmosfera é formada aproximadamente por 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de outros gases. Quando os ambientes estão em suas composições normais a velocidade e maneira da combustão são completas.

Com o processo de queima em curso, o oxigênio é consumido e atingindo a faixa de concentração entre 16% e 8% a queima torna-se mais lenta, notam-se brasas e não mais chamas. Quando as concentrações atingem níveis menores que 8%, não há combustão.

### 3.1.4 Reação em cadeia

A reação em cadeia torna a queima auto-sustentável. O calor irradiado das chamas atinge o combustível e este é decomposto em partículas menores, que se combinam com o oxigênio e queimam, irradiando outra vez calor para o combustível, formando um ciclo constante (MFCB, 2006).

### 3.1.5 Fases do fogo

Um incêndio apresenta três fases, sendo denominadas fases do fogo. A primeira fase é a inicial, onde as temperaturas ainda não estão muito elevadas e o ambiente está começando a aquecer para que os combustíveis cheguem ao estado gasoso.

A próxima fase é denominada de queima livre, onde os gases aquecidos espalham-se pelo ambiente e a concentração de oxigênio ainda é favorável, sendo que nas regiões superiores a temperatura pode exceder 700°C. Nesta fase pode ocorrer um fenômeno denominado "Flashover" que é uma explosão que ocorre quando os diferentes combustíveis no ambiente atingem seu ponto de ignição simultaneamente.

A terceira fase é a de queima lenta, que como nas anteriores o oxigênio do ambiente continua sendo consumido e a temperatura continua

elevada. Devido ao ambiente estar pobre em oxigênio, a queima é incompleta e as chamas já não existem mais, a fumaça é mais escura e mais densa pelo fato de existirem moléculas de carbono livres no ambiente.

Com isso o ambiente esta propício para ocorrência de um fenômeno chamado “Backdraft”, que é uma explosão dada pela entrada abrupta de oxigênio no ambiente. Este fenômeno em especial deve sempre ser levado em conta, em um ambiente incendiado, ao procurar abrir acessos.

### 3.2 Relação fogo - madeira

Muitas vezes pensa-se, erroneamente, que a madeira é um material cuja resistência ao fogo é baixa. É sabido que a madeira é um material combustível e por isso o seu comportamento, em termos de reação ao fogo, pode ser débil (MARTINS, 2010).

De acordo com Moraes e Szücs (2000), a resistência de estruturas de madeira expostas ao fogo pode ser determinada com base na distribuição da temperatura no interior do elemento, na deformação e na resistência mecânica do material quando sob altas temperaturas, porém, pela falta de estudos em relação à influência do fogo nas propriedades das madeiras de diferentes espécies, fica difícil calcular com precisão a resistência ao fogo deste material.

Para Barreira e Fonseca (2008) a combustão da madeira é lenta e regular, e o seu comportamento é previsível, com isso em alguns países, o Corpo de Bombeiros a indica como principal material construtivo. Sendo um combustível sólido a madeira não arde diretamente, primeiro decompõe-se em gases que, expostos a elevadas temperaturas se convertem em chamas, que aquecem o material ainda não queimado, liberando mais gases, tornando a reação auto-sustentável.

Quando a seção do componente em madeira é robusta, e exposta ao fogo, forma-se uma camada superficial de carvão, que atua como uma espécie de isolante, protegendo as regiões centrais da peça impedindo a propagação do calor para o interior da seção. Assim a degradação do material

se realiza a uma menor velocidade, e então sua capacidade resistente torna-se favorável em relação a outros materiais (BARREIRA; FONSECA, 2008).

Isto se deve ao fato da madeira conservar suas propriedades físicas, mesmo após ter sido exposta a elevadas temperaturas, pois seu lenho posicionado ao centro manteve-se a baixas temperaturas. A temperatura na camada da madeira carbonizada que está em contato com o núcleo da seção é de aproximadamente 300°C, conforme o Eurocode 5 (20 02), EC5.

Segundo Barreira e Fonseca (2008) as propriedades térmicas da madeira relacionam-se com o teor de umidade, a orientação da grã, a composição química e a permeabilidade, sendo função da temperatura. Com base nestes fatores, é possível avaliar a segurança em estruturas afetadas por incêndio e ainda prever com precisão o tempo de resistência dos materiais antes do colapso estrutural.

Comparando-se com outros elementos tradicionais de construção, verifica-se que a madeira apresenta uma excepcional resistência quando exposta a altas temperaturas, contrariamente ao que ocorre em estruturas metálicas, que pela ação do fogo são diminuídas suas propriedades mecânicas. A Figura 5 mostra claramente esta situação, em que uma viga de madeira sustenta a estrutura metálica, a falha na madeira só acontece pela perda, ou seja, pela carbonização, da seção existente.



Figura 5 - Viga de madeira sustentando estrutura metálica.

Fonte: Pignatta (2001).

A massa específica da madeira varia com a camada de carbonização, devido à degradação do material provocada pela pirólise do fogo. Esta zona não apresenta resistência efetiva fazendo com que exista uma redução da seção reta do componente. A seção reduz-se de uma quantidade igual em cada um dos lados em que for exposta ao fogo. E a profundidade de carbonização depende do tempo de exposição ao fogo. Essas características geométricas contribuem para verificar a capacidade de resistência ao fogo. A Figura 5 mostra a carbonização em uma peça de madeira laminada colada.

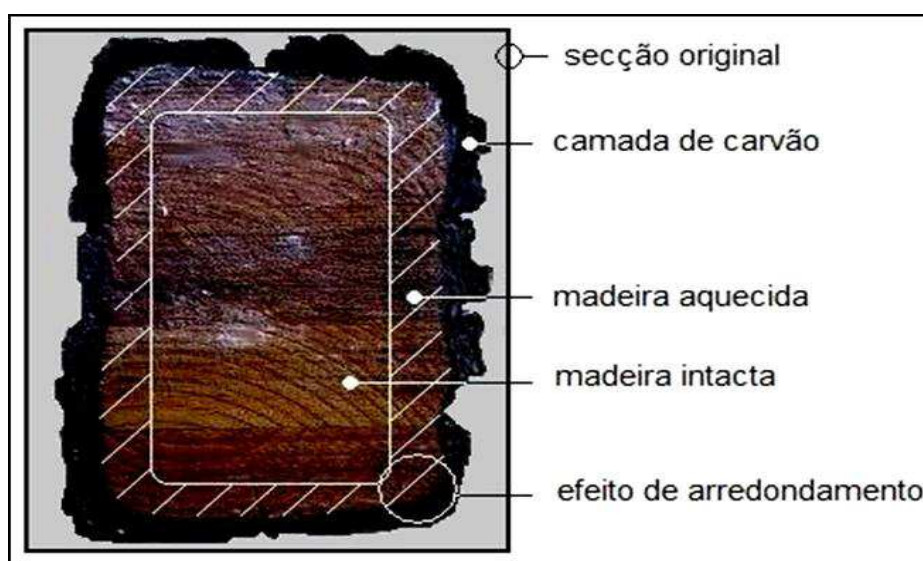


Figura 6 - Carbonização em uma peça de madeira laminada colada.  
Fonte: Pinto (2005).

De acordo com Negrão e Faria (2009), as estruturas de madeira, quando bem dimensionadas, conferem à estrutura global uma resistência ao fogo superior a de outro material. Para Barreira e Fonseca (2008), um correto dimensionamento da seção dos elementos de construção de uma estrutura de madeira, considerando as solicitações a frio, acrescidas da perda de seção esperada em caso de um incêndio, assegura, sem recursos, a sistemas de proteção especiais, o tempo de estabilidade ao fogo desejado.

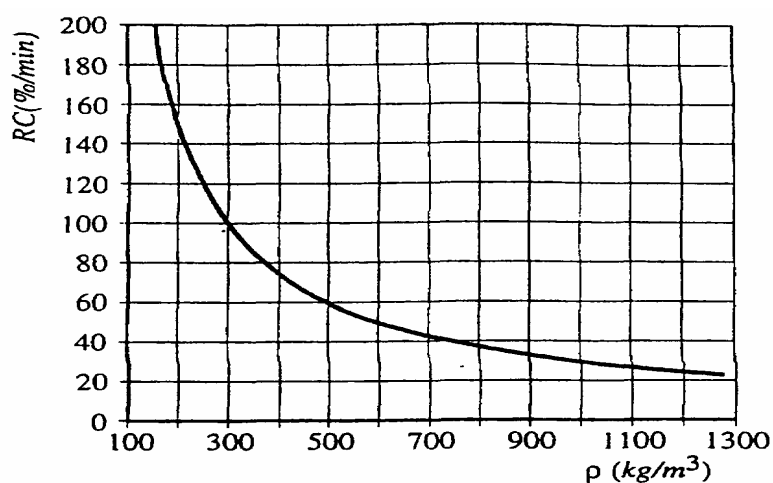
Porém, no Brasil não existem normas que padronizem critérios a serem adotados para projetos de estruturas em madeira, quando submetidas à ação do fogo. Nestes casos, é indicada a utilização de especificações de normas estrangeiras seguidas com as devidas ressalvas no sentido de adequá-las à realidade de nosso país (MORAES; SZÜCS, 2000).

### 3.3 Taxa de carbonização

Barreira e Fonseca (2008) afirmam que, quando se calcula a capacidade da resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira, a degradação térmica do material e a formação da camada de carbonização são os fatores mais importantes. A taxa de carbonização é a razão entre a espessura da camada carbonizada e o tempo de combustão. Admite-se que esta taxa é constante durante o incêndio.

Estudos conduzidos por White *et al* (1992), Shaffer (1967), White (1988) *apud* Pinto (2005) demonstraram que as propriedades da madeira (densidade, teor de umidade, permeabilidade, anatomia) afetam a taxa de carbonização. Como resultado de suas pesquisas a respeito da taxa de carbonização de oito espécies de madeiras nobres americanas, White (1988) *apud* Pinto (2005) concluiu que as duas propriedades mais importantes relacionadas a taxa de carbonização da madeira são: a densidade e o teor de umidade.

A velocidade de combustão diminui com o aumento da densidade da madeira, pois quanto maior a densidade haverá maior quantidade de material a ser queimado e com uma pior oxigenação. A Figura 6 mostra um gráfico entre a relação da velocidade de combustão com a densidade da madeira.



*Relationship between density  $\rho$  and rate of combustion RC*

Figura 7 - Relação entre a velocidade de combustão e a densidade da madeira.  
Fonte: Desconhecida.

A madeira tem baixa condutibilidade térmica. Esta propriedade dificulta a elevação da temperatura em zonas contíguas às que se encontram em combustão e evita a dilatação excessiva da estrutura. A combustão do material superficial produz uma camada carbonizada isolante, Figura 7, a qual dificulta a transmissão de calor e a progressão do fogo para o interior. A condutividade térmica do carvão de madeira é de cerca de 1/6 da madeira maciça o que explica as propriedades isolantes da camada carbonizada.

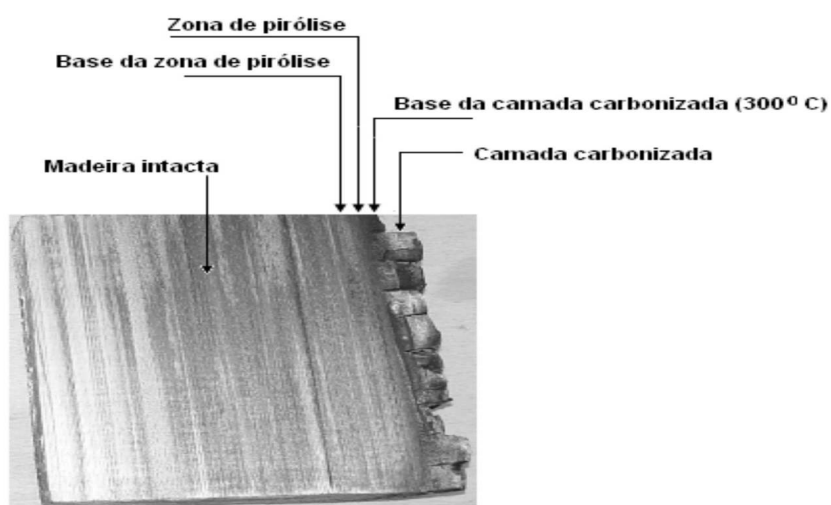


Figura 8 - Carbonização da madeira (exposição de 15 minutos).  
Fonte: Carrasco (2009).

As Figuras 2 e 3 apresentam valores de taxa de carbonização para algumas espécies de madeira de acordo com os documentos normativos ASTM (1995) e Eurocode (2002) respectivamente.

Espécies	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_{car}$	Taxa de Carbonização Linear (min./mm)	Taxa de Carbonização Não-Linear (min./mm <sup>1,23</sup> )
Southern Pine	0,51	0,6	1,24	0,56
Western red cedar	0,31	0,83	1,22	0,56
Oak, red	0,66	0,7	1,59	0,72
Yellow poplar	0,5	0,67	1,36	0,61

Figura 9 - Taxa de carbonização para algumas espécies de madeira Norte-Americanas de coníferas e folhosas, obtidas por meio de ensaio padronizado ASTM E-119 (1995).

$\rho$  é a densidade aparente.

$f_{car}$  é o fator de contração do carvão.

Fonte: Woodhandbook (1999).

Especificação	Material	$\beta_0$ (mm/min.)	$\beta_n$ (mm/min.)
coníferas	MLC, densidade > 290 Kg/m <sup>3</sup>	0,65	0,7
	Madeira serrada, densidade > 290 kg/m <sup>3</sup>	0,65	0,8
folhosas	Madeira serrada ou MLC, densidade > 290 Kg/m <sup>3</sup>	0,65	0,7
	Madeira serrada ou MLC, densidade > 450 Kg/m <sup>3</sup>	0,5	0,55

Figura 10 - Taxa de carbonização para cálculo de madeira,  $\beta_0$  e  $\beta_n$ .

$\beta_0$  taxa de carbonização básica para exposição em uma dimensão;

$\beta_n$  taxa de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento das quinas e aparecimento de frestas;

MLC Madeira Laminada Colada.

Fonte: Eurocode 5 (2002).

### 3.4 Curva de incêndio padronizada

O incêndio-padrão é o modelo de incêndio idealizado para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura obedeça às curvas padronizadas. As curvas padronizadas mais conhecidas são as apresentadas

nas Figuras 11 e 12, que elas descrevem incêndios em que os materiais combustíveis são compostos celulósicos. Para incêndios a base de hidrocarbonetos, a curva mais utilizada pela literatura técnica é a curva “H” – uma abreviação de “hydrocarbon curve” (COSTA; SILVA, 2006).

A Figura 11 mostra a relação entre temperatura e tempo de incêndio, proposta pela *International Organization for Standardization* que em 1975 publicou a norma ISO 834 “*Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction*”.

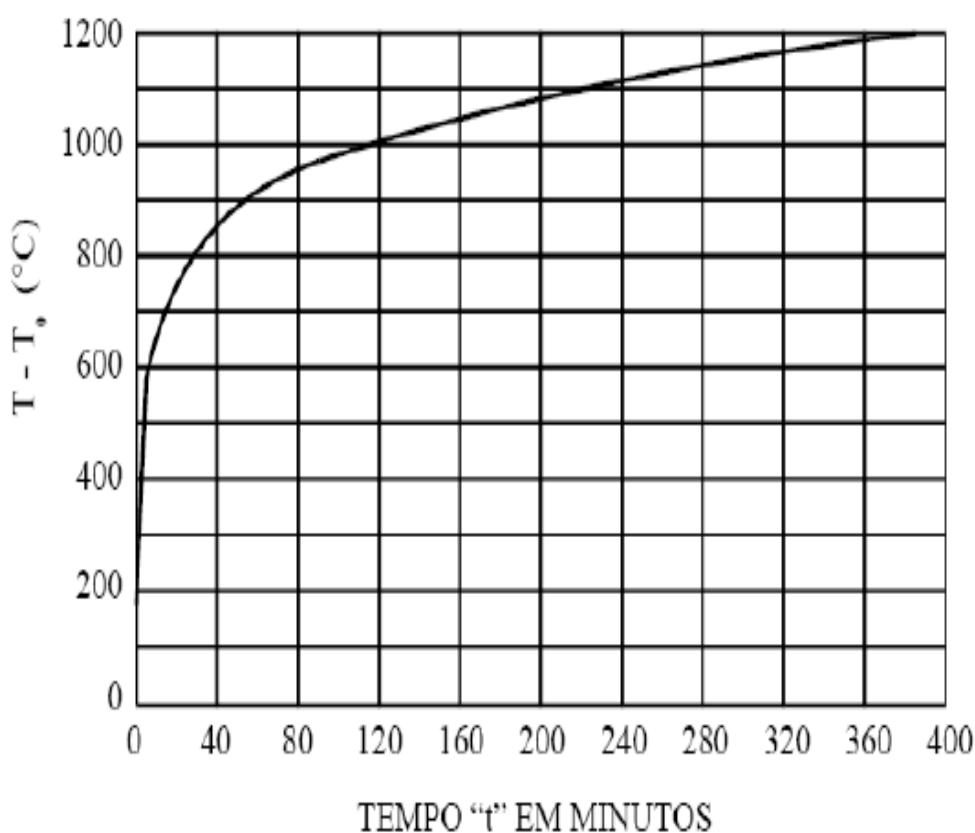


Figura 11 - Curva tempo x temperatura, ISO 834/75.

A Figura 12 mostra a curva da ASTM E119 – *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* e tem sido adotada desde 1918. Os valores dessa curva são baseados nas temperaturas máximas de incêndios reais, tomando por referencia o ponto de fusão de materiais já conhecido naquela época.

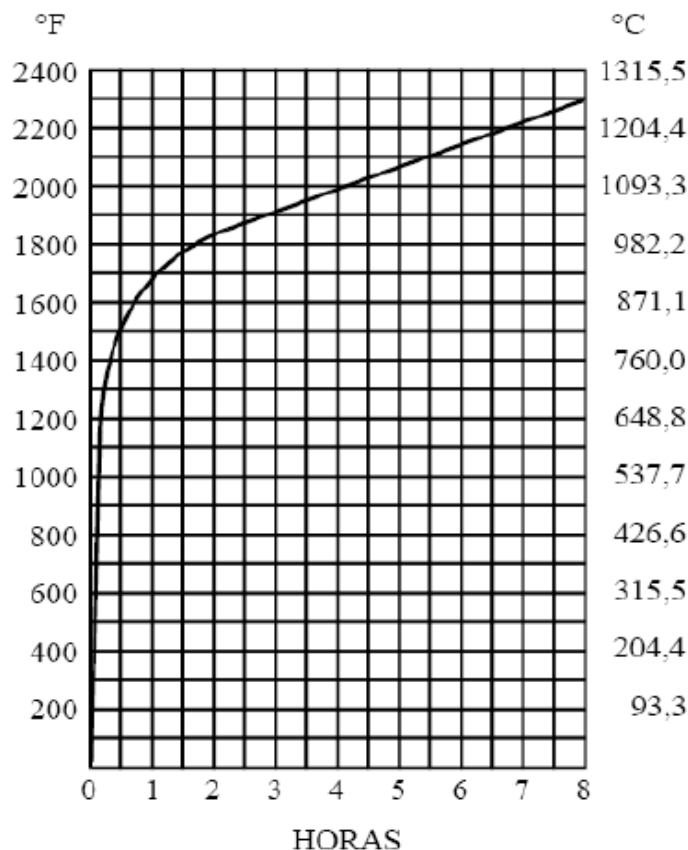


Figura 12 - Curva tempo x temperatura, ASTM E119/18.

Para Pinto (2005), todo incêndio é uma ocorrência única, e definir as curvas que representem um incêndio real é difícil, devido às alterações em cada situação estudada. Devido a isso as curvas de incêndio-padrão passaram por simplificações a serem amplamente adotadas para realização de ensaios de diferentes elementos estruturais, embora não representem o comportamento real de um incêndio.

As curvas-padrão apresentam somente a temperatura crescendo em relação ao tempo, independente da influência da carga de incêndio, grau de ventilação do compartimento e das propriedades térmicas dos materiais presentes no ambiente. Portanto, as curvas-padrão não representam uma situação real de incêndio, como mostra a Figura 13, uma vez que as características do cenário do incêndio podem variar de um compartimento para o outro (COSTA; SILVA, 2006); contudo, elas são utilizadas para facilitar o estudo da resistência dos materiais utilizados em estruturas.

Embora as curvas-padrão, particularmente aquelas representativas de incêndio de materiais celulósicos, não permitam prognosticar o desempenho de elementos construtivos em incêndios reais, longe do controle laboratorial das condições de ensaio, permitem uma análise comparativa de resistência ao fogo entre elementos similares, servindo como indicadores qualitativas de resistência em função da severidade do aquecimento (Costa; Silva, 2006).

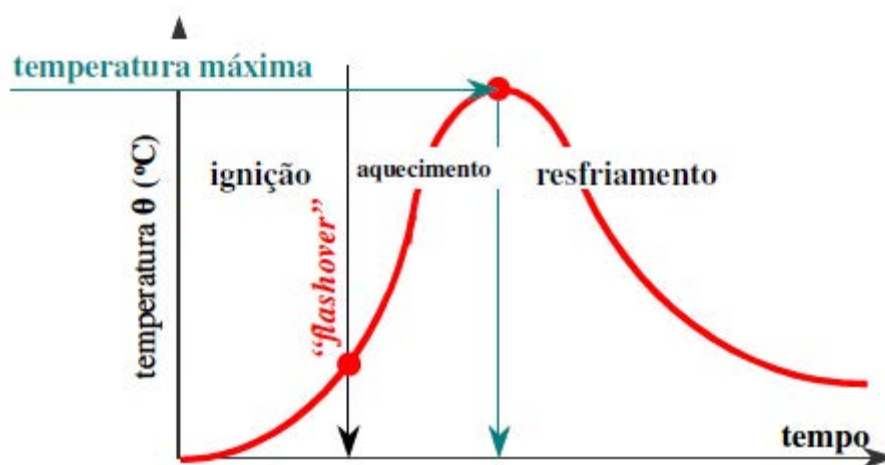


Figura 13 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real.  
Fonte: Costa; Silva, 2006.

### 3.5 Proteção contra-incêndio

Pinto (2005) mostra que a questão da segurança contra incêndio é motivo de diversas publicações, como por exemplo, no Canadian Wood Council (1996) e (1997); Buchanan (2004), Silva (2001). No Brasil esta questão ganhou destaque na década de 70, principalmente após os grandes incêndios dos edifícios Joelma em 1974 e Andraus em 1972 em São Paulo, assim resultando no surgimento de vários campos de pesquisa na área de segurança contra incêndio e a criação do Laboratório de Ensaio ao Fogo no IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica.

Pinto (2005) afirma ainda que a segurança contra incêndio é uma ciência. Seus objetivos são à proteção a vida e ao patrimônio. Para isso, a integração dos muitos campos da engenharia e das ciências é fundamental,

caracterizando-se pela interdisciplinidade. Para atingir estes objetivos, foi estabelecido um conjunto de procedimentos denominado sistema de “segurança contra incêndio”, que consiste de meios ativos e passivos de atuação, (Pinto, 2001).

A Figura 14 apresenta um fluxograma com aspectos a serem observados para controle de incêndio em edificações de madeira sendo a coluna posicionada a esquerda, abaixo do sistema de proteção, itens dos meios de atuação ativa e a coluna a sua direita, itens de proteção passiva.

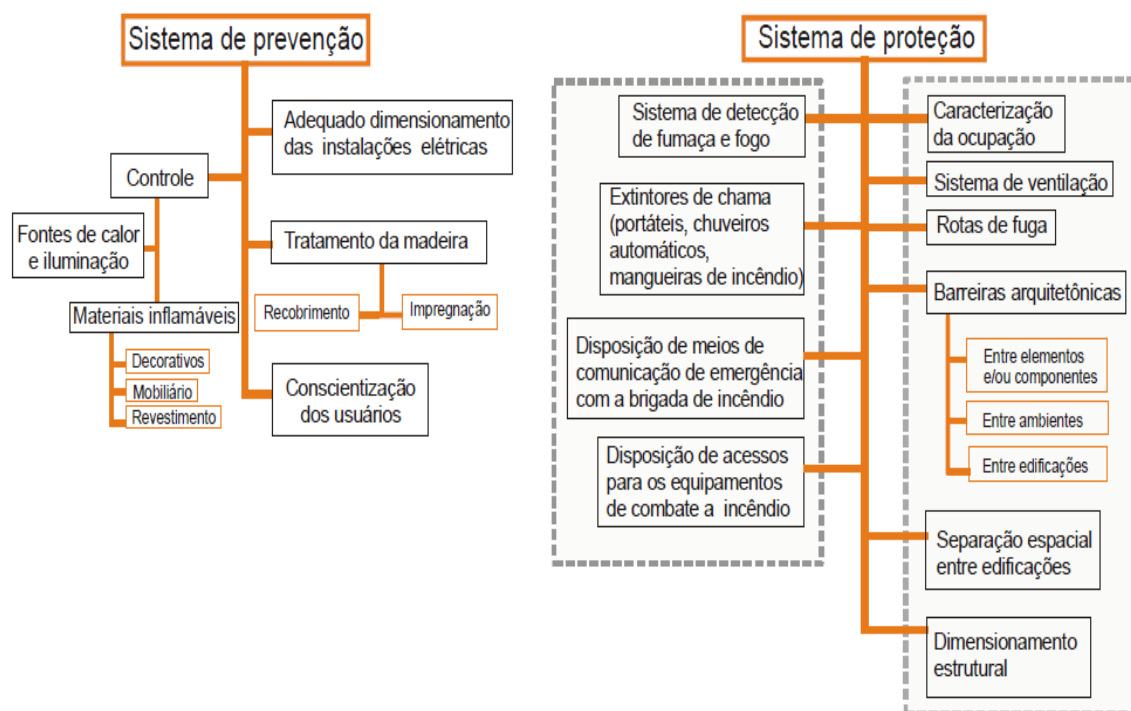


Figura 14 - Fluxograma: Aspectos a serem observados para controle de incêndio em edificações de madeira.

Fonte: PINTO (2001).

A segurança contra incêndio é obtida pela integração dos sistemas de proteção ativa e passiva.

### 3.5.1 Proteção ativa

Seito (1995, p. 23) define as medidas de proteção ativa como “aquelas que necessitam da interferência humana para sua operação”. A

proteção ativa contra incêndio é constituída por meios (equipamentos e sistemas) que precisam ser acionados, quer manual ou automaticamente, para funcionar em situação de incêndio. Ela visa a rápida detecção do incêndio, o alerta dos usuários do edifício para a desocupação e as ações de combate com segurança.

São exemplos de meios de proteção ativa: sistema de alarme manual de incêndio (botoeiras); meios de detecção e alarmes automáticos de incêndio (detectores de fumaça, temperatura, raios infravermelhos, etc., ligados a alarmes automáticos); extintores, hidrantes, chuveiros automáticos (*sprinklers*), sistema de iluminação de emergência, sistemas de controle e exaustão da fumaça, etc.

### 3.5.2 Proteção passiva

Seito (1995, p. 23) define as medidas de proteção passiva como “aquelas que não necessitam da interferência humana para sua operação”. Por sua vez, a proteção passiva contra incêndio é constituída por meios de proteção incorporados à construção da edificação, os quais não requerem nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em situação de incêndio.

São meios de proteção passiva: a acessibilidade ao lote (afastamentos) e ao edifício (janelas e outras aberturas), rotas de fuga (corredores, passagens e escadas), o adequado dimensionamento dos elementos estruturais para a situação de incêndio, a compartimentação, a definição de materiais de acabamento e revestimento adequados.

A resistência das estruturas ao fogo se traduz como um importante componente de proteção passiva dentro do sistema de segurança contra incêndio, (BUCHANAN, 2004).

## 4. MATERIAIS E MÉTODO

### 4.1 Origem das amostras

Foram obtidas sete peças de madeira de Cambará procedentes da região do Jarí, no estado do Pará, por meio de doação da Madeireira Cardoso – Itapeva/SP, por se tratar de uma madeira usual em estruturas de madeira, pelo menos de telhado. Todas as peças foram provenientes de um mesmo lote, sendo extraídas de vigas diferentes. Seis dessas peças tinham dimensões nominais de 5 x 11 x 60 cm e uma delas 5 x 11 x 100 cm, sendo a seção transversal assim escolhida para se simular o mais próximo possível das dimensões de vigas utilizadas em estruturas de madeira.

### 4.2 Identificação botânica

O nome popular Cambará pode designar muitas espécies de madeira, o que ficou bem claro na identificação da espécie em estudo. No Laboratório de Anatomia da Madeira do Campus Itapeva da UNESP, através de chaves de identificação da madeira, foi identificada a espécie em estudo como *Qualea* sp..

Outro método utilizado para identificação foi a comparação das peças com madeiras da Xiloteca do mesmo Laboratório. Também, através do software INTKEY, chegou-se a conclusão de que a espécie em estudo é a *Qualea* sp..

De acordo com o banco de dados do IPT (2012), a madeira *Qualea* sp. apresenta cerne e alburno pouco distintos pela cor, cerne bege-claro levemente rosado a avermelhado; brilho moderado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; moderadamente dura ao corte; grã reversa; textura média e aspecto fibroso.

A Figura 15 e 16 apresentam o aspecto da seção transversal da madeira de Cambará (*Qualea* sp.) utilizada no trabalho.

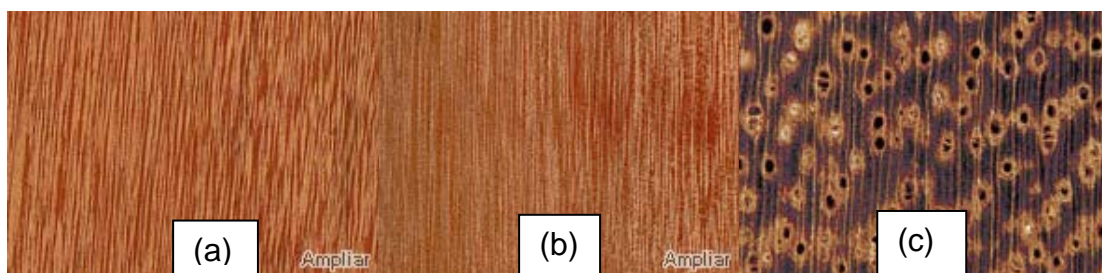


Figura 15 - Madeira *Qualea sp.* em suas faces tangencial (a) e radial (b) e em fotomicrografia aumentada em 10 vezes (c).

Fonte: IPT (2012).



Figura 16 - Madeira da espécie *Qualea sp.* conhecida popularmente como Cambará.

#### 4.3 Dimensões e confecção dos corpos de prova

A princípio, pretendeu-se utilizar corpos de prova nas dimensões nominais 5 x 5 x 15 cm de acordo com o prescrito no documento normativo NBR7190/97, expondo esses corpos de prova a altas temperaturas até serem alcançados 1000°C, simulando as consequências presentes em um caibro de uma estrutura de telhado. Assim, optou-se por se realizar uma simulação prévia do comportamento de peças de madeira de 5 x 5 x 15 cm submetidas a essas temperaturas para se verificar o comportamento da seção nessas condições.

Na Mufla, modelo MA 385, foram colocados dois corpos de prova de 5 x 5 x 15 cm sobre um suporte de cerâmica, um tijolo baiano cortado pela metade longitudinalmente, para que houvesse circulação de ar por toda extensão dos corpos de prova, como mostra a Figura 17.



Figura 17 - Mufla com suporte de cerâmica.

Partindo da temperatura ambiente foi-se elevando a temperatura da Mufla de 200°C em 200°C, fazendo pausas de 15 minutos a cada 200°C elevados para estabilização da Mufla, de acordo com as recomendações técnicas do manual do equipamento. Quando a Mufla alcançou a temperatura de 1000°C ela foi desligada e foram aguardados 10 minutos para retirada dos corpos de prova.

Os corpos de prova permaneceram na Mufla por 2 horas e 16 minutos, baseando-se no tempo médio de um incêndio real de duas horas. Após a retirada dos mesmos, verificou-se que a seção não resistiu a exposição até os 1000°C, não sendo possível identificar até qual temperatura os corpos de prova ainda tinham alguma resistência detectável em ensaio mecânico. Na Figura 18 mostra-se a imagem de parte dos corpos de prova, após serem retirados da Mufla.



Figura 18 - Corpos de prova do teste incinerados a 1000°C por 2 h e 16 min..

Com isso notou-se a necessidade de aumentar a seção dos corpos de prova, chegando então às dimensões de 5 x 10 x 30cm, sendo o comprimento e a largura limitado pelas dimensões da Mufla. Ao estabelecer tais medidas, foram feitos ensaios prévios de compressão paralela às fibras para comparação da resistência e do módulo de elasticidade nessa solicitação com os obtidos nos corpos de prova com dimensões de 5 x 5 x 15 cm. Desta forma, a seção transversal teria as dimensões nominais de uma viga utilizada em estruturas de telhado.

O resultado obtido no ensaio feito na peça com dimensões 5 x 10 x 30 cm foi utilizado para estimar a carga de ruptura dos demais corpos de prova. A Figura 16 mostra os ensaios para comparação de propriedades mecânicas entre o corpo de prova de 5 x 5 x 15 cm com o corpo de prova com 5 x 10 x 30 cm.

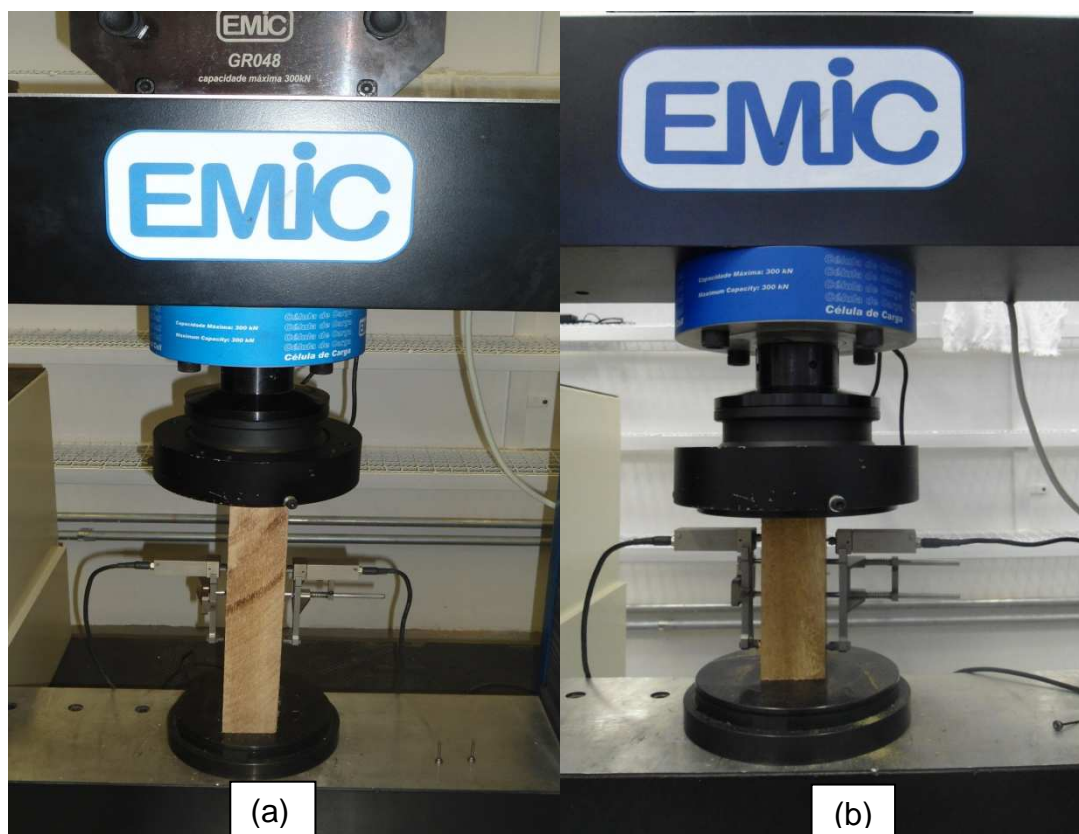


Figura 19 - Ensaio para comparação entre corpo de prova de 5 x 10 x 30 cm (a) com corpo de prova com 5 x 5 x 15 cm (b).

Como não houve diferença entre os valores de resistência e módulo de elasticidade dos corpos de prova com dimensões diferentes, estabeleceu-se que o trabalho seria feito com a utilização de seis corpos de prova de dimensões 5 x 10 x 30 cm, retirados um de cada peça, mostrados na Figura 20.



Figura 20 - Corpos de prova de dimensões 5 x 10 x 30 cm.

Das partes restantes das peças, foram confeccionados quatro corpos de prova testemunha de compressão paralela às fibras nas dimensões 5 x 5 x 15 cm, para se calcular os valores da resistência e do módulo de elasticidade das mesmas nessa solicitação, sem o efeito de altas temperaturas. Foram retirados dois corpos de prova de tração paralela às fibras da sétima peça, motivo pelo qual inicialmente se optou por uma das peças ter comprimento diferenciado em relação às seis demais.

#### 4.4 Determinação do tempo

Segundo os documentos normativos ISO 834/75 e ASTM E119/18, as curvas do incêndio padrão mostram que ao decorrer de duas horas as temperaturas chegam a aproximadamente 1000°C (Figuras 11 e 12). Em um incêndio real, muitas variáveis atuam em conjunto, influenciando no tempo total do mesmo bem como na elevação da temperatura.

Com a curva considerada por Costa e Silva (2006), em um incêndio real, o aumento de temperatura ocorre de maneira mais lenta até cerca de 500°C, sendo que após essa marca o processo é acelerado até ser alcançada a temperatura de 1000°C a 1200°C, após então ocorre um decréscimo da curva (Figura 13).

Desta forma, optou-se pelo tempo de permanência das amostras expostas a elevadas temperaturas em duas horas, que foram divididas em 4 intervalos de 20 minutos entre as temperaturas de 200°C a 500°C, e intervalos de 8 minutos entre as temperaturas de 600°C a 1000°C, ou até que os corpos de prova mostrassem possibilidade de serem submetidos a ensaios mecânicos.

#### 4.6 PROCEDIMENTO

O procedimento foi iniciado a partir dos 200°C, pois aos 100°C é a temperatura utilizada para secagem em estufa e então as mudanças nas propriedades da madeira não são significativas.

A princípio, os corpos de prova seriam colocados na Mufla e então concomitantemente a temperatura seria elevada de 100°C em 100°C, a partir

dos 200°C, até 1000°C ou até que os mesmos ainda pudessem ser submetidos ao ensaio destrutivo de compressão paralela às fibras.

No teste prévio, feito para determinação das dimensões do corpo de prova a ser utilizado no trabalho, notou-se que a madeira sofria apenas queima lenta, sem chamas, devido à ausência de oxigênio no ambiente, quando colocada antes de aquecimento prévio da Mufla à temperatura de 200°C. Disso decorria que a madeira acabava sendo carbonizada na superfície e em profundidade, diferentemente de uma situação real, em que o ambiente é rico em oxigênio. Esta situação é semelhante à destilação do alcatrão.

Em situações de incêndios reais, em que ocorre a queima com o ambiente rico em oxigênio, a carbonização da madeira se dá na superfície e então esta parte carbonizada da madeira funciona como uma proteção, diminuindo a interferência do fogo em suas propriedades.

Deste modo, esta parte da metodologia foi alterada e foi definido que a Mufla seria aquecida até a temperatura de 200°C e então seriam colocados os corpos de prova, um de cada vez, devido à limitação de dimensões da Mufla, sendo mantidos em cada temperatura pelo tempo pré-determinado.

Ressalta-se, que o Campus não possui forno apropriado para o estudo das propriedades de madeiras submetidas a altas temperaturas, e a Mufla foi o equipamento que mais se adequou ao que o trabalho necessitava, para simular a situação o mais próximo possível de um incêndio real. A Figura 21 mostra o posicionamento do corpo de prova dentro da Mufla.



Figura 21 - Corpo de prova dentro da Mufla.

Após o pré-aquecimento da Mufla a 200°C, os corpos de prova foram conduzidos à mesma e, de um em um, permaneceram nessa temperatura por 20 minutos, quando eram retirados e mantidos em ambiente aberto até entrarem em equilíbrio térmico. Após o resfriamento dos corpos de prova cada um foi pesado e foram realizados os ensaios de compressão paralela às fibras somente na fase elástica, para a verificação do módulo de elasticidade.

Este procedimento repetiu-se com a elevação de 100°C em 100°C até se alcançar os 500°C, sendo que após essa temperatura, foi alterado apenas o tempo de permanência dos corpos de prova na Mufla, de 20 para 8 minutos. Em todo o processo de exposição a altas temperaturas, o responsável técnico bem como o discente acompanharam cada corpo de prova e, assim, o procedimento foi realizado de forma a manter a segurança contra um possível incêndio.

Depois da exposição à última temperatura, foram conduzidos ensaios de compressão paralela até à ruptura dos corpos de prova, para serem determinados também os valores de resistência. Por último, os mesmos foram seccionados ao meio para verificação da seção carbonizada e a seção de madeira efetiva como mostra a Figura 22.



Figura 22 - Peça seccionada ao meio para verificação da seção carbonizada e a seção de madeira efetiva.

O principal objetivo do trabalho é o estudo da rigidez da madeira submetida a elevadas temperaturas, procurando simular uma situação de incêndio real. Devido às limitações de instrumentos que possibilitassem esta simulação foram adotadas algumas relações para poder estimar a tensão de ruptura e módulo de elasticidade na flexão estática.

De acordo com o documento normativo NBR 7190/97 a madeira *Qualea* sp. também é popularmente conhecida como Mandioqueira e apresenta densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) de 856 kg/m<sup>3</sup> a 12% de umidade, resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) de 71,4 MPa, resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ) de 89,1 MPa, resistência à tração normal às fibras ( $f_{t90}$ ) de 2,7 MPa, resistência ao cisalhamento ( $f_v$ ) de 10,6 MPa e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) de 18971 MPa.

Hellmeister (1973), em um estudo da relação entre tensões de ruptura na tração paralela às fibras ( $\sigma_t$ ), compressão paralela às fibras ( $\sigma_c$ ) e flexão estática ( $\sigma_f$ ) determinou a seguinte expressão:

$$\sigma_f = \sigma_c \cdot \frac{\sigma_t (3\sigma_t + 8\sigma_c)}{(\sigma_t + 2\sigma_c)^2} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo Morales (2002) em um estudo sobre a relação entre os valores dos módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática de madeiras tropicais, chegou à conclusão que os mesmos são estatisticamente equivalentes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção do trabalho os resultados obtidos serão expostos para verificações e discussões. A Tabela 4 mostra os dados iniciais dos corpos de prova (CP).

Tabela 1 - Dados iniciais em relação às dimensões, umidade, massa e a densidade dos corpos de prova.

<b>CP</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	19	1179,47	0,786
<b>2</b>	16	1062,39	0,708
<b>3</b>	15	1034,39	0,690
<b>4</b>	17	1139,86	0,760
<b>5</b>	14	1032,14	0,688
<b>6</b>	15	1016,66	0,678
<b>MÉDIA</b>	16	1077,49	0,718

Um dos aspectos a serem observados após a exposição da madeira a elevadas temperaturas é o visual. A Figura 23 mostra imagens dos corpos de prova inicialmente (a) e após cada período exposto a 200°C (b), 300°C (c), 400°C (d), 500°C (e), 600°C (f) e 700°C (g). Assim podem-se notar as mudanças que ocorreram na madeira após cada etapa do processo, verificando que as alterações, principalmente as visuais, ficam cada vez mais acentuadas com maiores temperaturas.

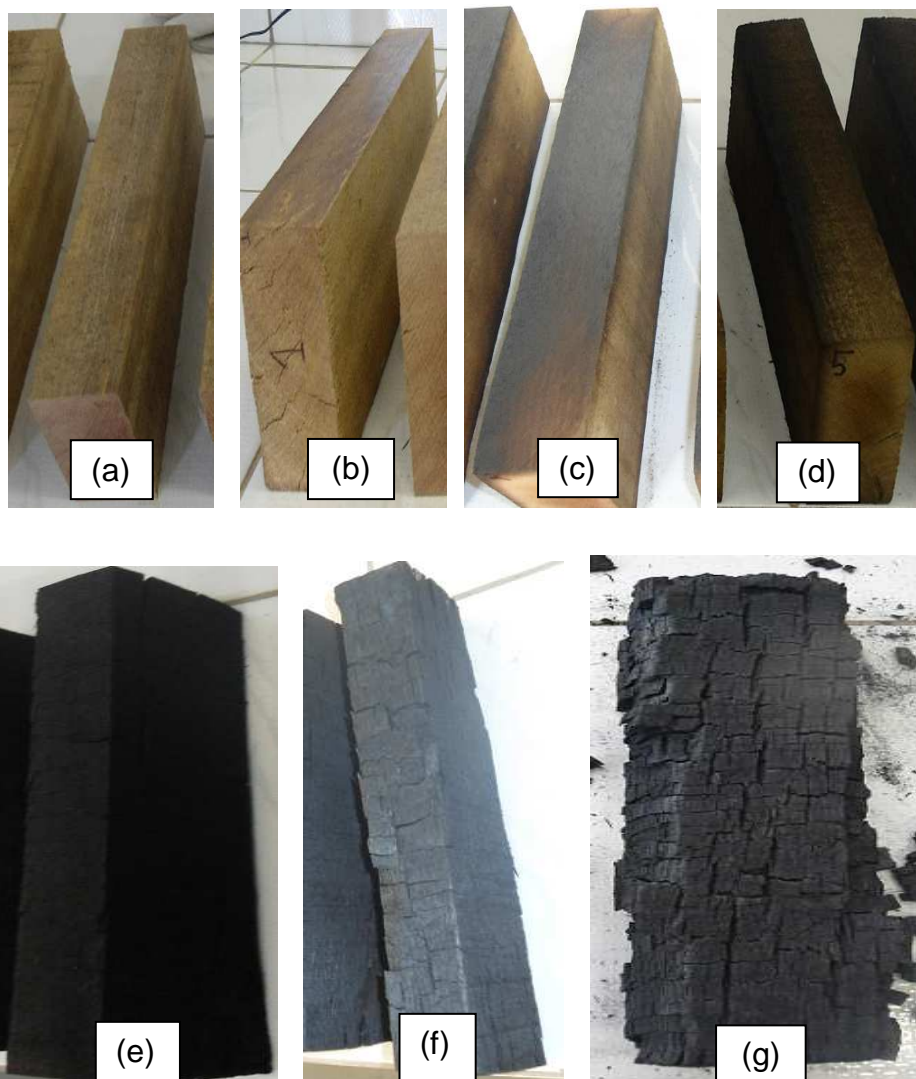


Figura 23 - Corpos de prova ao iniciar os experimentos (a) e após serem expostos a 200°C (b), 300°C (c), 400°C (d), 500°C ( e), 600°C (f) e 700°C (g).

Ao patamar de temperatura de 600°C, quando se abria a Mufla, para retirada do corpo de prova, pôde-se notar o fenômeno do “Backdraft” pela súbita entrada de ar, assim oxigenando o ambiente e causando uma pequena explosão. A Figura 24 mostra um dos corpos de prova em chamas dentro da Mufla.



Figura 24 - Corpo de prova em chamas após abertura da Mufla aos 600°C, produzindo o efeito “Backdraft”.

Na Tabela, 5 seguem os valores das massas dos corpos de prova inicialmente e nas temperaturas de 200°C a 700°C, com suas respectivas médias, desvio padrão (DESV PAD) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 2 - Massa dos corpos após cada patamar de 100°C.

CP	Inicial	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C
1	1179,47	1154,90	923,63	781,91	733,22	654,65	353,84
2	1062,39	1045,04	943,26	828,79	675,17	565,18	364,13
3	1034,39	1016,54	981,68	942,30	624,15	546,51	390,14
4	1139,86	1123,05	1083,94	838,87	737,51	666,36	418,48
5	1032,14	1018,98	931,37	873,71	673,51	582,51	377,56
6	1016,66	1002,70	986,77	979,38	634,70	548,16	316,12
<b>MÉDIA</b>	1077,49	1060,20	975,11	874,16	679,71	593,90	370,05
<b>DESV PAD</b>	66,53	63,34	59,33	74,20	47,70	53,35	34,67
<b>CV (%)</b>	6,17	5,97	6,08	8,49	7,02	8,98	9,37

A Figura 21 mostra as imagens dos corpos de prova após sua ruptura no ensaio de compressão paralela às fibras, depois de alcançada a última temperatura de 700°C, seccionados ao meio, para verificação da seção carbonizada e da seção efetiva após a exposição a altas temperaturas, onde nota-se também o efeito do arredondamento. De acordo com o proposto pelo

Eurocode 5 (2002), comparou-se a taxa de carbonização da madeira de Cambará, verificando se esta espécie de madeira nativa se enquadra nas prescrições desse documento normativo que é europeu.

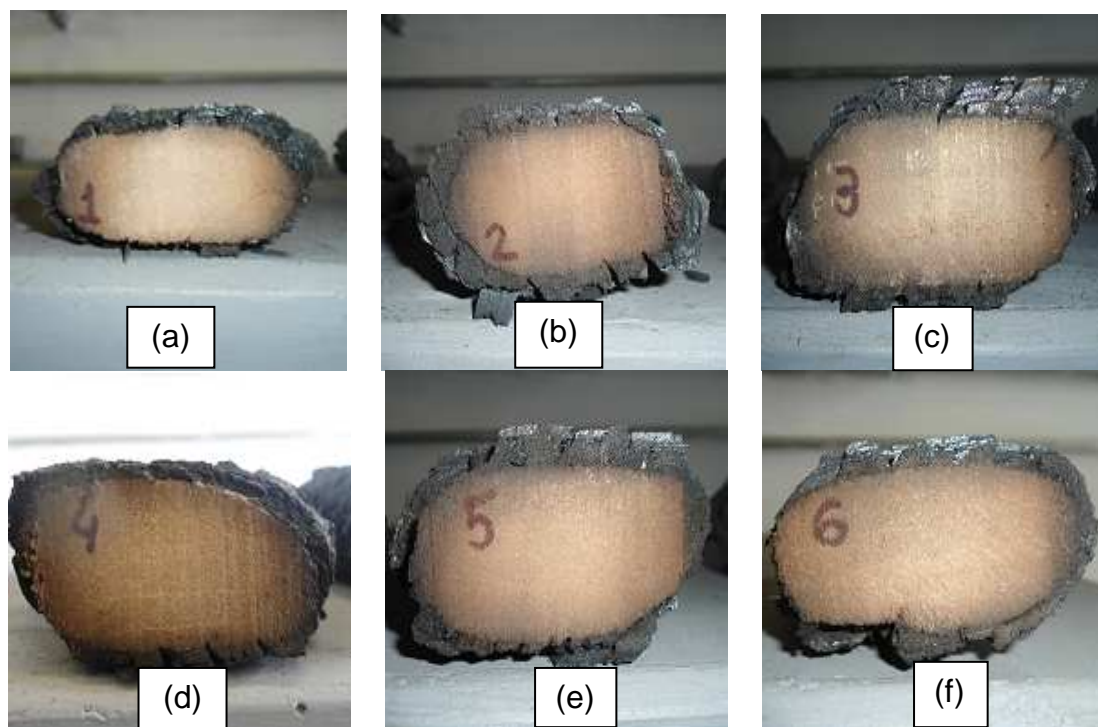


Figura 25 - Corpos de prova 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) seccionados ao meio para verificação de seção carbonizada e efetiva.

Uma das dificuldades encontradas foi aferir as áreas dos corpos de prova devido à degradação sofrida após a exposição a elevadas temperaturas, o que foi realizado estimando-se as dimensões das áreas a partir do percentual de perda de massa dos corpos de prova.

Como este procedimento não é normalizado, para verificar a aceitação desse método alternativo, como mostra a Tabela 6, foi realizada uma relação entre a perda de massa inicial e após 700°C, bem como das dimensões iniciais e após os corpos de prova serem seccionados (Figura 25), sendo as dimensões aproximadas. Esta relação foi feita com as médias das medidas de massa e área inicial e final.

Tabela 3 - Relação entre massas e áreas iniciais e finais dos corpos de prova.

	Inicial	Final	% de perda
<b>MASSA (g)</b>	1077,49	370,05	65,66
<b>ÁREA (mm<sup>2</sup>)</b>	5000,00	1560,83	68,78

Como se pode notar o percentual da massa e da área perdidos são aproximados. Desta forma foram estimadas as áreas (A) das seções efetivas a partir dos percentuais de massa perdidos (PM) após cada estágio de elevação da temperatura, dados respectivamente em % e mm<sup>2</sup>, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 4 - Estimativa das áreas dos corpos de prova a partir do percentual de perda de massa.

CP	200°C		300°C		400°C		500°C		600°C		700°C	
	PM	A	PM	A	PM	A	PM	A	PM	A	PM	A
<b>1</b>	2	5000	22	4896	34	3315	38	3108	44	2775	70	1500
<b>2</b>	2	5000	11	4918	22	3901	36	3178	47	2660	66	1714
<b>3</b>	2	5000	5	4914	9	4555	40	3017	47	2642	62	1886
<b>4</b>	1	5000	5	4926	26	3680	35	3235	42	2923	63	1836
<b>5</b>	1	5000	10	4936	15	4233	35	3263	44	2822	63	1829
<b>6</b>	1	5000	3	4931	4	4817	38	3121	46	2696	69	1555
<b>MÉDIA</b>	2	5000	9	4920	18	4083	37	3154	45	2753	66	1720
<b>DESVPAD</b>	0	0	7	15	11	560	2	90	2	108	3	160
<b>CV (%)</b>	18	0	74	0	61	14	5	3	5	4	5	9

Com a estimativa da área efetiva e com o tempo total de exposição a elevadas temperaturas, que foi de 96 minutos, foi verificado se a taxa de carbonização apresentada na Tabela 3 seria válida para espécie de madeira em questão. Pela taxa do Eurocode (2002) e o tempo de queima, a quantidade de madeira carbonizada seria de 52,8 mm e o apresentado no estudo foi de 57,3 mm, apresentando um percentual de 7,85% de diferença.

As Tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, os valores de módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, a cada temperatura, para os seis corpos de prova com suas áreas feitas por aproximação e por estimativa a partir da perda de massa.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade para cada corpo de prova ensaiado, com as áreas feitas por aproximação.

CP	200°C (MPa)	300°C (MPa)	400°C (MPa)	500°C (MPa)	600°C (MPa)	700°C (MPa)
1	15783	17989	15761	10242	11407	10021
2	11936	11867	13393	8962	9684	8344
3	13244	10702	8919	7710	8020	7271
4	12270	16549	18091	12684	17381	11615
5	11667	15362	12188	10444	9157	8093
6	12910	11975	10937	8094	10186	10745
<b>MÉDIA (MPa)</b>	12968	14074	13215	9689	10973	9348
<b>DESV PAD (MPa)</b>	1500	2958	3316	1835	3333	1699
<b>CV (%)</b>	12	21	25	19	30	18

Tabela 6 - Módulo de elasticidade para cada corpo de prova ensaiado, com as áreas estimadas a partir da perda de massa.

CP	200°C (MPa)	300°C (MPa)	400°C (MPa)	500°C (MPa)	600°C (MPa)	700°C (MPa)
1	19910	18433	20618	13241	16340	16268
2	11933	12567	15744	12210	13164	10872
3	13233	11076	8870	10368	12016	6782
4	12020	16129	20811	15300	14749	14073
5	11340	13909	12330	12119	12050	12024
6	12777	12255	9399	10741	11898	14897
<b>MÉDIA (MPa)</b>	13536	14062	14629	12330	13370	12486
<b>DESV PAD (MPa)</b>	3193	2750	5313	1794	1817	3406
<b>CV (%)</b>	24	20	36	15	14	27

Com esses valores foram plotados os gráficos apresentados nas Figuras 26 e 27 que mostram a relação dos módulos de elasticidade após cada temperatura, por corpo de prova. No gráfico, nota-se um decréscimo dos módulos de elasticidade após cada etapa de exposição a altas temperaturas com tendência de aumento nas temperaturas de 400°C e 600°C sendo que, em média, os módulos de elasticidade diminuíram de 12000 MPa em 200°C para 8000 MPa em 700°C.

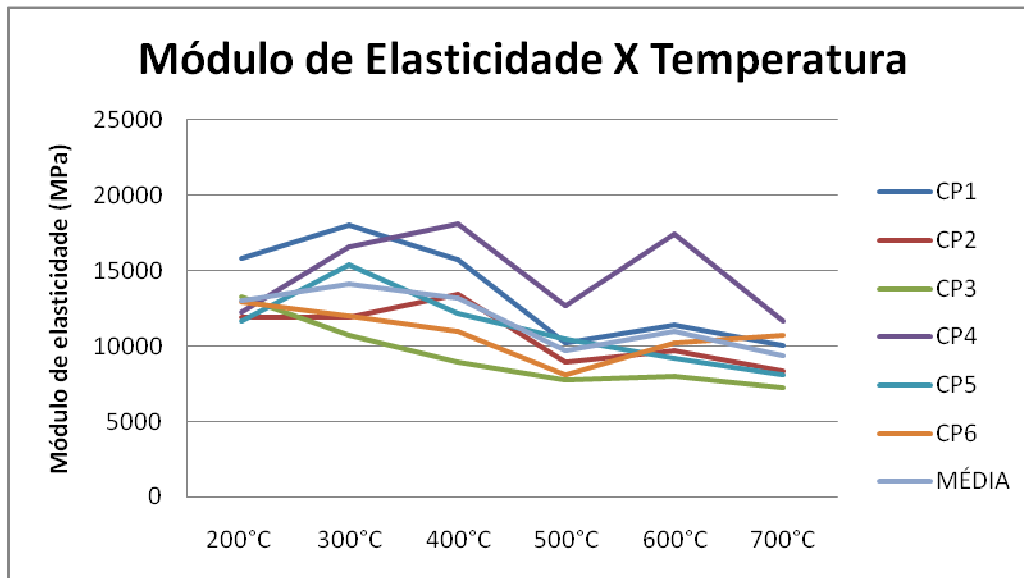


Figura 26 - Gráfico da relação do módulo de elasticidade com a temperatura, com as áreas feitas por aproximação.

Na Figura 27, com as áreas efetivas estimadas não se pode concluir o mesmo que no caso anterior, quando se considerou a área medida juntamente com o carvão para o cálculo do módulo de elasticidade.

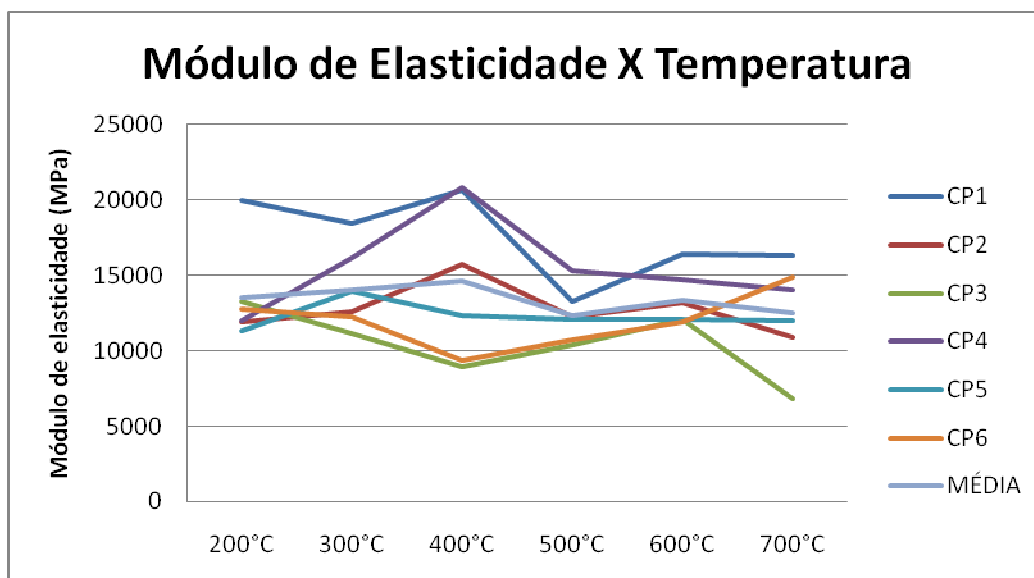


Figura 27 - Gráfico da relação do módulo de elasticidade com a temperatura, com as áreas feitas por estimativa a partir da perda de massa.

Um dos problemas a ser considerado, que pode ter influenciado diretamente nos resultados obtidos dos módulos de elasticidade é o posicionamento das “garras” do extensômetro, que não fixavam corretamente na madeira devido a camada de material carbonizado ser irregular e quebradiça, como mostra a Figura 28.



Figura 28 - Posicionamento das "garras" do extensômetro.

A título de comparação das propriedades mecânicas das peças antes do procedimento e após a temperatura de 700°C, foram ensaiados quatro corpos de prova, denominados testemunhas, com dimensões nominais de 5 x 5 x 15 cm, referentes as peças 1, 2, 3 e 5 na compressão paralela às fibras para o cálculo da resistência e do módulo de elasticidade médio nesta solicitação, apresentados na Tabela 10.

Tabela 7 – Resistências e módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras dos corpos de prova testemunhas.

CP	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)
1	71	42036
2	64	26871
3	62	23784
4	63	20902
<b>MÉDIA (MPa)</b>	65	28398
<b>DESV PAD (MPa)</b>	4	9413
<b>CV (%)</b>	6	33

Para verificar o quanto da resistência paralela às fibras foi perdida a Tabela 11 mostra os valores de módulo de elasticidade e de resistência à compressão paralela às fibras dos corpos de prova em seu ensaio após 700°C.

Tabela 8 - Resistências e módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras obtidas dos corpos de prova após ensaio de 700°C.

<b>CP</b>	<b>f<sub>co</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>co</sub> (MPa)</b>
<b>1</b>	22	16268
<b>2</b>	20	10872
<b>3</b>	16	6782
<b>4</b>	18	14073
<b>5</b>	18	12024
<b>6</b>	21	14897
<b>MÉDIA</b>	19	12486
<b>DESV PAD</b>	2	3406
<b>CV (%)</b>	12	27

Nas Tabelas 10 e 11, ao relacionar os valores dos corpos de prova de testemunhas com os resultados das amostras queimadas nota-se que a madeira perdeu aproximadamente 71% da resistência e 56% do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

Para deduzir o valor de resistência à flexão estática de acordo com a equação 1, também são necessários os valores de resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ) que foram realizados em dois corpos de prova e são apresentados na Tabela 12, que também apresenta os valores dos módulos de elasticidade ( $E_{t0}$ ) nessa solicitação.

Tabela 9 - Dados de  $f_{t0}$  e  $E_{t0}$  dos corpos de prova de tração paralela às fibras.

<b>CP</b>	<b>F<sub>t0</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>t0</sub> (MPa)</b>
<b>1</b>	61	16948
<b>2</b>	48	15515
<b>MÉDIA</b>	54	16232
<b>DESV PAD</b>	10	1014
<b>CV (%)</b>	18	6

Então com os dados dos ensaios de compressão paralela às fibras e de tração paralela às fibras pode-se deduzir o valor da tensão de ruptura na flexão estática que foi de aproximadamente 70,71 MPa.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos no presente trabalho conclui-se:

- Que as propriedades mecânicas são afetadas de maneira negativa em exposição a elevadas temperaturas.

- As perdas da madeira em massa e área apresentam comportamentos semelhantes, com percentuais de perda equivalentes. As mudanças visuais são bem marcantes após a queima, sendo indício da degradação térmica que, porém não pode ser utilizada como regra para determinação do real estado da madeira.

- No que diz respeito à segurança os resultados mostram que os valores para o módulo elasticidade na compressão paralela às fibras sofreram uma queda de aproximadamente 48% após temperaturas de 200°C. Isto é um dado alarmante, pois em situações de incêndios reais temperaturas por volta de 200°C são alcançadas rapidamente, com isso podem comprometer toda a estrutura afetada.

- Devido às muitas variáveis envolvendo o material madeira e uma situação de incêndio real não foi possível prever com exatidão tempos de um possível colapso estrutural, com isto verificando que cada minuto é de suma importância em uma situação de sinistro e que quanto mais rápido for o tempo resposta das equipes de socorro, maior será a eficiência ao combate, visando a proteção a vida, ao meio ambiente e ao patrimônio.

- A metodologia alternativa adotada foi válida para o estudo em questão, simulando um incêndio real, visto que a taxa de carbonização da madeira de Cambará foi equivalente ao prescrito no documento normativo Eurocode 05 (2002), que é uma referência na área.

Constata-se a necessidade de mais estudos relacionados à área como, por exemplo, realizar o mesmo trabalho com diferentes espécies de madeira e estudar as propriedades físicas nas mesmas condições.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APOSTILA: **Chave de identificação de madeira usadas na construção civil**. IPT – maio, 2002, 25p.

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

BARREIRA, L.; FONSECA, E. **Cálculo da Espessura Carbonizada em Estruturas de Madeira Quando Submetidas à Acção do Fogo**, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica'08, Proceedings, Aveiro, 2008. 8p.

BUCHANAN, A.H. (2004). **Internacional developments in design for structural fire safety**. In: Revista sul-americana de engenharia estrutural. Editora UPF. V.1,n.1 maio/ago 2004. Passo fundo-RS.

CANADIAN WOOD COUNCIL (1996). **Fire safety desing buildings**. Canadá.  
CARRASCO, E. M. **Determinação de parâmetros experimentais para estruturas de madeira em situação de incêndio**: taxa de carbonização da madeira para uso estrutural. Belo Horizonte: Fapemig, 2009. (TEC, Relatório Técnico Final). 8p.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de Incêndio**.In: SEMINARIO INTERNACIONAL NUTAU 2006: INOVACOES TECNOLOGICASE SUSTENTABILIDADE. Sao Paulo: FAU/USP, 2006. 13 p.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE.**Eurocode 5**: design of timber structures,part1-2: general rules-structural fire design. European Committee for standardization,Brusselas, 2002. 74 p.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos (USP), 1973. 119p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.**ISO 834**.Fireresistencetestes – Elements of building construction, 1975. 16 p.

**INTKEY** (SOFTWARE): Laboratório de Produtos Florestais.

**MANUAL DE FUNDAMENTO DO CORPO DE BOMBEIROS**. São Paulo: PMESP - CCB, v. 00, 2006. 569p.

MARTINS, T. F. R. M. **Dimensionamento de Estruturas em Madeira**: Coberturas e Pavimentos. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento da Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

MORAES, P. D. de. SZUCS, C. A.; **Análise de Normas de Projetos Para Estruturas de Madeira Considerando a Resistência ao Fogo.** 10p.

MORALES, E. Ap. M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos.** 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Usp, São Carlos, 2002.

Negrão, J., & Faria, A. (2009). **Projecto de Estruturas de Madeira.** Publindústria.

PIGNATTA, V. S.. **Estruturas de Aço em situação de Incêndio.** São Paulo: Ed. Zigurate. 2001.

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

PINTO, E. M. **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.

SEITO (1995). **Metodologia de análise de risco de incendio.** São Paulo. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

SIMPSON, W. ; TENWOLDE, A. (1999). **Wood handbook-Wood as na engineering material – Chapter 3 – Physical Properties and Moisture Relations of Wood.** Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

**Standard test methods for fire tests of building construction and materials – ASTM E 119.** Philadelphia, 1995. 37p.

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. Florianopolis/SC, 2006. 186p.