

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

Lúcia Klein Oliveira

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA: ESTUDO DA
VARIAÇÃO MEDIANTE AÇÃO DO FOGO**

Porto Alegre
julho 2012

LÚCIA KLEIN OLIVEIRA

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA: ESTUDO DA
VARIAÇÃO MEDIANTE AÇÃO DO FOGO**

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

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

Porto Alegre
julho 2012

LÚCIA KLEIN OLIVEIRA

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA: ESTUDO DA
VARIAÇÃO MEDIANTE AÇÃO DO FOGO**

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

Porto Alegre, 13 de julho de 2012

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

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela University of Sheffield

Profa. Alexandra Passuello (UFRGS)
Dra. pela Università Politecnica delle Marche

Adriano Krukoski Ferreira (1º CRB/BM/Governo Estadual)
Tenente-coronel do 1º CRB/BM

Dedico este trabalho a meus pais, Ricardo e Rute, ao meu noivo Eric, aos meus avós, aos meus tios, aos meus primos e amigos que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, orientador deste trabalho, pela disposição em esclarecer as dúvidas que tive ao longo do trabalho, sempre explicando de forma clara e paciente. Aprecio também a forte motivação dada.

Agradeço a minha mãe Rute, que, durante o período da faculdade, me motivou e colaborou com os meus estudos, demonstrando empatia nos momentos de pressão e dificuldade.

Agradeço ao meu noivo Eric, por toda a paciência e empatia durante o período da faculdade, pelas palavras de conforto e motivação aos meus estudos.

Agradeço ao Cap. Eduardo Estêvam Camargo Rodrigues, por compartilhar o conhecimento por ele adquirido de forma a contribuir nos meus ensaios, sempre demonstrando disposição e boa vontade ao dirimir minhas dúvidas quanto aos ensaios, dando-me o esclarecimento necessário para prosseguimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço a importante contribuição do 1º CRB, por disponibilizar equipamentos, espaço e pessoal, para que os ensaios pudessem ser realizados.

Agradeço à equipe do Leme e à professora Ângela. Sem eles os ensaios não teriam sido possíveis. Sou grata pela disposição da equipe, pelas longas horas disponibilizadas por eles para o rompimento dos corpos de prova, sempre de forma paciente e bem humorada, mas nunca deixando de demonstrar competência em suas atividades. Aprecio também, a ajuda da prof. Ângela por elucidar dúvidas que tive ao longo do trabalho, por sua prontidão em ensinar-me a manusear os equipamentos necessários à realização dos ensaios e por seu tempo a mim concedido.

Agradeço aos funcionários Fontes e Edgar, do Leme, por terem colaborado na confecção dos equipamentos de ruptura dos corpos de prova, sempre com grande motivação, agilidade, inteligência e simpatia.

Agradeço à Profa. Carin por sua paciência e prontidão em sanar as dúvidas que tive quanto ao trabalho. Foram ajuda de valor inestimável.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

Embora a construção civil tenha avançado tecnologicamente, a madeira continua sendo empregada neste setor. Alguns exemplos de aplicação deste material são o emprego estrutural em telhados e mezaninos. A madeira é utilizada também em aberturas, revestimentos, escoramentos ou em fôrmas para concretagem de lajes, vigas e pilares. O mercado oferece alguns materiais que podem substituir o uso da madeira na construção civil, entretanto, a tradição construtiva tem mantido o uso da madeira, em situações específicas, nas construções atuais. A madeira apresenta características que dificilmente são encontradas naturalmente em outros materiais tais como: o fato de serem considerados como reservas renováveis, possibilidade de reutilização do material, emprego de ferramentas simples, boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica, baixa massa específica e bom desempenho mecânico. A combinação de todas estas características justificam o alto grau de utilização e permanência da madeira na construção civil, apesar dos avanços tecnológicos em relação aos materiais na área. Entretanto, apesar das vantagens anteriormente apresentadas, a madeira é suscetível a ataque de insetos, possui grande variabilidade e, entre outras desvantagens, é material combustível. Devido à inflamabilidade, o tempo de combate a incêndios em edificações de madeira é reduzido. Conhecer o comportamento deste material mediante a ação do fogo permite criar planos de fuga para os ocupantes de edificações construídas em madeira quando em situação de incêndio. O presente trabalho versa sobre a perda de resistência mecânica à compressão paralela às fibras e à flexão da madeira, apresentando os resultados obtidos em ensaios laboratoriais de amostras de madeira cedrinho expostas a situação de incêndio de baixo risco, por períodos que variam de 2,5 a 10 minutos. Dos ensaios observou-se que, aos 5 minutos de exposição à simulação de incêndio de baixo risco, as perdas de resistência à compressão paralela às fibras atingiram 34% da resistência das unidades amostrais de testemunho e, após 10 minutos de exposição, a perda de resistência situou-se acima dos 90%, em relação ao mesmo referencial. Quando as unidades amostrais, submetidas ao ensaio de ruptura à flexão, apresentaram, aos 5 minutos de exposição à simulação de incêndio de baixo risco, perda de resistência de 51% em relação às unidades amostrais de testemunho e, os corpos de prova expostos a 10 minutos, tiveram perdas acima de 90% em relação ao mesmo referencial.

Palavras-chave: Madeira. Incêndio. Baixo Risco. Resistência Mecânica Residual. Compressão Paralela às Fibras. Flexão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa	16
Figura 2 – Representação esquemática da combustão da madeira	34
Figura 3 – Simulador de incêndio de baixo risco	41
Figura 4 – Disposição da carga de incêndio e recipiente	43
Figura 5 – Posicionamento dos termopares	45
Figura 6 – Equipamento de ensaio de resistência à flexão	46
Figura 7 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 2,5 minutos	48
Figura 8 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 5 minutos	49
Figura 9 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 7,5 minutos	50
Figura 10 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 10 minutos	50
Figura 11 – Seção de unidade amostral submetida a 7,5 minutos de incêndio	51
Figura 12 – Resistência à compressão paralelamente às fibras	52
Figura 13 – Percentual da resistência residual à compressão paralelamente às fibras	53
Figura 14 – Resistência à flexão	54
Figura 15 – Percentual da resistência residual à flexão	55

LISTA DE TABELAS

Tabela1 – Representação residual característica à ruptura por compressão paralelamente às fibras	52
Tabela 2 – Resistência residual característica à ruptura por flexão	54

LISTA DE SIGLAS

x_n resistência da unidade amostral n

x_{wk} resistência característica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivo secundário	14
2.3 HIPÓTESE	14
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
2.6.1 Pesquisa bibliográfica	16
2.6.2 Levantamento das principais características da madeira cedrinho	17
2.6.3 Levantamento das características dos incêndios de baixo risco	17
2.6.4 Definição do plano experimental	17
2.6.5 Obtenção dos materiais	18
2.6.6 Preparação dos corpos de prova	18
2.6.7 Realização dos ensaios	18
2.6.8 Análise dos resultados e conclusões	18
3 MADEIRA	19
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA	21
3.1.1 Peso específico	21
3.1.2 Umidade	21
3.1.3 Retratibilidade	22
3.1.4 Condutibilidade térmica	22
3.1.5 Condutibilidade sonora	23
3.1.6 Resistência ao fogo	23
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	23
3.2.1 Módulo de elasticidade	24
3.2.2 Compressão paralelamente às fibras	24
3.2.3 Compressão perpendicularmente às fibras	25
3.2.4 Resistência à flexão	25
3.2.5 Resistência à tração paralelamente às fibras	26
3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA	27

3.4 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	27
3.4.1 Características Gerais	27
3.4.2 Cedrinho	28
3.5 COMBUSTÃO DA MADEIRA	30
4 INCÊNDIOS	35
4.1 FASES DO INCÊNDIO	35
4.1.1 Pré-ignição	36
4.1.2 Crescimento do incêndio – Pré-Flashover	37
4.1.3 Incêndio Desenvolvidos – Flashover	37
4.1.4 Extinção do Incêndio	38
4.2 CLASSIFICAÇÕES DO INCÊNDIO	38
5 MÉTODO	40
5.1 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	40
5.2 SIMULADOR DE INCÊNDIO EM ESCALA REDUZIDA	41
5.3 CARGA DE INCÊNDIO	42
5.4 CORPOS DE PROVA	44
5.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	45
5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	46
5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	46
5.8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	47
6 RESULTADOS	48
6.1 SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO	48
6.2 RUPTURA À COMPRESSÃO PARALELAMENTE ÀS FIBRAS	51
6.3 RUPTURA À FLEXÃO	54
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas referentes aos materiais de construção produziram alternativas ao emprego da madeira no setor de construção civil, entretanto este material continua sendo amplamente utilizado no referido setor. Entre as diversas aplicações da madeira no setor está a sua utilização em esquadrias, estruturas de telhados e mezaninos, revestimentos decorativos e até mesmo em edificações como um todo. Utiliza-se ainda, de forma menos nobre, na confecção de fôrmas de vigas e lajes, escoras e estruturas temporárias.

Características tais como reservas renováveis, possibilidade de reutilização do material, emprego de ferramentas simples no trabalho neste material, boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica, baixa massa específica e bom desempenho mecânico, justificam o emprego da madeira na construção civil. Apesar das características favoráveis que este material apresenta, ele é suscetível ao ataque de insetos, apresenta grande variabilidade mecânica e, entre outras desvantagens, é material combustível.

Incêndios de pequeno e grandes proporções frequentemente ocorrem em edificações. Muitos deles têm sua ignição provocada pelo vazamento de gás, curto-circuito em instalações elétricas devido ao excesso de carga, esquecimento de ferro de passar roupa, fogões e eletrodomésticos ligados. Constantemente ouve-se na mídia relatos de incêndios provocados por velas deixadas acesas e por modos primitivos de aquecimento muitas vezes adotados nos dias frios de inverno.

A incerteza do comportamento físico e mecânico da madeira sob ação do fogo tem feito com que muitos projetistas de setor construtivo declinem da escolha deste material no uso estrutural. Conhecer o comportamento da madeira em termos de perda de resistência mecânica mediante situação de incêndio permite eliminar possíveis preconceitos no emprego deste material no setor da construção civil, bem como melhorar as condições de segurança nas edificações.

Motivado nas questões acima citadas, o presente trabalho tem como objetivo verificar a variação da resistência mecânica da madeira cedrinho quando exposta a incêndio de baixo risco. Para atender a este objetivo foram reunidas informações bibliográficas sobre a

composição da madeira, o comportamento do fogo em situações de incêndio, bem como normas de ensaio e proteção contra incêndio. A compreensão de como ocorre a perda de seção e resistência mecânica da madeira quando submetida a incêndio de baixo risco foi alcançada por meio de ensaios de laboratório.

O presente trabalho foi dividido nos capítulos a seguir apresentados e estes foram ordenados visando a melhor compreensão do tema abordado. No **capítulo 2**, encontram-se as diretrizes da pesquisa, contendo a questão de pesquisa, objetivos da pesquisa, hipótese, delimitações, limitações e delineamento, explicando quais foram as etapas necessárias para a realização da pesquisa proposta. O **capítulo 3** apresenta uma revisão bibliográfica sobre as características e a classificação da madeira adotada por alguns autores, as vantagens e aplicações deste material na construção civil, bem como as características físicas deste material e sua composição química. O **capítulo 4** trata da combustão da madeira, apresentando as características das fases de combustão e como a literatura as classifica. O **capítulo 5** trata dos fatores que influenciam a ignição e o desenvolvimento dos incêndios. Aborda, ainda, as classificações adotadas pelos órgãos competentes quanto aos tipos de incêndio e em que eles diferem. O **capítulo 6** apresenta as leituras de temperaturas atingidas quando dos ensaios de simulação de incêndio de baixo risco e os valores de resistência residual obtidos quando da realização dos ensaios de ruptura à compressão paralela às fibras e à flexão das unidades amostrais. O **capítulo 7** trata das considerações finais do trabalho, contendo breves comentários sobre os resultados obtidos quando da realização do trabalho e sugestões de temas para outras pesquisas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

A pesquisa a ser realizada para elaboração do trabalho de diplomação obedecerá as diretrizes apresentadas a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a variação da resistência à compressão e à flexão de amostras de madeira, expostas ao fogo, durante os períodos de 2,5; 5; 7,5 e 10 minutos, simulando incêndio de baixo risco?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação da variação da resistência à compressão paralela às fibras e à flexão de amostras de madeira mediante ação do fogo, simulando incêndio de baixo risco, após diferentes tempos de exposição.

2.2.2 Objetivo secundário

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

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho pode ser descrita da seguinte maneira: as amostras de madeira, com as dimensões empregadas, quando expostas ao fogo, sob simulação de incêndio de baixo risco,

sofrem pequena perda de resistência à compressão e à flexão nos primeiros 5 minutos, podendo-se sugerir o percentual de 30% e, aos 10 minutos de exposição ao fogo, sofrem perda significativa de resistência, sugerindo-se o percentual de 80%, antes que ocorra a queima completa das unidades amostrais.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à verificação da perda de resistência mecânica em amostras de madeira quando expostas ao fogo simulando incêndio de baixo risco.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os ensaios foram realizados em madeiras cedrinho, não se estendendo a outras espécies de madeira empregadas na construção civil brasileira;
- b) o tempo de exposição ao fogo dos corpos de prova foi limitado a 2,5; 5; 7,5 e 10 minutos;
- c) os corpos de prova foram avaliados apenas quanto à resistência à compressão paralela às fibras e à flexão;
- d) as dimensões das amostras foram limitadas segundo as exigências da norma NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B, para ensaios de compressão paralela às fibras e ensaios de flexão;
- e) a variação da resistência mecânica dos corpos de prova foi avaliada apenas quanto à exposição ao fogo simulando incêndio de baixo risco;
- f) os corpos de prova foram submetidos a ensaios de laboratório.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado por meio das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) levantamento das principais características da madeira cedrinho;
- c) levantamento das características dos incêndios residenciais;
- d) definição do plano experimental;

- e) obtenção dos materiais;
- f) preparação dos corpos de prova;
- g) realização dos ensaios;
- h) análise dos resultados e conclusões.

Na figura 1, estão representadas esquematicamente as oito etapas que delineiam o presente trabalho.



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

2.6.1 Pesquisa bibliográfica

Nessa etapa foram abordados os seguintes temas:

- a) história do uso da madeira;
- b) características químicas e físicas da madeira;
- c) características dos incêndios residenciais;
- d) comportamento da madeira mediante ação do fogo;

- e) principais formas de utilização da madeira;
- f) ensaios com madeiras.

2.6.2 Levantamento das principais características da madeira cedrinho

Esta etapa do projeto de pesquisa teve por finalidade o levantamento, por meio de pesquisa em publicações técnicas, das principais características físicas e mecânicas da madeira cedrinho, bem como formas recomendadas de utilização deste material no setor construtivo.

2.6.3 Levantamento das características dos incêndios de baixo risco

Esta etapa teve por finalidade conhecer, por meio de pesquisa bibliográfica, as diferentes classificações de incêndio adotadas no meio técnico. O conhecimento destas classificações permitiu o dimensionamento da carga de incêndio utilizada nos ensaios laboratoriais, à qual as unidades amostrais de madeira foram expostas.

O levantamento das características dos incêndios de baixo risco foi feito em livros de perícia de incêndio e normas técnicas referentes ao teste de extintores de incêndio. Realizou-se, também, consulta a uma dissertação de mestrado que adotou linha de pesquisa direcionada ao conhecimento do comportamento de incêndios em edificações, tema intimamente relacionado ao presente trabalho.

2.6.4 Definição do plano experimental

Quando da pesquisa bibliográfica, constatou-se a inexistência de normatização técnica para ensaios de simulação de incêndio em madeira. Frente à importância deste conhecimento para o perfeito andamento da pesquisa, a alternativa encontrada para a solução deste problema foi a definição de um plano experimental que incluísse o método de simulação do incêndio. Uma importante contribuição deste trabalho é propor e testar um método experimental para simulação de incêndio passível de ser reproduzido em outras pesquisas.

O método de ensaio foi elaborado por meio da compilação de diversas normas técnicas existentes. Reproduziu-se, também, parte de um experimento reportado na bibliografia utilizada.

2.6.5 Obtenção dos materiais

Definido o plano experimental, foi possível levantar os tipos de materiais necessários para a realização do experimento e suas respectivas quantidades. Dentre os materiais que deveriam ser adquiridos encontravam-se dois tipos de madeira, combustível para ignição, recipientes, grelhas, suportes, termopares e equipamentos de aquisição de dados.

2.6.6 Preparação dos corpos de prova

Nessa etapa, as madeiras selecionadas para a realização dos ensaios foram preparadas, seja quanto à estabilização de umidade, seja quanto às dimensões dos lotes e unidades amostrais, em conformidade com norma NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B. Esta norma define a quantidade de corpos de prova para caracterização da madeira em cada ensaio de resistência mecânica, bem como a forma de apresentar os resultados obtidos nos referidos ensaios. A norma define, ainda, as dimensões dos corpos de prova conforme o tipo de ensaio de resistência mecânica, e a estabilização da umidade da madeira antes de ser submetida aos ensaios, de maneira a garantir resultados homogêneos.

2.6.7 Realização dos ensaios

Preparados os corpos de prova, conforme descrito na etapa anterior, foram realizados os ensaios laboratoriais. Os ensaios foram realizados em duas etapas. A primeira etapa consistiu na exposição dos corpos de prova à simulação de incêndio de baixo risco, nos tempos de 2,5; 5; 7,5 e 10 minutos. A etapa seguinte tratou do rompimento das unidades amostrais expostas ao fogo e das unidades amostrais de testemunho, verificando-se a resistência mecânica dos corpos de prova à compressão paralela às fibras e à flexão.

2.6.8 Análise dos resultados e conclusões

Obtidos os resultados dos ensaios, juntamente com a pesquisa bibliográfica, verificou-se a perda de resistência mecânica da madeira mediante a ação do fogo simulando incêndio de baixo risco. Estas informações foram utilizadas para análise e conclusões a respeito da utilidade da madeira na construção civil no Brasil, reconhecendo as limitações do estudo e sugerindo novas pesquisas no assunto.

3 MADEIRA

Na construção civil a madeira desempenha papéis variados. Seu emprego pode ser temporário, quando este material é utilizado na confecção de fôrmas para concreto, andaimes e escoras, por exemplo, ou definitivo, utilizada nas estruturas em geral, esquadrias (portas e janelas), forros e pisos.

A forma de uso da madeira é definida pelas características que o material apresenta, bem como outros fatores, como, por exemplo, a facilidade de obtenção da matéria prima. Pianca (1977, p. 115) classifica as madeiras em três categorias: duras, médias e brandas. Nestas categorias encontram-se as seguintes madeiras e principais aplicações:

- a) duras: dentre estas as mais utilizadas na construção civil são o angico, ipê (amarelo ou roxo), cabriúva, eucalipto e o louro. As suas características favorecem o emprego destas madeiras em elementos construtivos expostos às intempéries tais como, esquadrias externas (portas, janelas, por exemplo);
- b) médias: destaca-se o emprego do pinho, cedro, peroba rosa e açoita-cavalo. As suas características favorecem o emprego desta madeira em elementos construtivos protegidos ou de caráter provisório, estando dentre as formas de aplicação o vigamento de pisos e telhados, forros, assoalhos e esquadrias internas. Na região sul do Brasil, as madeiras médias mais utilizadas são o pinho e o cedro.
- c) brandas: nesta categoria destaca-se a espécie tibaúva. As madeiras pertencentes a esta categoria são pouco empregadas na construção civil.

Segundo Petrucci (1975, p. 116), a madeira é o mais antigo material de construção utilizado pelo homem, tendo este precedido o uso da pedra, sendo utilizada em construções palafíticas. A facilidade com que este material pode ser obtido bem como a facilidade de adaptação aos fins previstos permitiu o seu uso por populações primitivas.

Dentre as vantagens que este material apresenta, Petrucci (1975, p. 116-117) cita as seguintes:

- a) [...]
- b) pode ser produzida em peças com dimensões estruturais que podem ser rapidamente desdobradas em peças pequenas, de delicadeza excepcional;
- c) pode ser trabalhada com ferramentas simples e ser reempregada várias vezes;

- d) foi o primeiro material empregado na construção civil, capaz de resistir tanto a esforços de compressão como de tração;
- e) tem massa específica baixa e grande resistência mecânica [...];
- f) permite fáceis ligações e emendas;
- g) não estilhaça quando golpeada; sua resistência permite absorver choques que romperiam ou fendilhariam outro material;
- h) apresenta boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica;
- i) no seu aspecto natural apresenta grande variedade de padrões.

No entanto, conforme Petrucci (1975, p. 117), a madeira apresenta como principais desvantagens as seguintes:

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

Algumas desvantagens podem ser minimizadas pelo processo de beneficiamento da madeira. Entre os pontos negativos acima apresentados, encontra-se a combustibilidade da madeira. Com a finalidade de atenuar tal inconveniente, a indústria química desenvolveu os chamados produtos ignífugos ou retardantes de chamas, que melhoram as condições de resistência da madeira ao fogo, retardando o ponto de inflamação.

As características físicas, mecânicas e a composição química da madeira são de grande relevância para estudo de seu comportamento e para a formulação da hipótese testada no presente trabalho. Portanto, a seguir serão abordadas as características físicas da madeira, tais como peso específico, umidade, retratibilidade, condutibilidade térmica, condutibilidade sonora e resistência ao fogo. Serão ainda consideradas as propriedades mecânicas da madeira como módulo de elasticidade, compressão paralelamente às fibras, compressão perpendicularmente às fibras, resistência à flexão, resistência à tração paralelamente às fibras, bem como a sua composição química e seu uso na construção civil.

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA

A seguir estão descritas algumas propriedades físicas da madeira da madeira sã.

3.1.1 Peso específico

Mesmo apresentando dimensões semelhantes, algumas espécies de madeira são naturalmente mais pesadas que outras. Conforme Mady (2011), geralmente espécies mais pesadas apresentam características mais duradouras. Informa ainda, que os índices de massa específica variam de acordo com a espécie e dependem de fatores estruturais bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho.

A resistência mecânica e a durabilidade elevam-se, conforme Mady (2011), proporcionalmente ao aumento do peso específico. Em contrapartida, quanto maior o peso específico da madeira, menor será a permeabilidade a soluções preservantes e a trabalhabilidade.

3.1.2 Umidade

A umidade está relacionada ao teor de água presente na madeira. Mady (2011) afirma:

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

Mady (2011) afirma ainda:

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

Conforme Pfeil e Pfeil (2003, p. 4-5), “A umidade da madeira tem grande importância sobre as suas propriedades [...]”. O grau de umidade é expresso em porcentagem relativo ao peso da madeira seca. E complementam: “Em face do efeito da umidade nas outras propriedades da madeira, é comum referirem-se estas propriedades a um grau de umidade-padrão. No Brasil e nos Estados Unidos, adota-se 12% como umidade padrão de referência.”.

3.1.3 Retratabilidade

A retratabilidade da madeira está ligada à variação da umidade em seu interior, o que é função, dentre outros fatores, da temperatura à que a madeira é exposta, sendo assim de extrema relevância em casos de altas temperaturas, como em um incêndio. A retratabilidade é definida por Mady (2011) como sendo “[...] o fenômeno de variação nas dimensões e no volume em função da perda ou ganho de umidade que provoca contração em uma peça de madeira.”.

A contração da madeira, conforme Mady (2011), pode ocorrer e ser avaliada em três aspectos:

- a) tangencial: variação das dimensões da madeira no sentido perpendicular aos anéis de crescimento;
- b) radial: trata-se da variação das dimensões da madeira no sentido dos anéis de crescimento;
- c) volumétrica: considerando como parâmetro o volume total da madeira, trata-se da variação dessa dimensão.

Conforme Pfeil e Pfeil (2003, p. 5), a madeira apresenta o seguinte comportamento quanto à retração e inchamento:

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

3.1.4 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica dos materiais tem um papel importante na ignição e desenvolvimento de um incêndio, bem como na dilatação excessiva da estrutura. A madeira leva vantagem sobre outros materiais neste aspecto, pois Mady (2011), afirma que “Devido à organização estrutural do tecido, que retém pequenos volumes de ar em seu interior, a madeira impede a transmissão de ondas de calor ou frio. Assim a madeira torna-se um mau

condutor térmico, isolando calor ou frio.”. Conforme Mady (2011), a condutibilidade térmica, para qualquer espécie, depende do peso específico e do teor de umidade contido na peça de madeira. Quanto maior for o peso específico e o teor de umidade, maior será a capacidade da madeira de conduzir calor. Assim, as madeiras secas, com um teor de umidade constante, apresentam melhor desempenho como isolante térmico. A má condutibilidade térmica, para Anastácio (2010, p. 15), é uma característica importante que confere vantagem em relação a outros materiais, visto que dificulta a elevação da temperatura em zonas contíguas às que se encontram em combustão, evitando assim a dilatação excessiva da estrutura.

3.1.5 Condutibilidade sonora

Ao entrar em choque com superfícies de madeira, segundo Mady (2011), a propagação de ondas sonoras é reduzida. O autor afirma, ainda, que “O procedimento de empregar madeira como revestimento de paredes enfraquece a reverberação sonora e melhora a distribuição das ondas pelo ambiente, tornando-a um produto adequado para o condicionamento acústico.”.

3.1.6 Resistência ao fogo

Quanto à resistência ao fogo, conforme Mady (2011), a madeira apresenta a seguinte característica:

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

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Sendo um material anisotrópico, conforme Coimbra et al. (1976, p. 561), a madeira possui propriedades físicas e mecânicas diferentes, segundo a orientação considerada com relação às direção das fibras. Do ponto de vista da resistência mecânica, a orientação das fibras desempenha um papel muito importante. Além deste fator, outros podem, em intensidade variada, exercer influência sobre as propriedades mecânicas da madeira, tais como peso

específico, proveniência da madeira, condições de desenvolvimento e teor de umidade. Além dos fatores já mencionados, a madeira apresenta comportamento diverso aos esforços que lhe são aplicados, segundo a natureza da carga e a duração do esforço. Esta seção destina-se à análise das principais características mecânicas da madeira, sendo elas módulo de elasticidade, compressão paralelamente às fibras, compressão perpendicularmente às fibras, resistência à flexão e resistência à tração paralelamente às fibras.

3.2.1 Módulo de elasticidade

Conforme Coimbra et al. (1976, p. 567-568), a determinação do módulo de elasticidade da madeira faz-se mediante resultados obtidos experimentalmente em laboratório. Nestes experimentos são medidas as deformações longitudinais do material quando submetidos a esforços axiais de compressão.

O módulo de elasticidade é calculado com base na fórmula que exprime a Lei de Hooke da proporcionalidade entre tensões e deformações. O módulo de elasticidade à tração é calculado do mesmo modo que o módulo de elasticidade à compressão, entretanto, conforme Coimbra et al. (1976, p. 568), na prática pode-se considerar equivalentes em valor.

Coimbra et al. (1976, p. 568) afirmam:

O módulo de elasticidade da madeira pode variar, em geral, desde valores inferiores a 100.000 kg/cm² até valores superiores a 250.000 kg/cm² [...]. Diversos fatores contribuem para essa variação ser mais ou menos ampla no valor do módulo, como peso específico (espécie), direção da carga com relação à orientação das fibras, etc. A influência desse último fator é apreciável e temos uma grande variação no valor do módulo de elasticidade, segundo a carga for aplicada paralela ou perpendicularmente às fibras. [...] Em termos gerais, o módulo de elasticidade paralelamente às fibras é aproximadamente dez vezes maior que o módulo de elasticidade perpendicularmente às fibras. Essa relação pode variar se o carregamento transversal se fizer radiante.

3.2.2 Compressão paralelamente às fibras

Coimbra et al. (1976, p. 568-569) observam que o valor da tensão de ruptura em corpos de prova de madeira depende da espécie considerada e da umidade, bem como da forma e das dimensões do corpo de prova. Esforços secundários tendem a afastar transversalmente as fibras quando estas sofrem esforços axiais paralelos. Entretanto, estes esforços são

contrabalançados pelos esforços de atrito desenvolvidos nas superfícies de topo, que estão em contato com as prensas.

Coimbra et al. (1976, p. 570), quanto aos ensaios de compressão paralelamente às fibras, expõem o seguinte:

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

[...] o limite de resistência da madeira com 12% de umidade varia entre 230 e 850 kg/cm².

3.2.3 Compressão perpendicularmente às fibras

Conforme Coimbra et al. (1976, p. 570), à medida que a carga transversal é aumentada, as fibras comprimidas normalmente ao seu comprimento tendem a se aproximar. A aproximação torna o tecido lenhoso mais compacto e denso. Quando é ultrapassado o período de proporcionalidade, a deformação da madeira ocorre praticamente sob carga constante. Aumentando-se os valores de carga, a madeira tende a apresentar fendilhamento nos extremos.

O verdadeiro valor de resistência à compressão normal às fibras da madeira, conforme Coimbra et al. (1976, p. 570), é obtido por meio do carregamento uniforme sobre toda a superfície superior do corpo de prova.

3.2.4 Resistência à flexão

O cálculo das tensões de compressão e tração em peças fletidas na seção transversal se dá, conforme Coimbra et al. (1976, p. 573-574), por meio da fórmula de Navier. Entretanto, o emprego desta fórmula exige que o material da peça respeite as condições a seguir:

- a) obedecer a Lei de Hooke, exigindo assim, que o material seja homogêneo, isótropo e elástico;
- b) o material deve resistir igualmente aos esforços de compressão e tração e ter o mesmo módulo de elasticidade nos dois casos;

- c) as deformações devem ser proporcionais às distâncias das fibras consideradas ao eixo neutro. Conferindo assim, distribuição linear de deformações numa seção transversal qualquer.

Quanto à resistência à flexão, conforme Coimbra et al. (1976, p. 574), devido à sua natureza anisotrópica, as propriedades mecânicas da madeira variam da seguinte forma:

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

Conforme Coimbra et al. (1976, p. 574), a duração das cargas tem influência sobre o valor de resistência à flexão. As cargas de longa duração, determinam deformação lenta da peça fletida. Sendo assim, os valores de resistência decrescem rapidamente no início de aplicação da carga e depois os valores tendem a se estabilizar. A presença de nós, desvio de fibras, bolsas de resina, etc., na zona de máxima sollicitação pode diminuir consideravelmente a resistência à flexão.

3.2.5 Resistência à tração paralelamente às fibras

Conforme Coimbra et al. (1976, p. 582), a madeira apresenta elevada resistência à tração axial, podendo esta atingir de duas a três vezes o valor da resistência à compressão paralelamente às fibras. Isso ocorre devido ao esforço de tração axial aproximar as fibras, aumentando a aderência entre elas, conseqüentemente, conferindo maior resistência ao material. Nos ensaios de compressão axial, se dá o contrário. Os esforços tendem a afastar as fibras, aumentando a tendência de flambagem individual.

Coimbra et al. (1976, p. 574) acrescentam ainda, que a presença de defeitos na madeira, tais como nós, desvio de fibras, entre outros, alteram sensivelmente o valor da resistência à tração. Os ensaios mais regulares e os resultados mais uniformes foram obtidos nos casos em que as fibras tracionadas eram perfeitamente paralelas ao eixo longitudinal ao corpo de prova, evidenciando a importância da orientação das fibras quando do ensaio.

3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Anastácio (2010, p. 8), quanto à composição química da madeira, afirma:

Segundo a sua natureza a madeira é um material celular natural de constituição não fixa e definida. De uma forma geral é composta por 30% lignina, 45% de celulose, 15% de hemicelulose, 5% de produtos solúveis e 5% de minerais.

Levando em conta as diversas espécies de madeiras, pode-se afirmar que não há diferenças consideráveis em relação à composição química elementar da madeira, sendo os principais elementos existentes o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O) e o nitrogênio (N), este último em pequenas quantidades, encontrando-se ainda pequenas quantidades de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), e outros, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira.

3.4 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira é amplamente utilizada na construção civil no Brasil. A seguir, são apresentadas as características gerais da madeira empregada na construção civil, com maior detalhamento a respeito da madeira utilizada nos ensaios deste experimento, o cedrinho.

3.4.1 Características Gerais

Conforme a ABIMCI (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE, 2011, p. 2) a madeira na construção civil é aplicada de pelo menos três maneiras: acabamentos, fôrmas de concreto e estruturalmente. De forma mais detalhada, a aplicação da madeira na construção civil pode ser:

- a) pesada interna: peças de madeira serrada ou painel laminado colado utilizados na forma de vigas, caibros, pranchas e tábuas em estruturas de telhado;
- b) leve externa e interna estrutural: tábuas e pontalotes empregados temporariamente na construção de andaimes, escoramento e fôrmas para concreto;
- c) interna decorativa: empregado em forros e painéis, lambris e guarnições, exigindo que a madeira apresente cor e desenhos decorativos;
- d) leve interna, de utilidade geral: também aplicada em forros, painéis, lambris e guarnições. No entanto, o aspecto decorativo da madeira não é fator limitante ao seu uso;
- e) leve em esquadrias: portas, venezianas, caixilhos, molduras, etc.;

- f) assoalhos domésticos: produtos de madeira sólida, bem como tacos, tácoes, assoalhos, parquetes, etc.

Na construção civil, como citado anteriormente, frequentemente se observa a utilização das seguintes espécies de madeira: cedrinho, louro freijó, ipê-roxo, jatobá e pinho. Entretanto, o presente trabalho limitou-se apenas à madeira cedrinho, sendo assim, a seguir são apresentadas as características principais deste material.

3.4.2 Cedrinho

Conforme o IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011), a madeira cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm, *Vochysiaceae*) possui os seguintes nomes populares: “[...] bruteiro, cachimbo-de-jabuti, cambará, cambará-rosa, cedrilho, jaboti, jaboti-da-terra-firme, quaruba-vermelha, quarubarana, quarubatinga, verga-de-jabuti.”. Segundo o trabalho da referida instituição, no Brasil, esta madeira ocorre na: “[...] Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia.”.

A madeira cedrinho pode ser classificada por meio de características sensoriais, ou seja, pela aparência, cor, aroma, sabor e textura. Dentre as características sensoriais deste material são alistados as seguintes, conforme o IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011), “[...] cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho avermelhado; sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade baixa; grã direita a revessa; textura média a grossa.”.

Segundo o trabalho do IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO¹, 1983 apud INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO², 1989 apud INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011), o cedrinho possui a seguinte descrição anatômica macroscópica:

- a) parênquima axial: visível a olho nu, em faixas largas e longas, tangenciando os vasos, e também em trechos curtos;

¹ Site não indica referência.

² Site não indica referência

- b) raios: visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos; poucos;
- c) vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes; muito poucos a poucos; porosidade difusa; solitários e múltiplos de dois a três; obstruídos por tilos;
- d) camadas de crescimento: indistintas;
- e) floema incluso: presente nas faixas do parênquima.

Quanto à durabilidade natural o cedrinho, conforme o IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011), “[...] apresenta baixa durabilidade ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos)”. Quanto à tratabilidade, segundo o mesmo autor, “[...] o cerne e o alburno são moderadamente fáceis de preservar em processo sob pressão.”.

Dentre os usos desta madeira na construção civil estão, conforme o IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011):

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

3.5 COMBUSTÃO DA MADEIRA

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

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

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

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

Para Lepage et al. (1986, p. 220-221), apesar de ser possível observar a queima da madeira com formação de labaredas, ela não entra em combustão diretamente. Primeiramente, a madeira será decomposta por pirólise em produtos voláteis e combustíveis que irão formar chamas após a ignição. Apenas em casos específicos a madeira pode entrar em combustão diretamente, conforme os seguintes casos listados abaixo:

- a) irradiação de calor tão intensa sobre a superfície da madeira levando o material a atingir o ponto de ignição, em frações de segundo, pode-se considerar que a madeira entrou em combustão diretamente;
- b) se o pó da madeira seca estiver suspenso no ar, em proporções que permitam a presença de oxigênio suficiente para sua combustão e que mantenha uma elevada densidade.

A combustão normal da madeira envolve os seguintes fenômenos químicos consecutivos, conforme listados por Lepage et al. (1986, p. 221):

- a) pirólise da madeira;
- b) combustão dos produtos da pirólise.

Na pirólise da madeira ocorre a transformação dos compostos de elevado peso molecular, por degradação térmica, em compostos de reduzido peso molecular, conforme Lepage et al.

(1986, p. 221). O carvão é um exemplo de produto gerado na pirólise. A etapa subsequente, ou seja, a combustão dos produtos de pirólise, é dada pela oxidação das substâncias geradas na etapa anterior.

A queima da madeira ocorre em diversos estágios. Lepage et al. (1986, p. 221), descrevem o estágio inicial da seguinte forma:

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

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

O avanço da isoterma T_0 , que corresponde à temperatura pouco acima da temperatura da madeira, conforme Lepage et al. (1986, p. 221), cria uma região cuja temperatura está compreendida entre T_0 e 200°C . A região entre a isoterma T_0 e 200°C é denominada zona A. Nesta região observação a formação de vapor de água e traços de gás carbônico, ácido fórmico, ácido acético e de glioxal, ocorrendo a secagem da madeira.

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

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

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

Mantendo o aquecimento externo da madeira, a temperatura da superfície da peça de madeira, conforme Lepage et al. (1986, p. 223), eleva-se a 280°C . Consequentemente, as isotermas que delimitam a zona A deslocam-se para o interior da peça. A região localizada entre as isotermas de 200°C e 280°C é denominada zona B. Conforme Lepage et al. (1986, p. 223), a combustão da madeira segue da seguinte forma:

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

O ponto de ignição da madeira ocorre, conforme Lepage et al. (1986, p. 224), na temperatura do qual há saldo exotérmico no balanço da energia da pirólise endotérmica e a oxidação exotérmica. Vários pesquisadores, com certa discrepância, têm determinado o ponto de ignição entre os seguintes valores: 235 a 240°C, 232 a 260°C, 192 a 220°C, podendo chegar ao entorno de 150°C.

Mantendo o aquecimento externo, as isotermas deslocam-se no sentido do fluxo de calor. A superfície da madeira, conforme Lepage et al. (1986, p. 224), chega a atingir 500°C. A região localizada entre as isotermas de 280°C e 500°C é denominada zona C.

Na zona C, Lepage et al. (1986, p. 224) afirmam que através de análise diferencial, nota-se que até a temperatura de 320°C a pirólise da madeira tem caráter endotérmico. Tal fenômeno ocorre devido à degradação da celulose, concomitantemente com a absorção de energia pela lignina. Lepage et al. (1986, p. 224-225) prosseguem:

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

Entre 280 e 350°C, é possível verificar que a madeira perde quantidade considerável da massa inicial, aproximadamente 68%, e entre 350 e 370°C, a perda de massa diminui para cerca de 20% do valor inicial. Na zona C, conforme Lepage et al. (1986, p. 225), verifica-se a formação de carvão vegetal.

Após o processo ora descrito, os produtos de pirólise com alto peso molecular sofrem pirólise secundária e reações entre si, antes de deixarem o sistema. As reações secundárias podem ser

catalisadas pelo carvão gerado. Devido as condições em que o carvão foi formado, conforme Lepage et al. (1986, p. 225), este apresenta elevada atividade catalítica.

Na zona C ocorre a queima dos gases e vapores efluentes da peça de madeira. Neste momento surge a chama luminosa de difusão. Nas chamas de difusão, atingem-se temperaturas da ordem de 1100°C. Conforme Lepage et al. (1986, p. 226), “Cerca de metade a dois terços do calor disponível na madeira é liberado por meio de chama; o restante é liberado na combustão do carvão vegetal.”.

Segundo Lepage et al. (1986, p. 226), a camada de carvão tem o seguinte comportamento:

A camada deste carvão serve de isolante térmico, pois a condutibilidade térmica do carvão é apenas um terço da condutibilidade da madeira. Portanto, o depósito de carvão tende a retardar o progresso da combustão da madeira, reduzindo a quantidade de calor que tem acesso ao interior da peça. Por este motivo, nota-se que após as chamas iniciais, mais vigorosas, há um amortecimento da combustão, como resultado da diminuição do fluxo de calor para as zonas onde se processa a pirólise da madeira.

Continuando a combustão da peça de madeira, a temperatura da superfície eleva-se acima de 500°C. As isotermas deslocam-se ainda mais no sentido do fluxo de calor. A região situada entre a isoterma de 500°C e a superfície com temperatura acima de 500°C é denominada zona D.

Na zona D, os produtos provenientes das zonas anteriores sofrem reações secundárias mais energéticas que as da zona C. Conforme Lepage et al. (1986, p. 226), “Os alcatrões e produtos voláteis da zona C sofrem pirólise, formando produtos altamente combustíveis.”.

De acordo com Lepage et al. (1986, p. 225), do ponto de vista da combustão, os produtos advindos da zona D são altamente inflamáveis. Estes podem manter a combustão, enquanto houver a sua produção por pirólise da madeira nas zonas anteriores.

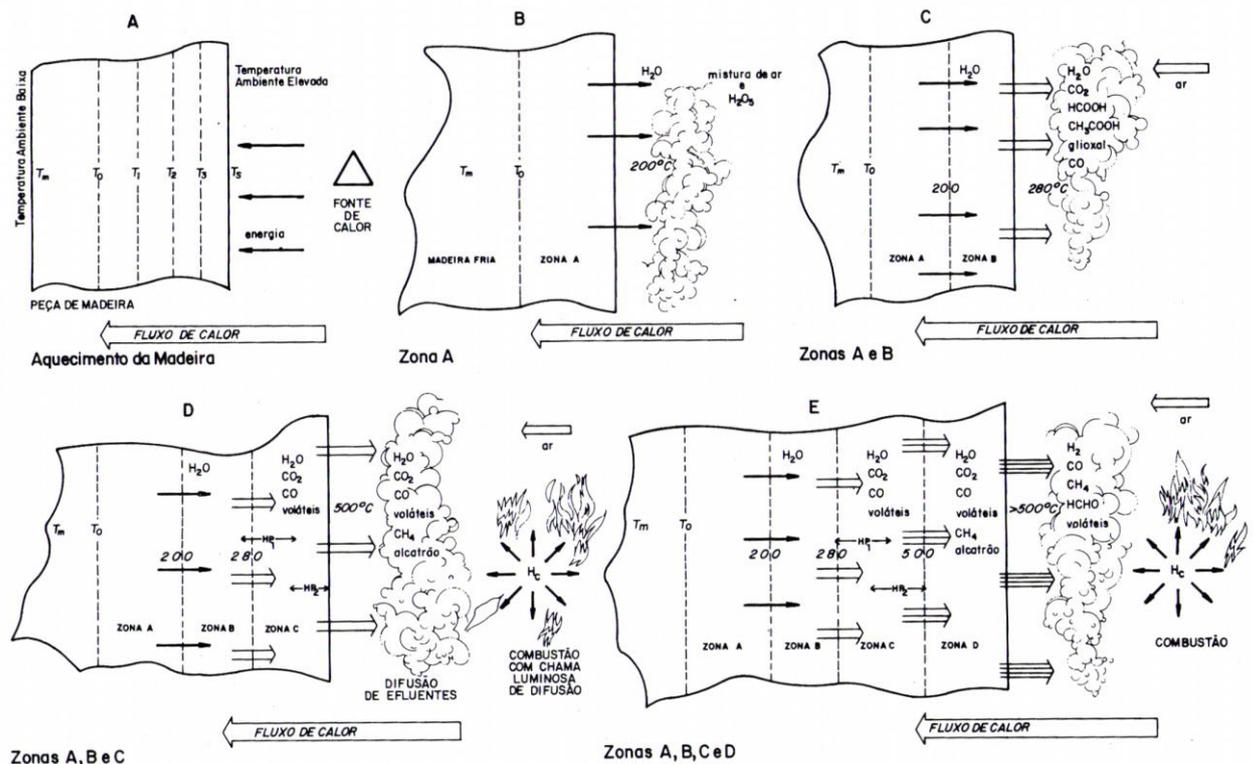
Lepage et al. (1986, p. 226-227) concluem a explicação quanto ao processo de combustão da madeira da seguinte forma:

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

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

Na figura 2 estão representados os deslocamentos das isothermas quando da exposição da madeira a fonte de calor. As zonas de temperatura, denominadas zonas A, B, C e D, estão identificadas na figura.

Figura 2 – Representação esquemática da combustão da madeira



(fonte: LEPAGE et al., p.222)

4 INCÊNDIOS

Neste capítulo serão abordados os fatores que influenciam a ignição e o desenvolvimento dos incêndios. Abordar-se-á também, as classificações adotadas pelos órgãos competentes quanto aos tipos de incêndios e no que eles diferem.

4.1 FASES DO INCÊNDIO

A NBR 13860 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b, p. 7), define incêndio como “[...] fogo fora de controle.”. Conforme Seito et al. (2008, p. 43), “Essas conceituações deixam claro que o incêndio não é medido pelo tamanho do fogo.”.

Seito et al. (2008, p. 43) listam fatores que concorrem para o início e desenvolvimento dos incêndios. Estes fatores justificam a variabilidade dos incêndios, inexistindo dois incêndios iguais. Os fatores são:

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

Segundo Seito et al. (2008, p. 44), “O incêndio inicia-se, na sua maioria, bem pequeno. O crescimento dependerá: do primeiro item ignizado, das características do comportamento ao

fogo dos materiais na proximidade do item ignizado e sua distribuição no ambiente.”. Entretanto, a ignição pode ocorrer de forma rápida, quando provocada por uma explosão, por exemplo.

Os meus autores destacam que os incêndios desenvolvem-se em três fases distintas, sendo elas:

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

Tendo em vista que o incêndio desenvolve-se em fases distintas, torna-se importante a compreensão dos fatores que diferenciam estas fases. A seguir são apresentadas as características das fases de incêndio, sendo elas: pré-ignição, pré-*flashover* e *flashover*.

4.1.1 Pré-ignição

Seito et al. (2008, p. 45) consideram que “Nesse estágio [pré-ignição] podem ser consideradas duas fases: abrasamento e chamejamento.”. Na fase de abrasamento a combustão ocorre sem chamas e de forma lenta, com pouca produção de calor. Entretanto, “[...] com potencial para preencher o compartimento com gases combustíveis e fumaça.”.

Os autores indicam que a combustão por abrasamento, “[...] pode ter duração de algumas horas antes do aparecimento de chamas.”. Os autores acrescentam ainda que “Devido à produção de pouco calor, a força de flutuação da fumaça e ou dos gases gerados é pequena e seus movimentos serão determinados pelo fluxo do ambiente.”.

Entretanto, referente ao chamejamento, para Seito et al. (2008, p. 45), “[...] é a forma de combustão que estamos acostumados a ver, ou seja, com chama e fumaça.”. Os gases e a fumaça, bem como o calor, desenvolvem-se de forma mais rápida.

4.1.2 Crescimento do incêndio – *Pré-Flashover*

A fase de crescimento do incêndio pode ser classificada, também, como fase de aquecimento e *pré-flashover*. Nesta fase de crescimento do incêndio, conforme Seito et al. (2008, p. 45), ocorre “[...] a propagação do fogo para outros objetos adjacentes e ou para o material da cobertura ou teto.”. A temperatura do ambiente em que o incêndio está desenvolvendo-se “[...] se elevará na razão direta do desenvolvimento do calor dos materiais em combustão.”.

Rodrigues (2009, p. 39) descreve esta fase da seguinte forma:

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

Dehaan³ (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 39-40), complementa a descrição do *pré-flashover* da seguinte maneira:

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

4.1.3 Incêndio desenvolvido – *Flashover*

Dehaan⁴ (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 40) indica que o *flashover* ocorre nas seguintes condições:

[...] quando a temperatura da camada superior gera uma taxa de liberação de calor de 20 kW/m² ao nível do chão (próximo de 600°C), é atingida a temperatura de ignição dos resíduos em suspensão (fumaça), fazendo que com todo o ambiente seja envolvido por chamas e entre em combustão. Este fenômeno é chamado *flashover*, o qual causa um aumento abrupto de temperatura do compartimento.

³ DEHAAN, J. D. *Kirk's fire investigation*. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

⁴ op. cit.

O *flashover*, conforme Quintiere⁵ (1998 apud RODRIGUES, 2009, p. 40), “[...] marca a transição em que o incêndio passa a ser controlado pelas condições de ventilação e pela geometria do edifício [...]”. Referente ao período do incêndio em que ocorre o *flashover*, ou seja, ignição súbita, Rodrigues (2009, p. 41) indica que “[...] pesquisas mostram que um incêndio atinge seu ponto de ignição súbita generalizada comumente entre 10 e 30 minutos depois de seu início, dependendo do calor liberado, da área de ventilação e da carga de incêndio para atingir este ambiente propício.”.

Nesta etapa, ou seja, no pós-*flashover*, o incêndio está plenamente desenvolvido. Conforme indica Quintiere⁶ (1998 apud RODRIGUES, 2009, p. 42), “Nesta fase, todos os combustíveis estarão em combustão liberando suas máximas taxas de calor, chegando a um temperatura entre 800 e 1000°C [...]”.

4.1.4 Extinção do incêndio

Segundo Dehaan⁷ (2007 apud RODRIGUES, 2009, p. 42), esta fase de decaimento ou resfriamento do incêndio, e conseqüente extinção do mesmo, “É também chamado *smoldering phase* (fase de brasa), justamente por não apresentar mais chama deflagrada, e sim, combustão em brasa com conseqüente diminuição da temperatura.”. O autor, complementando este conceito, menciona que a *smoldering phase* ocorre devido à ventilação inadequada. Tendo sido consumidos os combustíveis sólidos, a pirólise diminui.

4.2 CLASSIFICAÇÕES DO INCÊNDIO

As normas técnicas brasileiras utilizam-se de diversas formas de classificação para caracterizar o tipo de incêndio, uma delas é por meio do grau de risco da edificação. Conforme Rodrigues (2009, p. 30), “Grau de risco é a probabilidade de um incêndio em uma edificação e o nível de dificuldade para debelá-lo com o mínimo de prejuízo ao patrimônio e à vida.”.

⁵ QUINTIERE, J. G. **Principles of fire behavior**. New York: Delma, 1998.

⁶ op. cit.

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

Quanto ao grau de risco, São Paulo (2001, p. 13), define valores que distinguem e limitam os tipos de incêndio. O autor classifica os incêndios da seguinte forma, quanto ao risco:

- a) baixo: até 300MJ/m²;
- b) médio: entre 300 e 1200MJ/m²;
- c) alto: acima de 1200MJ/m².

Porto Alegre (2001, p. 26) classifica os incêndios em quatro categorias, denominadas classes, sendo distintas entre si pelo tipo de material combustível envolvido. Conforme essa lei, os incêndios de classe A são aqueles que ocorrem em “[...] materiais combustíveis sólidos, tais como madeira, papel, tecido, lixo e assemelhados.”.

5 MÉTODO

Quando da pesquisa bibliográfica, constatou-se a inexistência de normatização técnica para ensaios de simulação de incêndio em madeira. Frente à importância deste conhecimento para o andamento da pesquisa, a alternativa encontrada para a solução deste problema foi a definição de um método, que fosse passível de posterior reprodução e escolha dos materiais necessários.

A forma encontrada para a definição do método de simulação de incêndio de baixo risco em amostras de madeira foi a reunião e composição de diversas normas técnicas existentes, seguindo também a metodologia empregada por Rodrigues (2009, p. 111). Sendo assim, o objetivo do presente capítulo é demonstrar o método adotado nos ensaios laboratoriais, as normas técnicas e pesquisas que foram utilizadas e os parâmetros por elas definidas. Este objetivo será alcançado por meio dos seguintes itens: procedimentos de ensaio, simulador de incêndio em escala reduzida, carga de incêndio, corpos de prova, medição de temperatura e apresentação dos resultados.

5.1 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos listados a seguir:

- a) empilhamento da carga de incêndio;
- b) colocação do recipiente de aço, com dimensões de 40x50 cm e 5 cm de altura, sob o engradado de madeira;
- c) disposição dos corpos de prova, 6 unidades amostrais a cada ensaio, acima do engradado, a 65 cm do piso;
- d) posicionamento dos termopares no engradado, no ambiente e nas unidades amostrais;
- e) disposição do combustível de ignição no recipiente metálico, na quantidade de um litro, e posterior ignição;
- f) quando da ignição do combustível, início da cronometragem, com a finalidade de controlar o tempo de incêndio;

- g) atingido o tempo de incêndio para o ensaio executado, extinção do incêndio;
- h) repetição dos procedimentos acima listados considerando tempos e corpos de prova diferentes;
- i) rompimento dos corpos de prova;
- j) compilação das tensões de ruptura obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão, calculando-se em seguida as resistências características.

5.2 SIMULADOR DE INCÊNDIO EM ESCALA REDUZIDA

A simulação de incêndio de baixo risco foi realizada em um simulador de incêndio em escala reduzida construído no Quartel do Comando do Corpo de Bombeiros de Rio Grande do Sul, conforme figura 3. O simulador foi previamente utilizado nos experimentos envolvidos na dissertação de mestrado de Rodrigues (2009), que trata da análise de eficiência de sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais, considerando incêndios de baixo e médio risco.

Figura 3 – Simulador de incêndio de baixo risco



(fonte: elaborado pela autora)

Uma vez que o simulador reproduz as condições da compartimentação de uma habitação popular, em escala reduzida a 1/3 das dimensões reais, ele tem condições propícias para a

realização dos ensaios referentes à perda da resistência de estruturas de madeira em incêndios de baixo risco, geralmente ligados a condições residenciais. Assim sendo, esse simulador é adequado aos experimentos propostos para o presente trabalho.

Conforme Rodrigues (2009, p. 112), quanto às características do simulador:

Este simulador consiste em três compartimentos sobrepostos, construídos em alvenaria convencional, separados por lajes de concreto, com resistência média (fck) de 40 MPa e espessura de 4 cm. Internamente, cada compartimento possui dimensões de 1x1 metro e 80 cm de altura.

[...]

Os compartimentos foram revestidos por dentro com blocos de concreto celular autoclavado, comprovadamente resistente ao fogo, com juntas secas, fixadas às paredes do simulador com argamassa convencional, bem como as lajes foram colocadas sobre estes blocos apenas utilizando seus pesos próprios para fixação [...].

Utilizou-se, nos ensaios realizados no presente trabalho, apenas o compartimento central do simulador. A vedação do compartimento, em sua porção frontal, foi feita, conforme Rodrigues (2009, p. 114), “[...] por meio de chapas de aço com espessura de 2 mm [...]” fixados ao simulador por abraçadeiras.

5.3 CARGA DE INCÊNDIO

São Paulo (2011) define que carga de incêndio “[...] é a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis contidos em um espaço, inclusive o revestimento das paredes, divisórias, pisos e tetos.”. O escopo deste trabalho são incêndios de baixo risco. Segundo São Paulo (2011), são classificados como incêndios de baixo risco aqueles cuja carga de incêndio não ultrapasse 300MJ/m².

Rodrigues (2009, p. 117-118) dimensionou a carga de incêndio correspondente a incêndios de baixo risco para a escala do simulador utilizado em seu trabalho e que foi reutilizado no presente trabalho. Assim sendo, para incêndios de baixo risco, foram necessários, conforme o mesmo autor, os seguintes materiais:

- a) a quantidade de madeira foi utilizada de acordo com a carga de incêndio requerida, utilizando o poder calorífico específico da madeira igual a 19 MJ/kg,

determinado pela NBR 14.432⁸, totalizando os pesos respectivos para risco baixo [...] em escala reduzida de 9,1 kg [...];

- b) devido à proibição da comercialização da madeira pinho-do-Paraná especificada na norma, através da Portaria do IBAMA nº 37-N de 03 de abril de 1992, foi utilizada a madeira pinus advinda de reflorestamento e disponível no mercado;

[...]

- d) o recipiente para o líquido inflamável de ignição confeccionado em aço de espessura de 2 mm, apresentava dimensões de 40x50 cm e 5 cm de altura;
- e) o engradado de madeira ficou à altura do solo de 10 cm, sendo suportado por blocos de concreto celular.

Quanto às madeiras que compunham o engradado, estas possuíam seções quadradas medindo 4,5x4,5 cm e 50 cm de comprimento. As quantidades foram determinadas considerando o peso total necessário para a carga de incêndio de baixo risco, após período de estabilização da umidade das referidas peças. Sendo assim, foram necessárias 18 peças de madeira de pinus, nas dimensões referidas, para a carga de incêndio de 300MJ/m². A figura 4 ilustra a forma como as madeiras que compunham o engradado da carga de incêndio e o recipiente foram dispostas no simulador de incêndio.

Figura 4 – Disposição da carga de incêndio e recipiente



(fonte: elaborado pela autora)

Rodrigues (2009, p. 118) utilizou, para a ignição, “[...] gasolina de aviação, na quantidade especificada de um litro.”. Entretanto, este combustível possui alto teor de chumbo, sendo

⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimentos. Rio de Janeiro, 2001.

liberado na atmosfera quando da sua queima. Ciente do potencial de contaminação que este combustível oferece, a gasolina de aviação foi substituída por gasolina aditivada *Podium*, da Petrobrás, considerando octanagem semelhante, na mesma quantidade de um litro.

5.4 CORPOS DE PROVA

O anexo B da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 47) trata da determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Este anexo contém instruções para a realização de ensaios à compressão paralela às fibras e à flexão em unidades amostrais de madeira. Determina qual a quantidade de corpos de prova para cada tipo de caracterização e suas dimensões, velocidades de aplicação de força nos ensaios de ruptura e equipamento necessário para a realização do mesmo.

Segundo o item B.2 Amostragem da referida NBR 7190, a quantidade de corpos de prova é determinada conforme o tipo de caracterização desejada. Sendo o cedrinho uma madeira de propriedades conhecidas, pode-se assumir que a caracterização realizada no presente trabalho é simplificado, conforme nomenclatura adotada em Norma. Sendo assim, fez-se necessário a utilização de seis corpos de prova para cada teste realizado.

Definida a quantidade de corpos de prova, o passo seguinte foi a determinação de suas dimensões para caracterização da resistência à compressão paralela às fibras e à flexão. O anexo B, item B.8 da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 50) define que “A resistência à compressão paralela às fibras [...] é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento [...]”. Sendo assim, adotou-se estas dimensões, ou seja, seção quadrada de 5,0 cm e 15 cm de comprimento, para os corpos de prova destinados ao ensaio de ruptura à compressão paralelamente às fibras.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 52) define, para o ensaio de resistência à flexão, que “Os corpos de prova devem ter forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento, na direção paralela às fibras, de 115 cm [...]”. Sendo assim, para os corpos de prova destinados à ruptura à flexão, foram adotadas as dimensões sugeridas na referida norma, ou seja, seção prismática de 5,0 cm e comprimento de 115 cm.

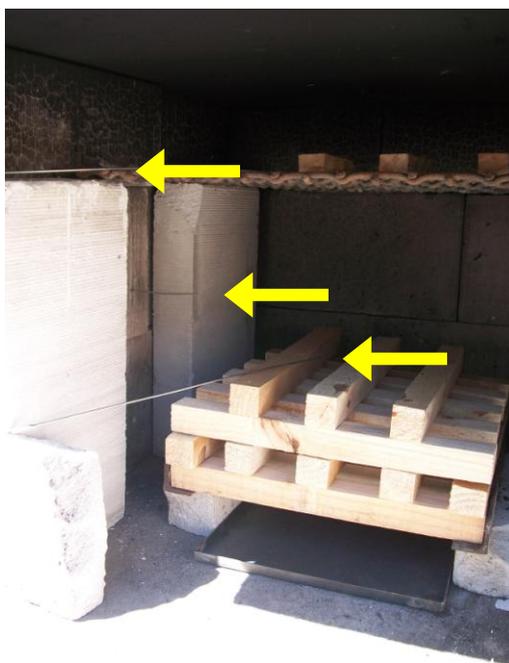
5.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Com a finalidade de acompanhar o desenvolvimento das temperaturas no interior do forno de ensaio, foram utilizados três termopares do tipo K. Os termopares foram dispostos em três regiões distintas, sendo elas:

- a) pilha de madeira: disposta sobre o engradado de madeira ignizado;
- b) ambiente: situado em posição intermediária à pilha e aos corpos de prova;
- c) corpos de prova: posicionado de forma centralizada às unidades amostrais.

Na figura 6, capturada quando da preparação do simulador para a realização da simulação de incêndio, observa-se os locais acima descrito, onde foram posicionados os termopares. A nomenclatura aqui adotada foi utilizada posteriormente nos gráficos das leituras de temperaturas obtidas. O termopar responsável pelas leituras de temperatura do ambiente foi posicionado no simulador através de um orifício existente na parede do simulador, ficando 9,0 cm da vareta de medição exposta às chamas. Os demais termopares foram apoiados sobre a pilha de madeira e os corpos de prova, conforme sinalizado na figura.

Figura 5 – Posicionamento dos termopares



(fonte: elaborado pela autora)

5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão paralela às fibras nas unidades amostrais foi realizado segundo as recomendações da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo b. A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 52) recomenda a utilização de rótula entre o corpo de prova e o atuador para o ajuste da unidade amostral no equipamento de ensaio. Quanto ao carregamento, o autor define que “A resistência deve ser determinada com um carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10MPa/min.”.

5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio de resistência à flexão nas unidades amostrais foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo b. Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 63), “No ensaio, o corpo de prova deve ser vinculado a dois apoios móveis, com vão livre entre apoios de 21h [ou seja, vinte e uma vezes a altura da seção da unidade amostral], sendo o equilíbrio garantido pelo atrito do atuador.”. A referida Norma, recomenda a utilização de um cutelo acoplado ao atuador para aplicação de carga concentrada. Quanto ao carregamento, fica definido que este “[...] deve ser monotônico crescente, com uma taxa de 10MPa/min.”. Destas recomendações resultou o equipamento, conforme figura 5, confeccionado pela equipe do LEME.

Figura 5 – Equipamento de ensaio de resistência à flexão



(fonte: elaborado pela autora)

5.8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Quanto aos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão paralelamente às fibras, a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 52) define que estes “[...] devem ser analisados e apresentados, em valores característicos para resistência [...]”. O autor faz a mesma definição para o ensaio de resistência à flexão.

NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 48) sugere a utilização da seguinte expressão para estimar os valores característicos de resistência:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:

x_n = resistência da unidade amostral n ;

x_{wk} = resistência característica.

Os valores x_1, x_2, x_n , representam os resultados de resistência obtidas quando do ensaio de ruptura das unidades amostrais, sendo n o número de corpos de prova de cada ensaio. O uso desta fórmula está vinculado a critérios definidos pelo autor. NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 48) estabelece que “[...] os resultados deve ser colocados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para x_{wk} valor inferior a x_1 , nem a 0,7 do valor médio (x_m).”.

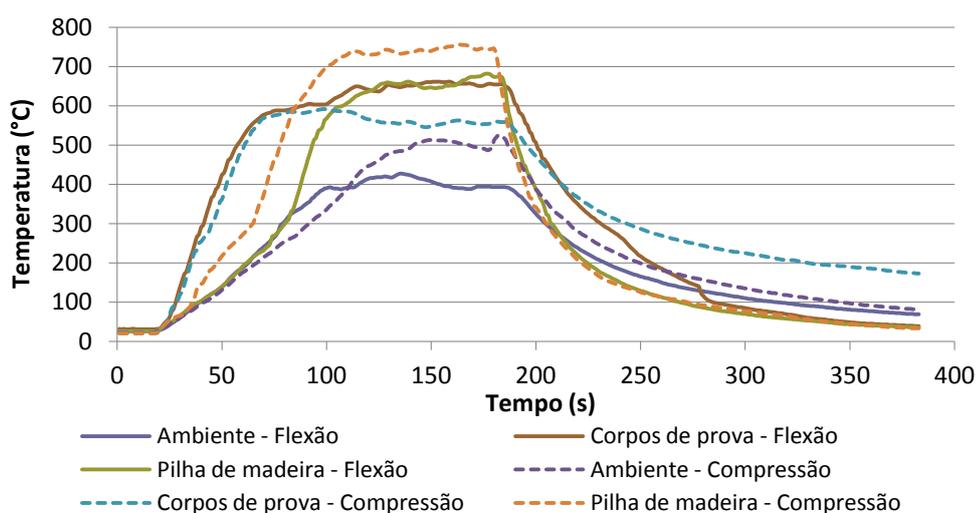
6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de simulação de incêndio de baixo risco em corpos de prova de madeira cedrinho. Visando a compreensão dos resultados obtidos, o capítulo está dividido nos seguintes itens: simulação de incêndio, ruptura à compressão paralelamente às fibras e ruptura à flexão.

6.1 SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO

Nesta seção são apresentados os gráficos das temperaturas desenvolvidas no forno durante os ensaios de simulação de incêndio. Na figura 7, o gráfico apresenta a temperatura desenvolvida nos ensaios de simulação de incêndio com duração de 2,5 minutos das unidades amostrais destinadas aos ensaios de ruptura à compressão paralelamente às fibras e de ruptura à flexão. A elevação de temperatura ocorreu rapidamente, atingindo, nos ensaios contendo as unidades amostrais de compressão e as unidades amostrais de flexão, patamar de temperatura acima de 500°C. Quando do procedimento de extinção do incêndio, houve queda abrupta de temperatura no compartimento de simulação.

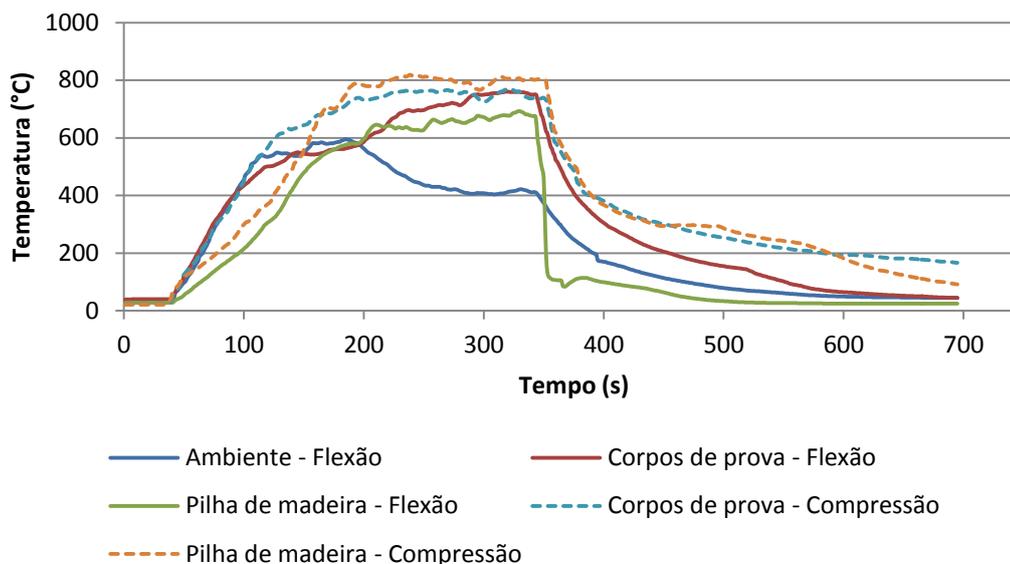
Figura 7 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 2,5 minutos



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 8 apresenta o gráfico contendo as medições das temperaturas desenvolvidas nos ensaios de simulação de incêndio de 5 minutos. No final do período de ensaio, tanto as unidades amostrais de compressão quanto as de flexão foram expostas a temperaturas acima de 700°C.

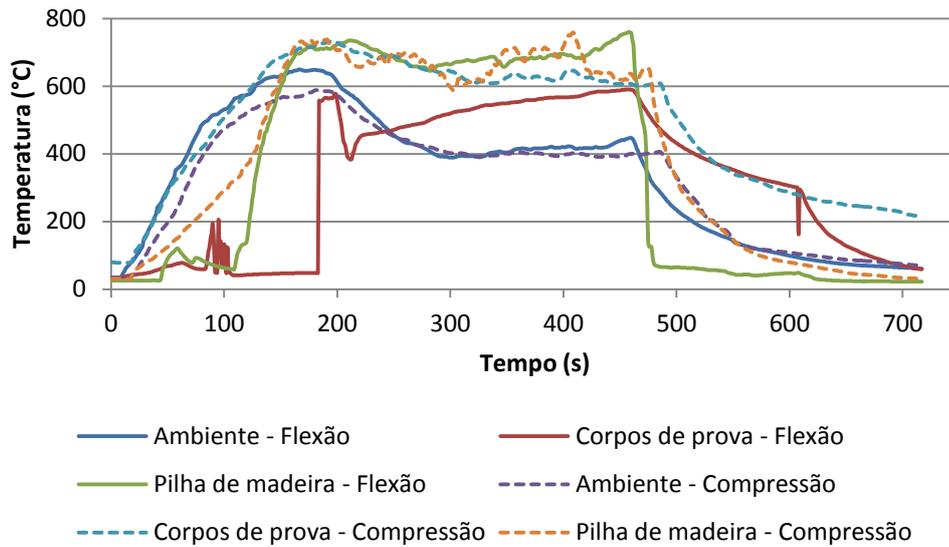
Figura 8 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 5 minutos



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 9 apresenta o gráfico da medição das temperaturas desenvolvidas no ensaio de simulação de incêndio cujo período de exposição das unidades amostrais ao fogo foi de 7,5 minutos. Neste período observou-se que as unidades amostrais destinadas ao ensaio de ruptura à compressão paralelamente às fibras foram expostas a temperaturas maiores que as unidades amostrais destinadas ao ensaio à flexão, porém, ambas as temperaturas com patamar acima de 500°C. Tal situação pode ter ocorrido devido a presença de vento quando da simulação de incêndio dos corpos de prova destinados ao ensaio de ruptura à flexão.

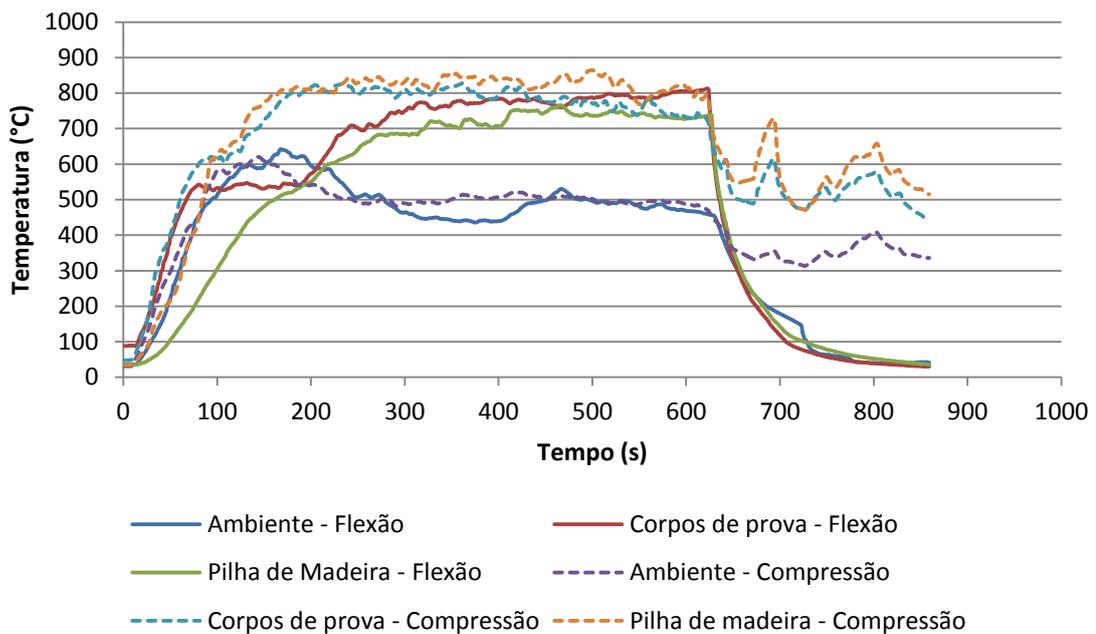
Figura 9 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 7,5 minutos



(fonte: elaborado pela autora)

As leituras dos termopares das temperaturas desenvolvidas durante o ensaio de simulação de incêndio, considerando período de 10 minutos, são apresentadas no gráfico da figura 10. Nos dois ensaios realizados considerando período de 10 minutos, as temperaturas de incêndio chegaram a um patamar acima de 750°C.

Figura 10 – Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 10 minutos



(fonte: elaborado pela autora)

Os gráficos de temperatura, para os diferentes tempos de simulação de incêndio, nos permitem observar o comportamento do incêndio. No período inicial, os gráficos mostram rápida elevação de temperatura. As temperaturas de incêndio não ultrapassaram 900°C, mesmo quando o período de simulação foi de 10 minutos. Quando dos ensaios, constatou-se a dificuldade em extinguir o incêndio com tempo de duração acima de 7,5 minutos. A madeira, aos 7,5 minutos de exposição à simulação de incêndio, adquiriu temperatura suficiente para alimentar sua queima, mesmo quando retirada da exposição às chamas. Sendo assim, para que as unidades amostrais não sofressem queima por período maior que o de ensaio, foi necessário lançar areia sobre as unidades amostrais, após retiradas do simulador, para que os corpos de prova fossem resfriados e não recebessem oxigênio necessário para a combustão.

6.2 RUPTURA À COMPRESSÃO PARALELAMENTE ÀS FIBRAS

No rompimento dos corpos de prova, observou-se a alteração das características da superfície das unidades amostrais de madeira. A pirólise da madeira ocorreu primeiramente na face externa das unidades amostrais, permanecendo madeira sã no seu interior, conforme figura 11.

Figura 11 – Seção de unidade amostral submetida a 7,5 minutos de incêndio



(fonte: elaborado pela autora)

Quando do rompimento dos corpos de prova por compressão paralelamente às fibras, foram registrados os valores das cargas de ruptura das unidades amostrais. Estas cargas foram convertidas em resistências características, conforme recomendação da NBR 7190

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 48) e estes resultados estão apresentados na tabela 1.

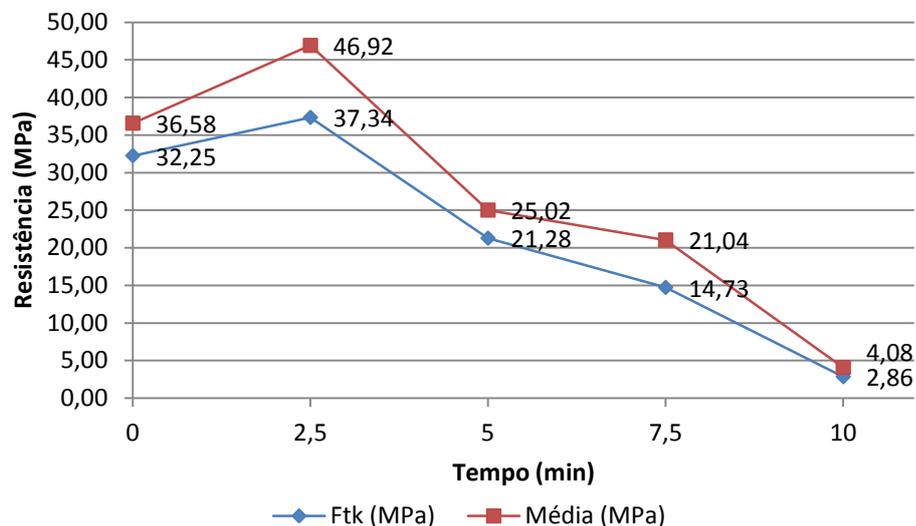
Tabela 1 – Resistência residual característica à ruptura por compressão paralelamente às fibras

Tempo (min)	F_{tk} (MPa)
0	32,25
2,5	37,34
5	21,28
7,5	14,73
10	2,86

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 12 apresenta o gráfico contendo os valores de resistências residuais obtidos no ensaio de ruptura e as médias das resistências das unidades amostrais, segundo seu período de exposição à simulação de incêndio. As resistências residuais apresentadas no gráfico estão em valores característicos, conforme especificação da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B.

Figura 12 – Resistência residual à compressão paralelamente às fibras



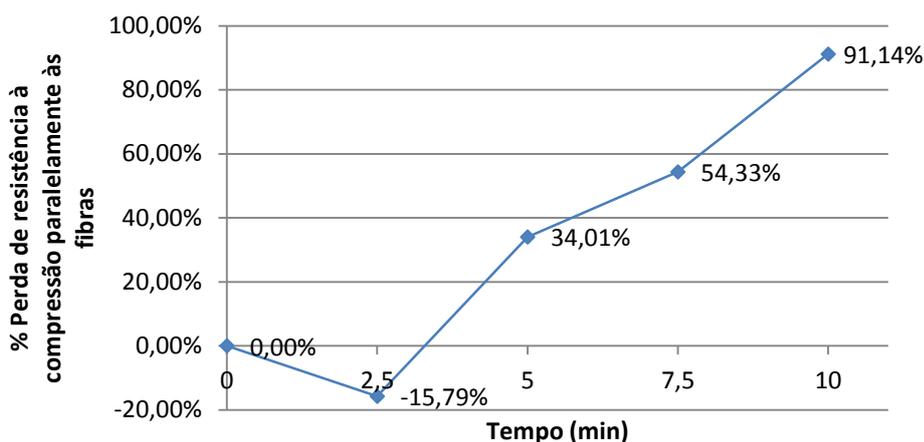
(fonte: elaborado pela autora)

Neste gráfico, observa-se aumento de resistência residual e média de resistência das unidades amostrais submetidas à simulação de incêndio, considerando período de exposição de 2,5 minutos, em relação às demais unidades. Observando o gráfico da figura 7 e comparando com

os gráficos das figuras 8, 9 e 10, verifica-se que as unidades amostrais, relativas ao tempo de 2,5 minutos de simulação de incêndio dos corpos de prova destinados ao ensaio de ruptura à compressão paralelamente às fibras, foram expostas a temperaturas menores que as demais. Entretanto, mesmo sendo a temperatura de exposição menor que as demais, este lote apresentou resistência residual e média de resistência à compressão maior que as unidades de testemunho. Este aumento de resistência à compressão pode ter ocorrido devido à secagem da madeira quando exposta ao calor.

A figura 13 apresenta o gráfico da perda de resistência residual à compressão paralelamente às fibras em valores percentuais. Os valores apresentados representam a resistência característica das unidades expostas à simulação de incêndio de baixo risco em termos da resistência característica das unidades de testemunho.

Figura 13 – Percentual da resistência residual à compressão paralelamente às fibras



(fonte: elaborado pela autora)

Na hipótese de pesquisa deste trabalho esperava-se que as unidades amostrais, quanto ao ensaio de ruptura à compressão paralelamente às fibras, quando expostas a 5 minutos de simulação de incêndio de baixo risco, perderiam aproximadamente 30% da resistência mecânica e, aos 10 minutos, 80%. No entanto, os resultados, conforme expostos no gráfico, sugerem que as unidades amostrais expostas a 5 minutos de simulação de incêndio de baixo risco, quando da ruptura à compressão paralelamente às fibras, sofreram perda de resistência da ordem de 34% e, aos 10 minutos de exposição, 91%. Em ambos os casos, a perda foi maior que a esperada. No entanto, estes resultados estimam a queda de resistência de unidades amostrais com seção transversal quadrada de 5 cm e 15 cm de comprimento.

6.3 RUPTURA À FLEXÃO

Quando do rompimento dos corpos de prova por flexão, foram registrados os valores das cargas de ruptura das unidades amostrais. Estas cargas foram convertidas em resistências características, conforme recomendação da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a, p. 48) e apresentados na tabela 2.

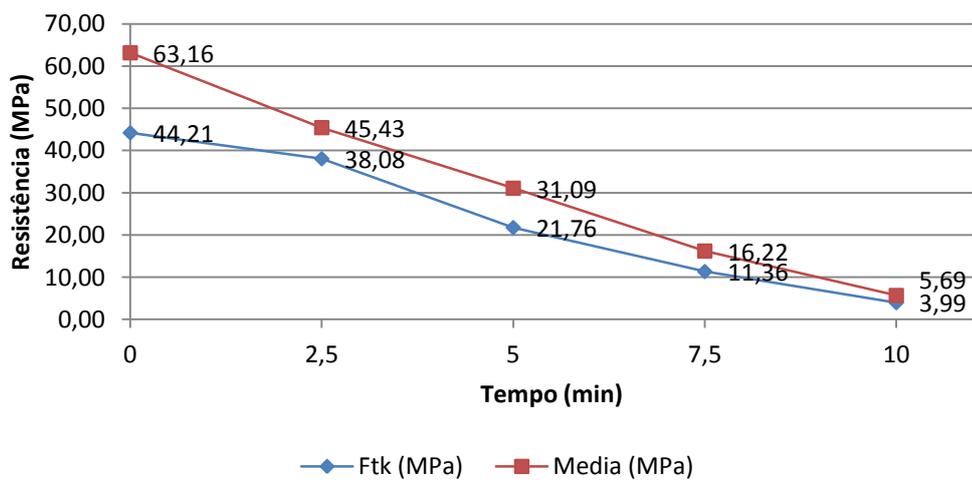
Tabela 2 – Resistência residual característica à ruptura por flexão

Tempo (min)	F_{tk} (MPa)
0	44,21
2,5	38,08
5	21,76
7,5	11,36
10	3,99

(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 14 observa-se o comportamento da queda de resistência mecânica à flexão das unidades amostrais expostas à simulação de incêndio de baixo risco. Neste gráfico foram representados os valores característicos obtidos da aplicação da recomendação da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B, bem como, os valores médios de resistência, segundo o tempo de exposição à simulação de incêndio.

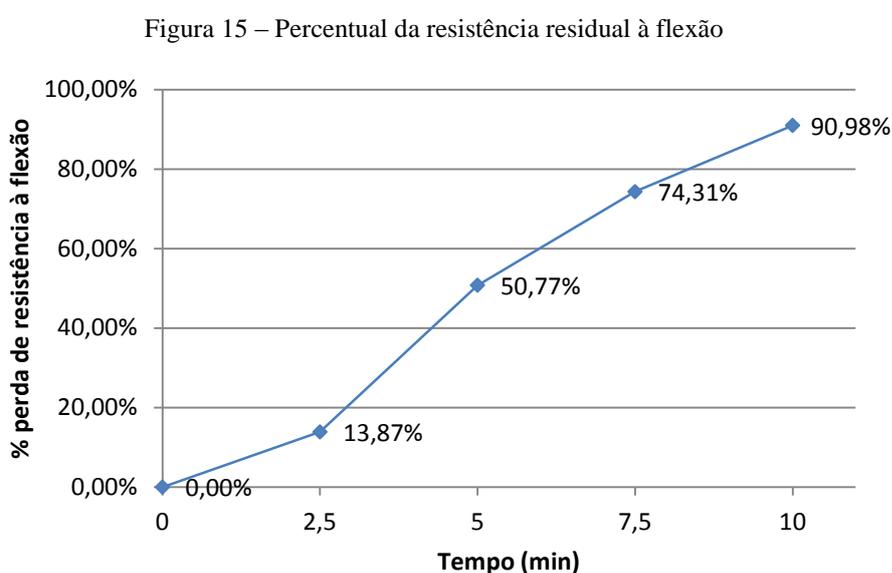
Figura 14 – Resistência à flexão



(fonte: elaborado pela autora)

A redução da resistência residual à flexão das madeiras expostas à simulação de incêndio, conforme observa-se no gráfico, aproximou-se de uma tendência linear. A média de resistências teve comportamento semelhante.

A perda de resistência residual à flexão, em valores percentuais, foi representada na figura 15. Os valores apresentados representam a resistência característica das unidades expostas à simulação de incêndio de baixo risco em termos da resistência característica das unidades de testemunho.



(fonte: elaborado pela autora)

Esperava-se que aos 5 minutos de exposição à simulação de incêndio, as unidades amostrais apresentariam pequena queda de resistência à flexão, sendo da ordem de 30%, no entanto, conforme gráfico 15, observou-se que as unidades amostrais, aos 5 minutos de exposição ao incêndio, tiveram aproximadamente 50% de perda de resistência. Quanto a exposição à simulação de incêndio considerando período de 10 minutos, esperava-se que o percentual de perda de resistência mecânica à flexão fosse significativo, da ordem de 80%. Quando dos ensaios de ruptura à flexão, observou-se que aos 10 minutos de simulação, as unidades amostrais apresentaram perda de aproximadamente 91%. Assim como nos ensaios de ruptura à compressão paralelamente às fibras, em ambos os tempos de exposição ao fogo, a perda foi maior que a esperada nas hipóteses iniciais. No entanto, cabe salientar que estas perdas são relativas a corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm e 115 cm de comprimento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira sofreu decréscimo na resistência mecânica após exposição à simulação de incêndio de baixo risco, seja quando submetida aos ensaios de ruptura à compressão paralela às fibras, seja quando submetida aos ensaios de ruptura à flexão. Quando da elaboração da hipótese de perda de resistência, estimou-se que os corpos de prova sofreriam pequena perda de resistência mecânica, sugerindo-se o percentual de 30%, em ambos os testes de ruptura, compressão paralelamente às fibras e flexão. Os valores percentuais obtidos de perda de resistência para as unidades amostrais submetidas à simulação de incêndio de baixo risco, referentes ao tempo de exposição de 5 minutos, foram próximos aos esperados na hipótese inicial, quanto ao ensaio de ruptura à compressão paralela às fibras, apresentando 34% de perda de resistência. No entanto, as unidades amostrais expostas ao mesmo período de simulação de incêndio, quando submetidas ao ensaio de ruptura à flexão, apresentaram perda de resistência maior que o esperado inicialmente, atingindo o valor percentual de 51%.

Quando da elaboração da hipótese de perda de resistência mecânica, tanto para resistência à compressão paralelamente às fibras, quanto para resistência à flexão, esperava-se perdas significativas de resistência mecânica, sugerindo-se o percentual de 80% após 10 minutos de exposição à simulação de incêndio de baixo risco. Entretanto, constatou-se que, para ambos os ensaios de ruptura, a perda de resistência mecânica das unidades amostrais expostas à simulação de incêndio pelo período de incêndio de 10 minutos superou o valor da hipótese inicial, apresentando valores acima de 90%.

O presente trabalho tem por principais limitações as dimensões dos corpos de prova, que foram definidas de acordo com as normas, não representando necessariamente as reais dimensões de uma estrutura de madeira utilizada na construção civil. O trabalho também não considerou a influência do vento durante os ensaios em seus resultados, como variável de controle, e não testou todas as principais madeiras utilizadas na construção civil no Brasil, restringindo-se ao cedrinho.

Ainda há muito a pesquisar quanto ao comportamento da madeira mediante situação de incêndio. Sugere-se, para pesquisas futuras, verificar qual a influência dos produtos ignífugantes na resistência mecânica da madeira, quando exposta ao incêndio, qual o tipo de

proteção mecânica poderia ser empregado em estruturas de madeira para que esta sofresse menor influência possível do incêndio, e a especificação de um modelo de previsão da perda da resistência à flexão e à compressão paralelamente às fibras em função do tempo de exposição a incêndio de baixo risco, que tenha alto poder de explicação desta perda.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Aplicação da madeira na construção civil**. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=166&Itemid=37>. Acesso em: 9 jun. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860**: glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997b.
- ANASTÁCIO, R. S. A. **Especificação de proteção fogo para estruturas de madeira**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.
- COIMBRA, A. L.; BRZEZICKI, A. C.; MARQUES, E. K.; BRITO, E.; MARTIN, F. J. S.; HAUPTMANN, H.; BARZAGUI, J. F.; PASTOR, J. R.; SILVA, P. F. **Manual do engenheiro**. 1. ed. Porto Alegre: Globo, 1976. Tomo II.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras – cedrinho**. Não paginado. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/9.htm>. Acesso em: 7 nov. 2011.
- LEPAGE, E. S. (Coord.); OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A. T.; LOPEZ, G. A. C.; CHIMELO, J. P.; OLIVEIRA, L. C. S.; CAÑEDO, M. D.; CAVALCANTE, M. S.; IELO, P. K. Y.; ZANOTTO, P. A.; MILANO, S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1.
- MADY, F. T. M. **Conhecendo a Madeira**. Não paginado. Disponível em: <<http://www.conhecendoamadeira.com/>>⁹. Acesso em: 9 jun. 2011.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 9. ed. Porto Alegre: Globo, 1975.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**: dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-Americanas NDS e Europeias EUROCODE 5. 6. ed. rev., atual. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- PIANCA, J. B. **Manual do construtor**. 9. ed. Porto Alegre: Globo, 1977. v. 1.
- PORTO ALEGRE. **Lei complementar nº 420/1998**. Institui o Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre e dá outras providências. Porto Alegre, 2001.

⁹ Estando no site <<http://www.conhecendoamadeira.com/>>, localize na parte superior o link ‘Conheça a Madeira’: selecione para abrir o documento.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto n. 56.819** de 10 de março de 2011. Institui o Regulamento de Segurança contra Incêndio das edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo e dá providências correlatas. Não paginado. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2011/decreto%20n.56.819,%20de%2010.03.2011.htm>>. Acesso em 12 jun. 2012.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B. da; CARLO, U. Del; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto, 2008.