

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURA E CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA REGIÃO DE EXTRAÇÃO EM PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE CUPIÚBA (*Goupia Glabra Aubl*)**

CARLOS EDUARDO GOMES DA SILVA

São Carlos
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA REGIÃO DE EXTRAÇÃO EM PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE CUPIÚBA (*Goupia Glabra Aubl*)**

CARLOS EDUARDO GOMES DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Carlos Eduardo Gomes da
Influência da região de extração em propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba (Goupia Glabra Aubl) / Carlos Eduardo Gomes da Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2017.
80 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Madeira de Cupiúba. 2. Propriedades físicas. 3. Propriedades mecânicas. 4. Resistência à compressão. 5. Densidade aparente. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Carlos Eduardo Gomes da Silva, realizada em 02/12/2016:

Andre Luis Christoforo

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Francisco Antonio Rocco Lahr

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
USP

Andre Luis Christoforo

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
UFSCar

à distância

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a alguém muito especial e que foi colocada em minha vida para me tornar uma pessoa melhor a cada dia, minha esposa Vera Lúcia Tambelini Gomes da Silva, que de certa forma ainda percebe minha alegria de viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me agraciar com a capacidade da consciência, da compreensão e da aceitação da Vida para superar as situações adversas às quais somos submetidos.

Ao Professor André Luís Christoforo, essa pessoa sensível, que não por acaso foi colocada em meu caminho e que coincidentemente é meu orientador, pois soube perceber minhas deficiências e dificuldades e não poupou esforços em saná-las, considere-se meu irmão caçula.

Ao Professor Francisco Antonio Rocco Lahr pela colaboração imensurável à realização deste trabalho, tanto pelo fornecimento das informações necessárias, quanto pela disposição que sempre presta aos seus antigos ex-alunos.

Ao Professor Guilherme Aris Parsekian pelo apoio e compreensão, dispensados nos momentos de extrema dificuldade pessoal e tão importantes para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Fernando Menezes de Almeida Filho e Marcelo de Castro Takeda que compuseram a banca de qualificação e muito contribuíram com suas sugestões.

Agradecimentos aos profissionais do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo pelo apoio irrestrito durante a realização dos experimentos.

E de um modo geral a todas as pessoas que sempre estiveram presentes ao meu lado neste período de trabalho tão intenso.

RESUMO

Esta pesquisa objetivou investigar, com o auxílio da norma brasileira NBR 7190 (1990) Projeto de Estruturas de Madeira, da Análise de Variância de Kruskal-Wallis (ANOVA) e da técnica bootstrap de reagrupamento, a influência das regiões de extração Caracaraí, Bonfim e Cláudia, em propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba (*Goupia Glabra Aubl*), assim como avaliar a possibilidade da estimativa (modelos linear, exponencial, geométrico, logarítmico) das propriedades físicas e mecânicas investigadas em função da densidade aparente. Os resultados da ANOVA indicaram equivalência em 94% das propriedades das regiões de Caracaraí e Cláudia, e não equivalência em 50% das propriedades da região de Bonfim, e mesmo depois de extrapolados pela técnica bootstrap, apresentou não equivalência em 44% das propriedades. Os resultados obtidos dos modelos de regressão implicaram na possibilidade da estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba em função da densidade aparente.

Palavras-chave: Madeira de Cupiúba, propriedades físicas e mecânicas, resistência à compressão e densidade aparente.

ABSTRACT

This research aimed to investigate, with the aid of the Brazilian standard NBR 7190 (1990) Wood Structures Project, of the Kruskal-Wallis analysis of variance (ANOVA), and the regrouping bootstrap technique, the influence of extraction regions Caracaraí, Bonfim and Claudia, in physical and mechanical properties of Cupiúba wood (*Goupia Glabra Aubl*), and assess the possibility of estimate (linear, exponential, geometric and logarithmic mathematical models) the physical and mechanical properties investigated as a function of density. The results of ANOVA indicated equivalence in 94% of the properties of the regions of Caracaraí and Claudia, and no equivalence in 50% of the properties in the region of Bonfim, even after extrapolated by the bootstrap technique, the non-equivalence was still 44%, whereas the results obtained from the regression model implied a possibility of an estimate of the physical and mechanical properties of Cupiúba wood due to its apparent density.

Keywords: Cupiúba wood, physical and mechanical properties, compressive strength and apparent density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Indicação das Regiões de Extração das amostras da madeira de Cupiúba utilizadas nesta pesquisa, localizadas nos estados de Roraima e de Mato Grosso.....	20
Figura 1.2 -	Destaque da localização das regiões de extração da madeira de Cupiúba: Roraima (a) e Mato Grosso (b).....	20
Figura 2.1 -	Madeira de Cupiúba: árvore (a) e tora (b).....	22
Figura 3.1 -	Corpo de prova (a), paquímetro digital (b) e balança digital (c), utilizados na obtenção dos valores da densidade aparente.....	34
Figura 3.2 -	Diagrama tensão x deformação específica.....	36
Figura 3.3 -	Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.....	37
Figura 3.4 -	Corpo de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras, (a) seção transversal, (b) seção lateral e (c) perspectiva.....	37
Figura 3.5 -	Padrão de fixação dos relógios comparadores no corpo de prova.....	38
Figura 3.6 -	Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores na máquina de ensaio para o ensaio de compressão paralela às fibras.....	39
Figura 3.7 -	Vista geral da máquina de ensaio para a compressão paralela às fibras.	39
Figura 3.8 -	Diagrama tensão x deformação específica para a determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.....	40
Figura 3.9 -	Corpo de prova para ensaio de compressão normal às fibras, (a) vista em perspectiva e (b) vista da face tangencial às fibras.....	41
Figura 3.10 -	Corpo de prova posicionado na máquina para o ensaio de compressão normal às fibras.....	42
Figura 3.11 -	Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios de tração paralela às fibras, (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.....	43
Figura 3.12 -	Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras....	44
Figura 3.13 -	Vistas do corpo de prova para o ensaio de tração paralela às fibras, (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.....	45
Figura 3.14 -	Máquina de ensaio universal utilizada para o ensaio de tração na direção paralela às fibras.....	46

Figura 3.15 -	Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.....	46
Figura 3.16 -	Detalhe do corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras. (a) perspectiva e (b) vista superior.....	47
Figura 3.17 -	Ensaio de tração normal às fibras da madeira.....	47
Figura 3.18 -	Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.....	48
Figura 3.19 -	Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.....	49
Figura 3.20 -	Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	49
Figura 3.21 -	Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte.....	50
Figura 3.22 -	Corpo de prova de madeira de Cupiúba para o ensaio de fendilhamento na direção paralela às fibras da madeira, (a) perspectiva e (b) vista superior.....	50
Figura 3.23 -	Ensaio de fendilhamento em um corpo de prova de madeira de Cupiúba.....	51
Figura 3.24 -	Corpo de prova para a flexão estática.....	52
Figura 3.25 -	Corpo de prova de madeira de Cupiúba para o ensaio de flexão estática.	52
Figura 3.26 -	Curva força×flecha para a determinação do módulo de elasticidade.....	53
Figura 3.27 -	Diagrama de carregamento do corpo de prova para determinação da rigidez à flexão.....	54
Figura 3.28 -	Ensaio de flexão estática da madeira de Cupiúba, (a) corpo de prova posicionado, (b) durante o ensaio, (c) ruptura no ensaio e (d) corpo de prova rompido.....	55
Figura 3.29 -	Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte....	56
Figura 3.30 -	Corpo de prova da madeira de Cupiúba para o ensaio de dureza Janka. (a) Perspectiva e (b) Vista superior.....	56
Figura 3.31 -	Detalhe esquemático do dispositivo especial para o ensaio de dureza Janka.....	56
Figura 3.32 -	Dureza Janka da madeira de Cupiúba na direção paralela às fibras. (a) Ensaio e (b) Resultado.....	56
Figura 3.33 -	Dureza Janka da madeira de Cupiúba na direção normal às fibras. (a) Ensaio e (b) Resultado.....	58

Figura 3.34 -	Corpo de prova para o ensaio de tenacidade.....	59
Figura 3.35 -	Ensaio para a determinação da tenacidade da madeira de Cupiúba.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resultados de algumas propriedades da madeira de Cupiúba adaptados da norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997).....	24
Tabela 2.2 - Valores médios das propriedades física e mecânicas da madeira de Cupiúba obtidas do trabalho de Oliveira e Sales (2002).....	24
Tabela 2.3 - Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr.....	25
Tabela 2.4 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba.....	26
Tabela 2.5 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba.....	27
Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Caracará - RR.....	63
Tabela 4.2 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Bonfim - RR.....	64
Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Cláudia - MT.....	65
Tabela 4.4 - Resultados dos (P-valores) da ANOVA de Kruskal-Wallis.....	71
Tabela 4.5 - Resultados (P-valores) da ANOVA, extrapolação pela técnica de bootstrap.....	72
Tabela 4.6 - Resultados dos (P-valores) da ANOVA dos modelos de regressão.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Comparativo das resistências na compressão paralela às fibras das três regiões.....	66
Gráfico 4.2 - Comparativo das resistências na tração paralela às fibras das três regiões..	67
Gráfico 4.3 - Comparativo das resistências no cisalhamento paralelo às fibras das três regiões.....	68
Gráfico 4.4 - Comparativo das resistências na flexão estática das três regiões.....	69
Gráfico 4.5 - (P-valores) equivalentes por Kruskal-Wallis e por extrapolação Bootstrap.	73

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 -	Resistência característica da madeira a uma determinada solicitação	33
Equação 3.2 -	Densidade aparente da madeira a um teor de umidade de 12%	34
Equação 3.3 -	Deformações específicas de retração da madeira	35
Equação 3.4 -	Variação volumétrica da madeira	35
Equação 3.5 -	Resistência da madeira à compressão paralela às fibras	36
Equação 3.6 -	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras	36
Equação 3.7 -	Módulo de elasticidade à compressão normal às fibras	41
Equação 3.8 -	Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras	43
Equação 3.9 -	Resistência da madeira à tração paralela às fibras	46
Equação 3.10 -	Resistência da madeira ao cisalhamento paralela às fibras	48
Equação 3.11 -	Resistência da madeira à flexão simples	51
Equação 3.12 -	Módulo de elasticidade da madeira na flexão simples	53
Equação 3.13 -	Determinação do parâmetro que indica a tenacidade da madeira	59
Equação 3.14 -	Resistência da madeira ao impacto na flexão	59
Equação 3.15 -	Relação linear para a determinação da resistência e da rigidez da madeira em função da densidade aparente	61
Equação 3.16 -	Relação exponencial para a determinação da resistência e da rigidez da madeira em função da densidade aparente	61
Equação 3.17 -	Relação logarítmica para a determinação da resistência e da rigidez da madeira em função da densidade aparente	62
Equação 3.18 -	Relação geométrica para a determinação da resistência e da rigidez da madeira em função da densidade aparente	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Bon – Bonfim, região de extração das amostras.

Car – Caracaráí, região de extração das amostras.

Cla – Cláudia, região de extração das amostras.

CRV – Coeficiente de Retratibilidade Volumétrica

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

LaMEM – Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Departamento de Estruturas,
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MB – Método Brasileiro.

NBR – Norma Brasileira Registrada.

PSF – Ponto de Saturação das Fibras.

USP – Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro estatístico para o nível de significância;
β	Indicador estatístico para aceite da hipótese alternativa;
$C20$	Classe de resistência, 20 MPa, da madeira na compressão paralela às fibras;
$C30$	Classe de resistência, 30 MPa, da madeira na compressão paralela às fibras;
$C40$	Classe de resistência, 40 MPa, da madeira na compressão paralela às fibras;
$C50$	Classe de resistência, 50 MPa, da madeira na compressão paralela às fibras;
$C60$	Classe de resistência, 60 MPa, da madeira na compressão paralela às fibras;
C_{LL}	Coeficiente da matriz de rigidez;
Cv	Coeficiente de variação;
E_M	Módulo de elasticidade da madeira na flexão estática;
E_{c0}	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;
E_{t0}	Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras;
$\varepsilon_{r,2}$	Retratibilidade radial da madeira;
$\varepsilon_{r,3}$	Retratibilidade tangencial da madeira;
$f_{c0,m}$	Resistência média da madeira na compressão paralela às fibras;
$f_{c0,k}$	Resistência característica da madeira na compressão paralela às fibras;
$f_{t0,m}$	Resistência média da madeira na tração paralela às fibras;
$f_{t90,m}$	Resistência média da madeira na tração normal às fibras;
$f_{t0,k}$	Resistência característica da madeira na tração paralela às fibras;
$f_{t90,k}$	Resistência característica da madeira na tração normal às fibras;
$f_{v0,m}$	Resistência média da madeira no cisalhamento paralelo às fibras;
$f_{v0,k}$	Resistência característica da madeira no cisalhamento paralelo às fibras;
f_{s0}	Resistência da madeira no fendilhamento;
f_{H0}	Dureza Janka paralela às fibras;
f_{H90}	Dureza Janka normal às fibras;
$f_{M,m}$	Resistência média da madeira na flexão estática;
$f_{M,k}$	Resistência característica da madeira na flexão estática;
H_0	Parâmetro estatístico para hipótese nula;
H_1	Parâmetro estatístico para hipótese alternativa;
J	Joule – Unidade de medida de energia mecânica;

m_{12}	—	Massa da madeira a um teor de umidade de 12%;
ρ_{ap}	—	Densidade aparente da madeira;
$\rho_{ap,12\%}$	—	Densidade aparente da madeira a um teor de umidade 12%;
ρ_{bas}	—	Densidade básica da madeira;
ρ_0	—	Densidade seca;
R^2	—	Coefficiente de determinação ajustado;
$U_{\%}$	—	Teor de umidade da madeira em porcentagem;
U_{eq}	—	Teor de umidade equivalente;
$U_{12\%}$	—	Teor de umidade de referência da madeira a um teor de umidade de 12%;
v_{12}	—	Volume da madeira a um teor de umidade de 12%;
\bar{x}	—	Valor médio das propriedades;
W	—	Tenacidade da madeira.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Objetivos da Pesquisa.....	19
1.2. Justificativa.....	19
1.3. Discussão sucinta dos capítulos.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. Breve Histórico.....	22
2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Cupiúba.....	24
2.3. Estimativa de Propriedades em Função da Densidade Aparente.....	28
2.4. Influência da Região de Extração.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1. Considerações Iniciais.....	32
3.2. Propriedades Físicas.....	34
3.2.1. Densidade Aparente.....	34
3.2.2. Retração da Madeira.....	35
3.3. Propriedades Mecânicas.....	36
3.3.1. Compressão Paralela às Fibras.....	36
3.3.2. Compressão Normal às Fibras.....	40
3.3.3. Tração Paralela às Fibras.....	43
3.3.4. Tração Normal às Fibras.....	46
3.3.5. Cisalhamento Paralelo às Fibras.....	48
3.3.6. Fendilhamento Paralelo às Fibras.....	50
3.3.7. Flexão Estática.....	51
3.3.8. Dureza Janka.....	56
3.3.9. Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão.....	59
3.4. Análise Estatística.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5. CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem sido amplamente utilizada pela humanidade desde os primórdios dos tempos, motivada pela sua existência em abundância na natureza e pela facilidade de ser trabalhada com a utilização de ferramentas simples (ZANGIACOMO, CHRISTOFORO e LAHR, 2016; CAVALHEIRO et al., 2016; ALMEIDA et al., 2016a).

Esse material está presente em vários setores da economia e na construção civil tem muito potencial de aproveitamento, em especial nas estruturas, por apresentar resistências compatíveis com outros materiais de construção como o concreto e o aço, e também por ser um material natural, renovável, e por demandar baixo consumo de energia em seu processo de produção (ALMEIDA et al., 2016b).

O uso da madeira nas estruturas da construção civil é regulamentado pela norma técnica NBR-7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece as condições gerais a serem seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira.

A norma ABNT NBR-7190 (1997) vigente é pautada nos métodos probabilísticos de Estados Limites, Método dos Estados Limites Último, que avalia a capacidade resistente à ruptura e à instabilidade no todo ou em parte da estrutura, e Método dos Estados Limites de Utilização, que avalia a deformação excessiva e a durabilidade no todo ou em parte da estrutura.

Além dos quesitos sobre arranjo estrutural, ações atuantes, modelo e análise estruturais, critérios relativos ao dimensionamento, e detalhamento das estruturas e elementos de ligação, a norma também determina métodos específicos para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

Pela sua estrutura anatômica a madeira deve ser caracterizada levando-se em conta o tipo de esforço (tração, compressão e cisalhamento); direção das fibras (paralela e normal); classes de umidade (12%) (CHRISTOFORO et al., 2016).

No dimensionamento das estruturas de madeira, a norma ABNT NBR-7190 (1997) especifica, para a determinação das propriedades de resistência e de rigidez, os métodos de caracterização completa, mínima ou simplificada.

Para a caracterização completa de uma espécie a norma prescreve que sejam ensaiados doze corpos de prova por lote com doze metros cúbicos de madeira, considerando classe de umidade 1 referente à umidade de equilíbrio (U_{eq}) da madeira de 12%. As propriedades físicas

e mecânicas exigidas para a caracterização completa da madeira são: resistências na compressão e na tração paralelas às fibras, na compressão e na tração normal às fibras, no cisalhamento paralelo às fibras, no embutimento paralelo e normal às fibras, e nas densidades básica e aparente, ressaltando a existência de várias outras propriedades que podem ser determinadas experimentalmente.

Para as espécies não conhecidas, a ABNT NBR-7190 (1997) permite utilizar a caracterização mínima a partir dos ensaios de compressão e tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e densidades básica e aparente. Neste caso são necessários no mínimo doze corpos de prova por lote de doze metros cúbicos.

Para as espécies usuais a NBR NBR-7190 (1997) permite ainda utilizar a caracterização simplificada, obtendo as propriedades de resistência e rigidez a partir de resultados obtidos da compressão paralela às fibras de no mínimo seis corpos de provas por lote contendo doze metros cúbicos.

Quanto à rigidez, a norma brasileira especifica que as propriedades sejam determinadas por métodos de caracterização completo ou simplificado. A caracterização completa da rigidez se faz sempre na condição padrão de umidade (12%), resultando nos valores médios dos módulos de elasticidade na compressão (E_{c0}) e na tração (E_{t0}) paralela às fibras com no mínimo dois ensaios por caracterização, admitido o mesmo módulo de elasticidade à compressão e à tração ($E_{c0} = E_{t0}$) para o cálculo das estruturas.

A norma ABNT NBR 7190 (1997) também recomenda que se o lote a ser caracterizado por qualquer dos métodos, completo, mínimo ou simplificado, apresentar umidade contida no intervalo entre 10% e 20%, todos os resultados apresentados devem ser corrigidos para a umidade padrão 12% e classe de umidade 1.

A norma Brasileira apresenta em seu *Anexo E* valores médios de algumas propriedades (uma física e cinco mecânicas) de resistência e de rigidez para cinquenta espécies de madeira nativas e de reflorestamento, entretanto, não faz menção à diferença existente nas propriedades físicas e mecânicas para uma mesma espécie em função do local ou da região de extração das árvores, e como valores base para o pré-dimensionamento estrutural, esses podem apresentar diferenças significativas e que podem conduzir a valores significativamente diferentes dos valores das propriedades de resistência e de rigidez da madeira a ser utilizada no projeto, requerendo na caracterização da espécie, o uso de madeiras de regiões distintas (ROCCO et al., 2016).

1.1. Objetivos da Pesquisa

O objetivo desta pesquisa é investigar a influência de distintas regiões de extração (Caracará e Bonfim em Roraima; Cláudia em Mato Grosso) da madeira de Cupiúba em suas propriedades físicas e mecânicas, Figuras 1.1 e 1.2. Conhecidas às propriedades da madeira para uma das regiões de extração, intenciona-se investigar se a média de uma determinada propriedade é equivalente à média da mesma propriedade para as madeiras das três regiões em conjunto. Além da investigação da influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba, nesta pesquisa também foi avaliada, com o auxílio da ANOVA dos modelos de regressão, a possibilidade de se poderem estimar as propriedades de resistência, de rigidez e algumas propriedades físicas da madeira como função da densidade aparente.

1.2. Justificativa

As diferentes condições do clima, da vegetação e do solo podem influenciar no desenvolvimento da árvore e conseqüentemente nos valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira. É comum um mesmo lote de madeira comercializada conter peças provenientes de diferentes regiões de extração e, portanto é relevante que se tenham informações confiáveis sobre a influência nos valores de suas propriedades.

Considerando que o número de ensaios para a determinação das propriedades de resistência e de rigidez da madeira é elevado e que podem influenciar de modo significativo na composição do custo de comercialização deste material, é importante que se determine modelos matemáticos de bons ajustes que permitam estimar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função de sua densidade, isto permitirá ao projetista elaborar um pré-dimensionamento da estrutura mais preciso e confiável.

A NBR 7190 (1990) não fixa uma diretriz específica que considere as possíveis influências nas resistências e rigidezes das madeiras de mesma espécie provenientes de diferentes áreas de extração, nem as relações para estimar suas propriedades de resistência e de rigidez em função da densidade aparente.

Figura 1.1 – Indicação das Regiões de Extração das amostras da madeira de Cupiúba utilizadas nesta pesquisa, localizadas nos estados de Roraima e de Mato Grosso.



Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.ibge.gov.br>.

Figura 1.2 – Destaque da localização das regiões de extração da madeira de Cupiúba: Roraima (a) e Mato Grosso (b).



(a)



(b)

Fonte: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.ibge.gov.br/>

1.3. Discussão sucinta dos capítulos

- Capítulo 2 [Revisão Bibliográfica]: Esse capítulo apresenta os trabalhos da literatura técnica e científica a respeito da caracterização da madeira de Cupiúba, possibilitando encontrar resultados de propriedades físicas e mecânicas a serem comparados com os obtidos da presente pesquisa, assim como de evidenciar também a contribuição proporcionada pelo presente trabalho em desenvolvimento.

- Capítulo 3 [Material e Métodos]: Esse capítulo apresenta a metodologia empregada para a caracterização completa da madeira de Cupiúba, que segue diretamente as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), assim como da forma de análise estatística a ser utilizada para avaliar a influência das três regiões de extração e do uso dos modelos de regressão na estimativa das propriedades de resistência e de rigidez em função da densidade aparente;

- Capítulo 4 [Resultados e Discussão]: Esse capítulo apresenta os valores médios das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cupiúba obtidas das três regiões distintas, as discussões dos valores encontrados das propriedades de interesse com os da literatura correlata, os resultados da análise de variância sobre o efeito dos locais de obtenção das árvores nas propriedades físicas e mecânicas investigadas assim como da possibilidade da estimativa das propriedades mecânicas em função da densidade aparente pelos modelos de regressão testados;

- Capítulo 5 [Conclusões]: Nesse capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura tem como objetivo apresentar pesquisas que tenham explorado as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba, do uso de modelos de regressão em que a densidade aparente é utilizada como estimador de propriedades, assim como da influência da região de extração nas propriedades físicas e mecânicas de madeiras diversas.

2.1. Breve Histórico

Em razão da demanda associada às poucas opções de espécies de madeira conhecidas, a exploração seletiva da madeira se tornou predatória, reduzindo a receptividade do mercado para novas espécies cujas características e propriedades ainda não são totalmente conhecidas (SOUZA, 1997).

Frente à necessidade de diversificação do uso de espécies na construção civil a madeira de Cupiúba (*Goupia glabra*) (Figura 2.1) se apresenta como solução alternativa, pois é uma espécie de madeira que se desenvolve em um habitat de matas de terra firme e é encontrada com abundância em uma vasta região da Amazônia brasileira conhecida como Floresta Equatorial Úmida de Terra Firme, compreendendo os estados de Roraima, Rondônia, Acre, Amazonas, Pará e norte dos estados de Tocantins e Mato Grosso, (LOUREIRO, SILVA e ALENCAR, 1979).

Figura 2.1 – Madeira de Cupiúba: árvore (a) e tora (b).



(a)



(b)

Fonte: PROMAP - Produtos de Madeiras do Pará Ltda, Icoaraci, BÉlem-PA.

<http://www.promapmadeiras.com.br>

Goupia glabra é uma espécie de árvore de grande porte podendo alcançar 40 m de altura na idade adulta. O tronco é cilíndrico e compacto e pode alcançar diâmetros entre 80 a 120 cm, sua casca externa é áspera e apresenta algumas rachaduras e coloração marrom acinzentada pálida. A casca interna é dura e alaranjada, sendo uma madeira muito utilizada no segmento da construção civil, naval, na produção de corantes e cosméticos e também na área medicinal e ornamental. Na construção civil é utilizada na fabricação de vigas, caibros, ripas, batentes de porta e janelas, tábuas (para assoalhos e rodapés), móveis, carrocerias, dormentes, postes, moirões, cruzetas, pontes, estacas, etc., (TONINI, OLIVEIRA e SCHWENGBER, 2008; GURGEL et al., 2015).

Embora seja encontrada nas florestas naturais, a madeira de Cupiúba é uma espécie de crescimento rápido, que atinge a idade adulta entre dez e quinze anos. É indicada para arborização em geral, inclusive em áreas de reflorestamento homogêneo ou heterogêneo. Apesar de requerer muita luz para germinar, a semente resiste a longos períodos de armazenagem no solo à espera de uma abertura na copa da floresta para germinar e se desenvolver (HIRAI et al., 2007).

Pelas características de sua densidade aparente ($\rho_{ap,12\%} = 838 \text{ kg/m}^3$) conforme norma brasileira ABNT NBR-7190, 1997, a madeira de Cupiúba é classificada como madeira pesada e com propriedades de resistência e rigidez adequadas ao uso estrutural. Apresenta cerne/alburno pouco distinto a indistinto, marrom-avermelhado-claro; com camadas de crescimento pouco distintas; textura média; cheiro desagradável e resistente ao corte transversal (BRASIL, 2013), e é categorizada como madeira pertencente à classe de resistência C30 pela norma ABNT NBR 7190 (1990).

Dentre as propriedades da madeira, a densidade se apresenta como a mais relevante e de fácil determinação experimental. Hellmeister (1982) afirma que madeiras com maior densidade apresentam maior resistência e maior rigidez, pois possuem maior quantidade de massa por unidade de volume. Já Shimoyama e Barrichelo (1991) e Humphreys e Chimelo (1992) afirmam que todas as demais propriedades das madeiras estão de certa forma associadas à sua densidade, diferentemente do que ocorre com o concreto e o aço, que possuem densidade constante para diferentes resistências.

Segundo Oliveira (1997), a densidade das madeiras é determinada de duas formas, a densidade básica, que relaciona a massa seca com o volume saturado da amostra, e a densidade aparente, que relaciona a massa e o volume ambos no valor referência de 12%, que é a de maior interesse do ponto de vista prático para a determinação das relações entre propriedade mecânicas e densidade.

2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Cupiúba

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) em seu Anexo E apresenta os valores da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$), da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), da resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), da resistência à tração na direção normal às fibras (f_{t90}), da resistência ao cisalhamento (f_v) e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) da madeira de Cupiúba, cujos valores médios, obtidos para um número de 33 amostras são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores médios de algumas propriedades da madeira de Cupiúba.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
838	54,4	62,1	3,3	10,4	13627

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

Oliveira e Sales (2002) avaliaram propriedades de resistência e de rigidez da madeira de Cupiúba (*Goupia glabra*), Eucalipto granis (*Eucalyptus grandis*), Jatobá (*Hymenaea 24P*), Eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) e a sua relação, por meio de modelos de regressão, com o coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}) obtido dos resultados de ensaio por ultrassom. Em particular, a propriedade física avaliada foi a densidade aparente (ρ_{ap}), obtida de corpos de prova e também de peças de dimensões estruturais, e as mecânicas foram a resistência (f_{c0}) e o módulo de elasticidade (E_{c0}) na compressão paralela, obtidos a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, e o módulo de elasticidade (E_M) e a resistência (f_M) na flexão estática em peças com dimensões estruturais (6×16×130cm; 6×16×260cm), ensaiadas na posição de menor momento de inércia. Em geral, os resultados pouco expressivos obtidos do coeficiente de determinação dos modelos testados para ambas as espécies e as propriedades mecânicas como função do coeficiente da matriz de rigidez não forneceram bons ajustes. Os valores das propriedades física (densidade aparente obtidas das amostras) e mecânicas da madeira de Cupiúba são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores médios das propriedades física e mecânicas da madeira de Cupiúba.

Amostra			Peça estrutural	
$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_M (MPa)	f_M (MPa)
883	51,2	15439	14458	110,8

Fonte: Oliveira e Sales (2002)

Dias e Lahr (2004) reporta à caracterização da madeira de Cupiúba, classificando-a como madeira pertencente à classe de resistência C30 para o grupo das folhosas por apresentar valor da resistência característica na compressão ($f_{c0,k}$) de 39,90 MPa, valor esse muito próximo ao limite inferior (40 MPa) da classe de resistência C40. Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr.

Propriedades	Simbologia	Unidade
Densidade aparente	ρ_{ap}	kg/m ³
Retratibilidade radial	$\epsilon_{r,2}$	%
Retratibilidade tangencial	$\epsilon_{r,3}$	%
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	MPa
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	MPa
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	MPa
Resistência ao cisalhamento	f_{v0}	MPa
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	MPa
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	MPa
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	MPa
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_M	MPa
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	N
Dureza normal às fibras	f_{H90}	N
Tenacidade	W	N.m

Fonte: Dias e Lahr (2004)

Os valores médios das propriedades físicas e mecânicas obtidas da pesquisa de Dias e Lahr (2004), cabendo destacar que os resultados de resistência e de rigidez foram corrigidos para o teor de umidade de 12%, assim como estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m^3)	$\varepsilon_{r,2}$ (%)	$\varepsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)		
839	4,3	7,2	54	77	3,1	17,1		
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)	
0,7	79	14125	14439	13148	97	65	7,8	

Fonte: Dias e Lahr (2004)

Faria et al. (2008) investigaram, por meio de modelo de regressão linear, a influência do teor de umidade (6, 12, 20, 25, 30%) na determinação do módulo de elasticidade da flexão estática (E_M) das madeiras de Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), Maçaranduba (*Manilkara* sp.), Canafístula (*Cássia ferruginea*), Cupiúba (*Goupia glabra*), Branquilha (*Terminalia* sp.) e Copaíba (*Copaifera* sp.). O módulo de elasticidade médio na flexão estática da madeira de Cupiúba para o teor de umidade de 12% foi igual a 13092 MPa, e os resultados obtidos dos modelos lineares ajustados conduziram a resultados equivalentes com os provenientes das equações estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

Nicolas, Mascia e Todeschini (2008) empregaram a fórmula de Hankinson e o critério de falha de Tsai-Wu para avaliar a resistência da madeira em direções diferentes da paralela às fibras (orientação das fibras: 0° [paralela], 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), utilizando resultados de resistência provenientes dos ensaios de compressão (f_c), tração (f_t) e ao cisalhamento (f_v) para a madeira de Cupiúba (*Goupia glabra*). Os resultados da resistência à tração, compressão e ao cisalhamento na direção paralela às fibras (0°) foram iguais a 72,90MPa, 58,06 MPa e 19,75MPa, respectivamente. Para a direção perpendicular, a resistência à tração e à compressão foram iguais a 4,65MPa e 20,09MPa, respectivamente. Os autores constataram que os resultados das estimativas dos critérios mostraram ser adequados, e consistem em um caminho interessante para futuras pesquisas na temática.

Segundo o Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (2013), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), a madeira de Cupiúba (*Goupia glabra*), conhecida também por cachaceiro, peniqueiro, perobado-norte, vinagreiro, entre outras, é madeira que pode ser encontrada na região Amazônica: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Roraima e Rondônia. É uma espécie que apresenta alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos e cupins), o cerne e o alburno oferecem moderada permeabilidade às soluções preservativas (oleossolúvel - creosoto; hidrossolúvel-CCA), é de fácil trabalhabilidade tanto com ferramentas manuais como máquinas, e de secagem lenta ao ar, não apresentando rachaduras ou empenamento significativos nessa condição. As propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba são apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba.

Densidade aparente a 15% de umidade	870 kg/m ³
Densidade básica (massa seca da amostra / volume saturado)	710 kg/m ³
Retratibilidade radial	4,8%
Retratibilidade tangencial	9,1%
Retratibilidade volumétrica	16,1%
Resistência na flexão estática (madeira verde)	96,70 MPa
Resistência na flexão estática (madeira com 15% de umidade)	122,10 MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática (madeira verde)	13690 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira verde)	50,80 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira com 15% de umidade)	67,20 MPa
Módulo de elasticidade na compressão paralela (madeira verde)	17142 MPa
Trabalho absorvido no impacto (madeira com 15% de umidade)	25,90 J
Dureza Janka (madeira verde)	6,27 kN
Resistência à tração normal às fibras (madeira verde)	6,80 MPa
Resistência ao fendilhamento (madeira verde)	0,90 MPa

Fonte: Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (2013).

2.3. Estimativa de Propriedades em Função da Densidade Aparente

Seguindo a ideia da estimativa de propriedades apresentada pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) e sabido da relevância da densidade (frente a outras propriedades da madeira) assim como da relativa facilidade na sua determinação, a estimativa (via modelos matemáticos de regressão) de propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função da densidade se apresenta como uma alternativa (DIAS e LAHR, 2004; CHRISTOFORO et al., 2014). Encontrado um bom ajuste (considerando várias amostras de uma mesma espécie de madeira e provenientes de regiões distintas do país) e determinada a densidade da madeira, os modelos que estabelecem a relação entre as propriedades de resistência e de rigidez da madeira com a densidade possibilitarão ao projetista um pré-dimensionamento mais preciso e de maior confiabilidade.

Dias e Lahr (2004) também investigaram, com o auxílio de modelos de regressão testados (linear, logaritmo, polinômio de grau 2, potência, exponencial) a possibilidade da estimativa de propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente, considerando-se para tanto um conjunto de resultados formado por 40 espécies de madeira, dentre elas, a madeira de Cupiúba. Os resultados dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos das estimativas das propriedades de resistência e de rigidez (com exceção da resistência ao fendilhamento – f_{s0}) em função da densidade aparente variaram no intervalo de 62,77% a 92,24%, e o modelo exponencial mostrou ser o de melhor ajuste. O mesmo não ocorreu com relação às propriedades físicas e com a resistência ao fendilhamento das madeiras, cujos valores dos coeficientes de determinação, obtidos com o uso do modelo polinomial quadrático (melhor ajuste), variaram no intervalo de 13,90% a 18,70%.

Almeida et al. (2014) avaliaram a possibilidade da estimativa da tenacidade em função da densidade aparente das madeiras de Teca (*Tectona grandis*) [C20], Paricá (*Schizolobium amazonicum*) [C20], Pinus (*Pinus oocarpa Shiede*) [C20], Eucalipto (*Corymbia citriodora*) [C40], Jatobá (*Hymenaea* sp.) [C60] e Angico (*Anadenanthera falcata*) [C60], ambas pertencentes as classe de resistência C20, C40 e C60 do grupo das folhosas (ABNT NBR 7190, 1997). Os modelos de regressão utilizados foram os polinomiais linear, quadrático e cúbico, todos avaliados pela análise de variância (ANOVA). Todos os ajustes foram considerados significativos pela ANOVA, e o modelo cúbico forneceu o melhor resultado na estimativa da tenacidade, cujo coeficiente de determinação (R^2) obtido foi igual a 84,70%, o que evidencia ser possível a estimativa da tenacidade como função da densidade aparente para o conjunto das espécies de madeira avaliadas.

Christoforo et al. (2014) avalia a possibilidade da estimativa da tenacidade em função da densidade aparente e da resistência na flexão estática de 15 espécies de madeira igualmente divididas nas classes de resistência C20 (Cedro Doce, Cedrona, Quarubarana), C30 (Canafístula, Cedro Amargo, Cupiúba), C40 (Branquilha, Cafearana, Louro Preto), C50 (Castelo, Angico Preto, Catanudo) e C60 (Garapa, Champanhe, Sucupira) da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) para o grupo da folhosas. Os modelos de regressão utilizados foram os polinomiais linear, quadrático e cúbico, todos avaliados pela análise de variância (ANOVA). O valor médio da tenacidade da madeira de Cupiúba (*Goupia Glabra*) foi igual a 75J (75 N·m). Todos os ajustes testados foram considerados significativos pela ANOVA. Para a tenacidade em função da densidade aparente, o melhor modelo obtido foi o polinomial quadrático, que forneceu valor do coeficiente de determinação de 67,80%, e para a estimativa da tenacidade em função da resistência na flexão estática, o melhor ajuste também foi o polinomial quadrático, que forneceu valor do coeficiente de determinação de 58,70%. Pelos resultados obtidos, os autores concluem ser possível a estimativa da tenacidade das madeiras em função densidade aparente.

Almeida et al. (2015) avaliaram a correlação entre a densidade seca (ρ_0) e o Coeficiente de Retratabilidade Volumétrico (CRV) para as madeiras de *Cedrella* sp., *Cassia ferruginea* e *Vataireopsis araroba* separadamente assim como da análise da correlação do conjunto envolvendo as três espécies de madeira. Os resultados do coeficiente de correlação linear de Pearson entre a densidade seca e o coeficiente de retratabilidade volumétrico para cada espécie foram considerados não significativos, entretanto, houve correlação significativa considerando o conjunto com as três espécies, e para tanto, o modelo de regressão gerado ($CRV=0,119+0,566 \cdot \rho_0$) forneceu um valor do coeficiente de determinação de 52%. Para resultados mais contundentes, os autores sugerem o desenvolvimento de novas pesquisas.

Almeida et al. (2016a) avaliaram a possibilidade do uso da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) como estimador da resistência na compressão paralela (f_{c0}) das madeiras de Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.), pertencentes as classes de resistência C30, C40 e C60 da norma brasileira ABNT NBR 790 (1997). Os modelos de regressão utilizados consistiram no linear, exponencial, logarítmico e geométrico, todos fundamentados na análise de variância. Para as madeiras de Canafístula e de Castelo, os melhores ajustes obtidos foram os geométricos, que resultaram em coeficiente de determinação (R^2) de 48,57% e 52,84%, respectivamente, sendo o modelo linear o de melhor ajuste ($R^2 = 14,89\%$) para a madeira de Angelim Araroba. Para o conjunto com as três espécies, o melhor modelo obtido foi o linear, entretanto, que resultou

em valor do coeficiente de determinação de apenas 17,88%. Os autores concluem que a densidade não se apresenta como bom estimador da resistência na compressão paralela das madeiras investigadas.

Cavalheiro et al. (2016) investiga com o uso de modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, a possibilidade da estimativa da retratibilidade (longitudinal, radial, tangencial, volumétrica) e do coeficiente de anisotropia em função da densidade aparente (ρ_{ap}) e básica (ρ_{bas}), considerando as espécies de madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Jatobá (*Hymenaea* sp.) and Lyptus® do grupo das folhosas, e as madeiras de *Pinus* sp e de *Pinus oocarpa* do grupo das coníferas (ABNT NBR 7190, 1997). A densidade aparente também foi utilizada na estimativa da densidade básica e com o uso dos mesmos modelos de regressão. Para as madeiras do grupo das coníferas, o único ajuste considerado significativo pela análise de variância consistiu na relação (modelo linear) entre a densidade aparente e a densidade básica, que resultou em um coeficiente de determinação de 91,72%, o mesmo ocorreu com relação ao grupo de espécies de madeira pertencente às folhosas, em que o único ajuste considerado significativo (modelo linear) foi entre a densidade aparente e a densidade básica ($R^2 = 86,36\%$). Com relação às estimativas das retratibilidades e do coeficiente de anisotropia ora em função da densidade aparente, ora em função da densidade básica, os modelos gerados foram considerados significativos pela análise de variância, o que evidencia a impossibilidade da estimativa dessas propriedades em função da densidade da madeira.

Christoforo et al. (2016) avalia a possibilidade da estimativa da retratibilidade (radial, tangencial, volumétrica) em função da densidade aparente considerando as espécies de madeira Cedro Doce (*Cedrela* sp.), Canafístula (*Cassia ferrugínea*), Angelim Araroba (*Vatairea opsisararoba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), pertencentes as classes de resistência C20, C30, C40, C50 e C60, respectivamente (ABNT NBR 7190, 1997). Os autores utilizaram modelos de regressão polinomiais linear, quadrático e cúbico e também ajustes exponenciais, ambos fundamentados na análise de variância (ANOVA) dos modelos de regressão. Para o conjunto envolvendo todas as espécies de madeira, os melhores ajustes foram provenientes das retrações tangenciais e volumétricas, ambos com o uso do modelo exponencial, justificados pelos maiores valores dos coeficientes de determinação obtidos, sendo 51,20% para a estimativa da retratibilidade tangencial e de 54,60% para a estimativa da retratibilidade volumétrica.

2.4. Influência da Região de Extração

Observando que as reservas naturais das espécies desenvolvidas nas florestas tropicais, e aí se encontra a espécie Cupiúba, ocupam uma área geográfica de extensão significativa e, portanto, passíveis de serem encontradas variações importantes nas propriedades estudadas, sendo assim, há que se considerar a possibilidade de lotes específicos retirados de uma das regiões apresentarem resultados significativamente diferentes para as mesmas propriedades, neste caso as conclusões devem ser cautelosas, pois podem não representar fielmente o universo da reserva.

A influência da região de extração (Municípios de Caracaraí e Bonfim em Roraima; Município de Alta Floresta em Mato Grosso) nas três propriedades físicas e doze propriedades mecânicas da madeira da espécie Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) e dos teores de umidade a 12% e saturada, foram investigadas no trabalho de Lahr et al. (2016). Os autores concluíram não ser significativa a influência da região de extração das madeiras na determinação das suas propriedades físicas e mecânicas, e com relação ao teor de umidade, quando considerado significativo pela análise de variância, os valores de resistência e de rigidez sofreram reduções com o aumento do teor de umidade de 12% para saturada.

Cabe destacar que o trabalho de Lahr et al. (2016) foi a única pesquisa desenvolvida com o objetivo de se investigar a influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, e como também comentado pelos autores, tal estudo se apresenta importante visto a variabilidade na fonte de proveniência das madeiras fornecidas pelas empresas do ramo, o que não é discutido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), e que se apresenta como possível tema para projeto de pesquisa futuro, permitindo o estudo de um número maior de regiões de extração na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada na determinação das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cupiúba extraídas dos municípios de Caracaraí [Car] e Bonfim [Bon] em Roraima e Claudia [Cla] em Mato Grosso, assim como a metodologia estatística utilizada para avaliar a equivalência ou não das propriedades em função das regiões de extração e também apresentar os modelos de regressão utilizados na estimativa das propriedades de resistência e rigidez em função da densidade aparente.

Nas informações dadas pelo fornecedor das madeiras constam que as toras extraídas da reserva, foram levadas até a serraria próxima e desdobradas em peças de caibros, terças e vigotas, e desta forma transportadas por rodovia até o pátio do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, onde foram estocadas obedecendo todo o procedimento exigido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1990), inclusive o teor de umidade próximo a 12% (umidade de equilíbrio para madeiras), e posteriormente escolhidas as amostras e ensaiadas nesse mesmo local.

As propriedades físicas e mecânicas foram obtidas de acordo com as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), fornecidos em seu anexo B “Determinação das Propriedades das Madeiras para Projetos de Estrutura”, e o número de determinações experimentais (NDE) por região de extração são apresentados na Tabela 3.1, que resultaram na realização de 624 determinações experimentais.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cupiúba.

Propriedades	Sigla	NDE por Região		
		Car	Bon	Cla
Densidade aparente	ρ_{12}	15	12	12
Retração radial total	$\epsilon_{r,2}$	15	12	12
Retração tangencial total	$\epsilon_{r,3}$	15	12	12
Ponto de saturação das fibras	PSF	15	12	12
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	15	12	12
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	15	12	12
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	15	12	12
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}	15	12	12
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	15	12	12
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	15	12	12
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	15	12	12
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	15	12	12
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_m	15	12	12
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	15	12	12
Dureza normal às fibras	f_{H90}	15	12	12
Tenacidade	W	15	12	12

NDE: Número de Determinações Experimentais

Fonte: Próprio Autor.

Além dos valores médios das propriedades físicas e mecânicas avaliadas, o valor característico (f_{wk}) também foi calculado (Equação 3.1) para as propriedades de resistência seguindo as premissas da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2) - 1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,10 \quad (3.1)$$

Da Equação 3.1, os resultados amostrais da resistência à solicitação específica (f) devem ser colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), desprezando-se o maior valor se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para f_{wk} valor de resistência inferior a f_1 e nem inferior a 0,70 do valor médio da resistência. Cabe destacar que o valor característico da resistência na compressão paralela às fibras é a medida responsável por enquadrar a devida espécie de madeira nas classes de resistência referentes ao grupo das coníferas e das folhosas.

3.1. Propriedades Físicas

Este item apresenta a forma de obtenção das propriedades físicas obtidas nesta pesquisa.

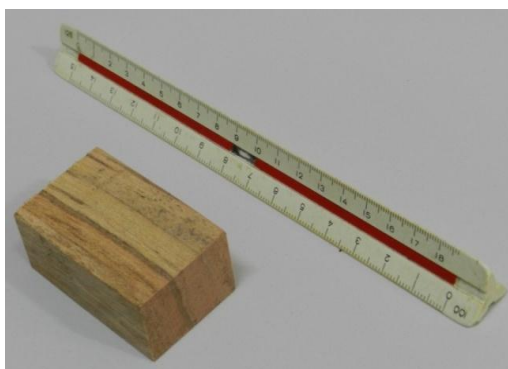
3.1.1. Densidade Aparente

A densidade aparente da madeira ($\rho_{ap,12\%}$) a massa específica convencional obtida da razão entre a massa da amostra a 12% de teor de umidade ($m_{12\%}$) pelo seu respectivo volume ($v_{12\%}$), assim como expressa pela Equação 3.2.

$$\rho_{ap,12\%} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \quad (3.2)$$

As amostras (Figura 3.1a) para a determinação da densidade aparente possuem dimensões $2 \times 3 \times 5$ cm, e devem conter pelo menos cinco anéis de crescimento. Os equipamentos utilizados na sua obtenção consistem em paquímetro digital (Figura 3.1b) e balança eletrônica (Figura 3.1c). O paquímetro digital da Figura 3.1b utilizado na medição da densidade apresenta precisão de 0,01 milímetros, e a balança digital utilizada (Figura 3.1b) possui sensibilidade de 0,001 gramas.

Figura 3.1 – Corpo de prova (a), paquímetro digital (b) e balança digital (c), utilizados na obtenção dos valores da densidade aparente.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.1.2. Retração da Madeira

Segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997), o grau de estabilidade dimensional da madeira é medido através das propriedades de retração e de inchamento em 12 amostras

obtidas de um lote de madeira considerado homogêneo. Para a propriedade de retração (ϵ), os resultados são obtidos segundo as direções preferenciais 1, 2 e 3, correspondentes às direções (n) longitudinal (axial), radial e tangencial, respectivamente, além do coeficiente de retração volumétrica (ΔV).

As deformações específicas de retração e de variação volumétrica são obtidas pelas Equações 3.3 e 3.4.

$$\epsilon_{r,n} = \left(\frac{L_{n,sat} - L_{n,seca}}{L_{n,seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$\Delta V = \left(\frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

Da Equação 3.3 tem-se que:

- r: propriedade de retração;
- n: direção de referência considerada – 1 (longitudinal), 2 (radial) ou 3 (tangencial);
- L: dimensão da amostra na direção axial (paralela às fibras).

Da Equação 3.4 tem-se que:

- V_{sat} : $L_{1,sat} \cdot L_{2,sat} \cdot L_{3,sat}$ é o volume da amostra saturada;
- V_{seca} : $L_{1,seca} \cdot L_{2,seca} \cdot L_{3,seca}$ é o volume da amostra seca;
- L: a dimensão representativa dos três lados do corpo de prova.

Para a determinação do grau de retratibilidade da madeira, o corpo de prova deve estar com umidade superior à saturação, caso não esteja é necessário re-umidificá-lo seguindo os procedimentos normativos descritos pela norma brasileira NBR 7190 (1997), e para a determinação do grau de inchamento a amostra deve estar seca.

3.2. Propriedades Mecânicas

3.2.1. Compressão Paralela às Fibras

O objetivo do ensaio de compressão paralela às fibras consiste em determinar a resistência e a rigidez à compressão da madeira de um lote de 12 m³ considerado homogêneo.

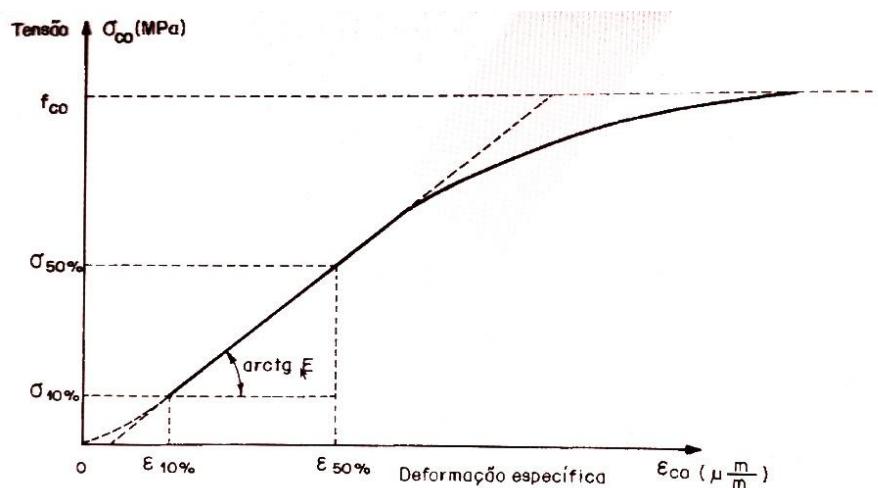
Define-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) como a razão entre a máxima força de compressão $F_{c0,máx}$ obtida do ensaio pela Área da seção transversal da amostra, assim como expressa a Equação 3.5.

$$f_{c,0} = \frac{F_{c0,máx}}{Área} \quad (3.5)$$

A rigidez ou o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão×deformação específica (Figura 3.2), expressa pela Equação 3.6, em que $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento, mais precisamente nos pontos de referência 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 3.3.

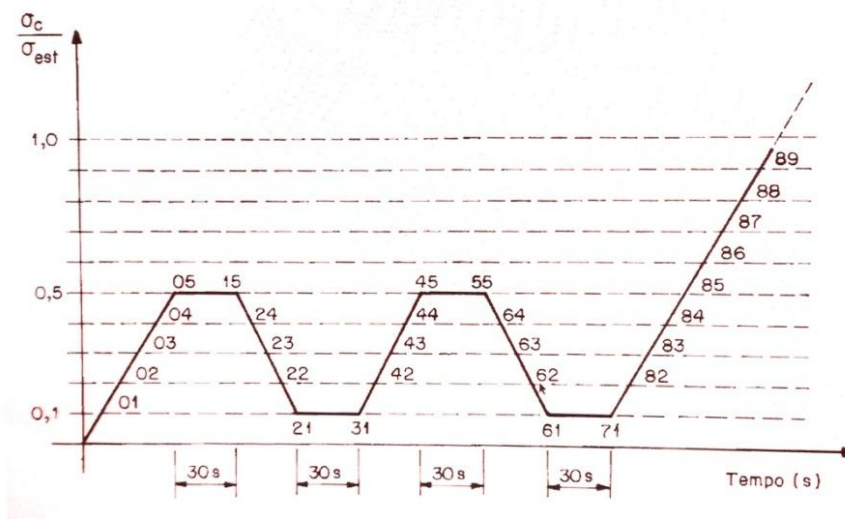
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.6)$$

Figura 3.2 - Diagrama tensão x deformação específica.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

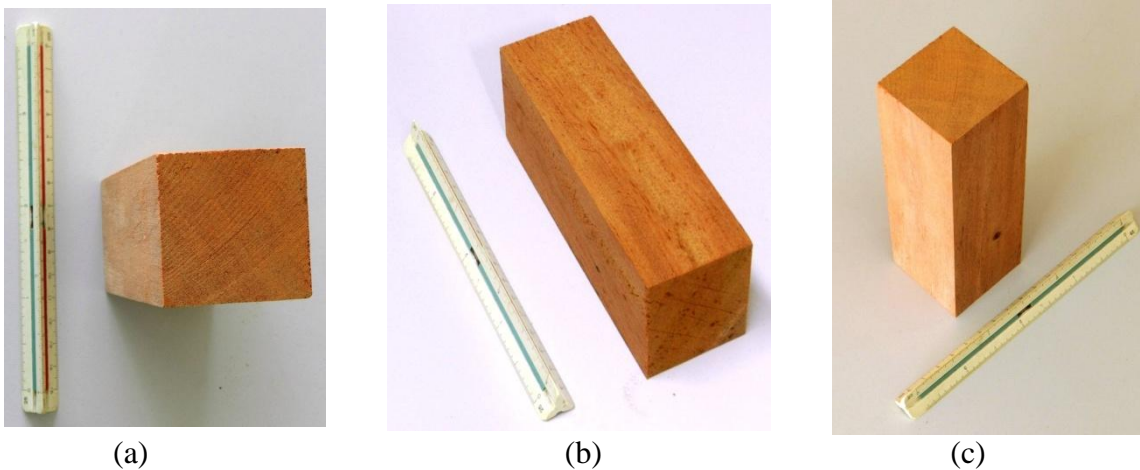
Figura 3.3 - Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à compressão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Para a determinação da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras a norma Brasileira estabelece que o corpo de prova padrão seja prismático, de seção transversal quadrada 5×5 cm de lado e 15 cm de comprimento na direção das fibras (Figura 3.4), com precisão dimensional exigida de 0,1mm.

Figura 3.4 - Corpo de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras, (a) seção transversal, (b) seção lateral e (c) perspectiva.



Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) define que as deformações medidas nos corpos de prova para a compressão paralela às fibras sejam realizadas utilizando no mínimo dois relógios comparadores com precisão de milésimo de milímetro (0,001 mm), devidamente posicionados em cantoneiras metálicas fixadas em faces opostas do corpo de prova a uma distância de 100 mm entre linhas de fixação e afastadas das extremidades de 25 mm, conforme ilustra a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Padrão de fixação dos relógios comparadores no corpo de prova.



Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

As deformações são medidas com precisão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e o carregamento deve aplicado pela máquina de ensaio (Figura 3.6) a uma taxa de 10 MPa/min. de modo monotônico.

As fixações das cantoneiras (Figura 3.7) devem estar afastadas das bordas do corpo de prova de 25 mm para que o esmagamento da madeira junto ao suporte da máquina não interfira na medição das deformações. Na madeira de Cupiúba este esmagamento é quase imperceptível por ser madeira dura, mas para outras espécies consideradas moles, estas deformações por esmagamento podem ser significativas.

Por ser a madeira um material natural e de estrutura orgânica heterogênea, cada face do corpo de prova pode apresentar deformações diferentes (ICIMOTO et al., 2015). Entretanto a norma Brasileira permite fixar os relógios comparadores em no mínimo duas faces opostas do corpo de prova, e considerar como deformação característica a resultante da média das deformações registradas em cada relógio comparador.

Figura 3.6 - Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores na máquina de ensaio para o ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

Figura 3.7 - Vista geral da máquina de ensaio para a compressão paralela às fibras.

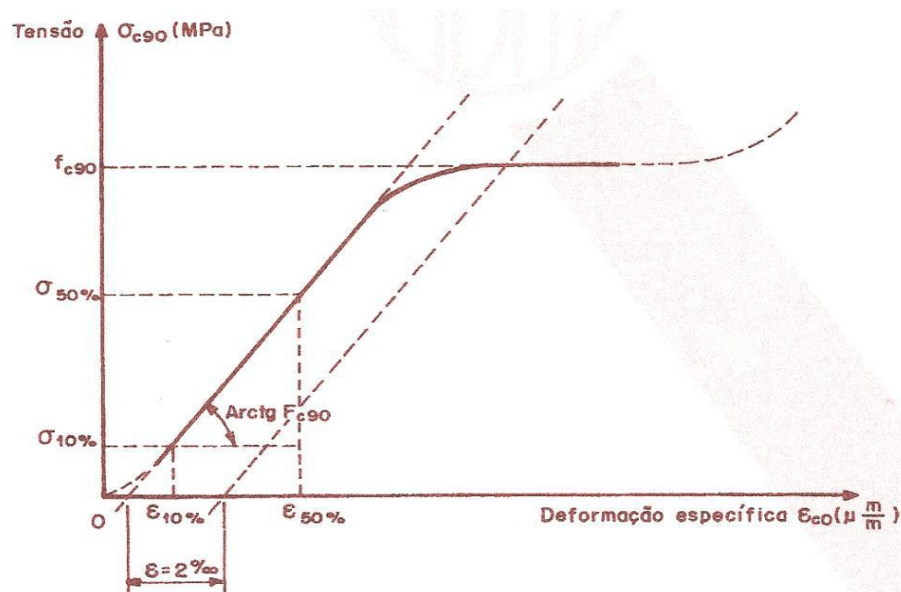


Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

3.2.2. Compressão Normal às Fibras

O objetivo do ensaio de compressão normal às fibras consiste em determinar a resistência e a rigidez à compressão representativa de um lote de madeira considerado homogêneo. Define-se a resistência à compressão normal às fibras como o valor convencional da tensão de compressão $f_{c90} = F_{c90, \text{máx}} / \text{Área}$ para uma deformação específica residual de 2mm.m ($\epsilon_{2\text{mm/m}}$) na direção tangencial às fibras em um corpo de prova (Figura 3.8).

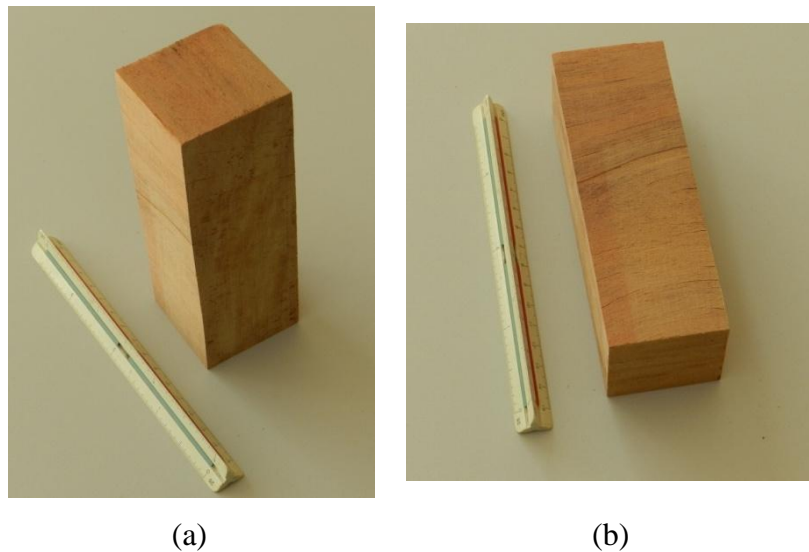
Figura 3.8 - Diagrama tensão x deformação específica para a determinação da rigidez normal às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Para a determinação da resistência e da rigidez à compressão normal às fibras, norma brasileira estabelece que a geometria do corpo de prova padrão seja a mesma utilizada na compressão paralela às fibras, ou seja, prismático, de seção transversal quadrada 5×5 cm de lado e 15 cm de comprimento na direção tangencial das fibras, com precisão dimensional de 0,1mm (Figura 3.9). A medida das deformações no corpo de prova deve ser feita em pelo menos duas de suas faces. As deformações devem medidas com precisão mínima de 50 $\mu\text{m/m}$, e o carregamento deve aplicado pela máquina de ensaio a uma taxa de 10MPa/min de modo monotônico.

Figura 3.9 – Corpo de prova para ensaio de compressão normal às fibras,
(a) vista em perspectiva e (b) vista da face tangencial às fibras.



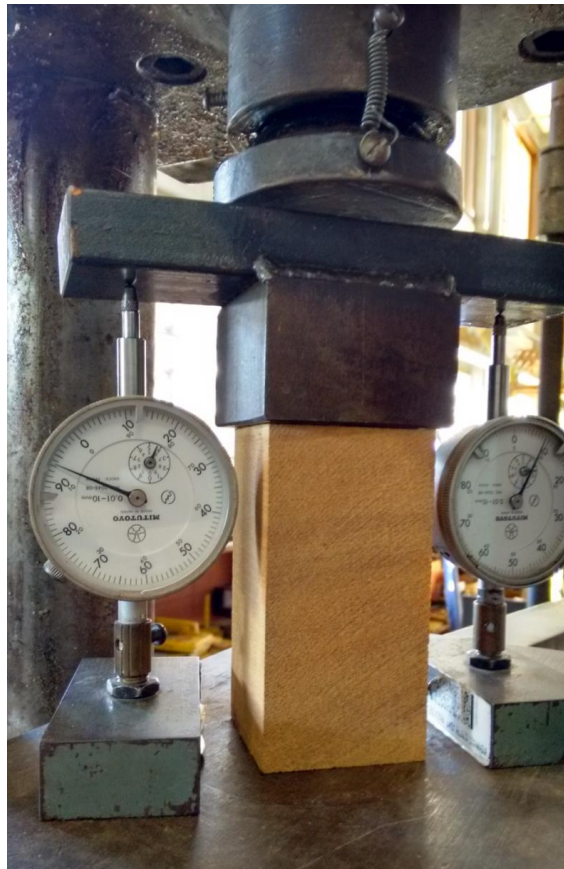
Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

A resistência a ser utilizada na determinação do módulo de elasticidade normal às fibras deve ser estimada ($f_{c90,est}$) por ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, obtido da mesma amostra investigada. O carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga e de acordo com o procedimento já especificado anteriormente, e os registros das cargas e das deformações devem ser tomados a cada ponto do diagrama de carregamento. Para ensaios instrumentados o carregamento deve ser limitado a 70% da carga estimada, e levado à ruptura após a retirada dos instrumentos.

Define-se a rigidez à compressão normal às fibras como o módulo de elasticidade (E_{c90}) obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão \times deformação específica (Figura 3.8), determinado pela Equação 3.6, em que $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento, mais precisamente nos pontos de referência 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 3.3. A Figura 3.10 ilustra uma amostra posicionada para a realização do ensaio de compressão normal às fibras.

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.7)$$

Figura 3.10 - Corpo de prova posicionado na máquina para o ensaio de compressão normal às fibras.

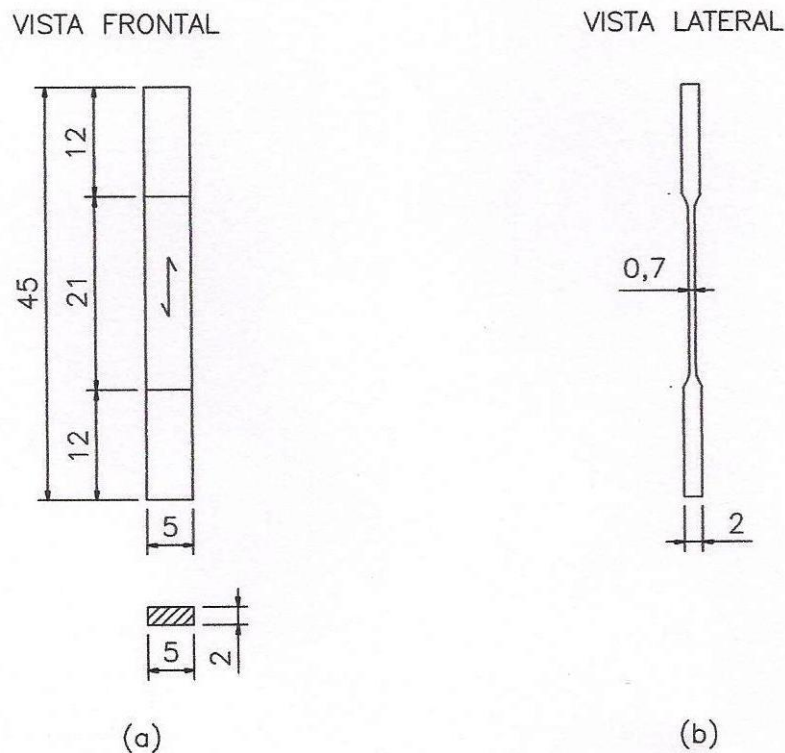


Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

3.2.3. Tração Paralela às Fibras

O objetivo desse ensaio consiste em determinar a resistência e a rigidez à tração paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo. Segundo a norma brasileira, a resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0} = F_{t0, \text{máx}}/A$) é a máxima tensão de tração que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios de tração paralela às fibras, (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.

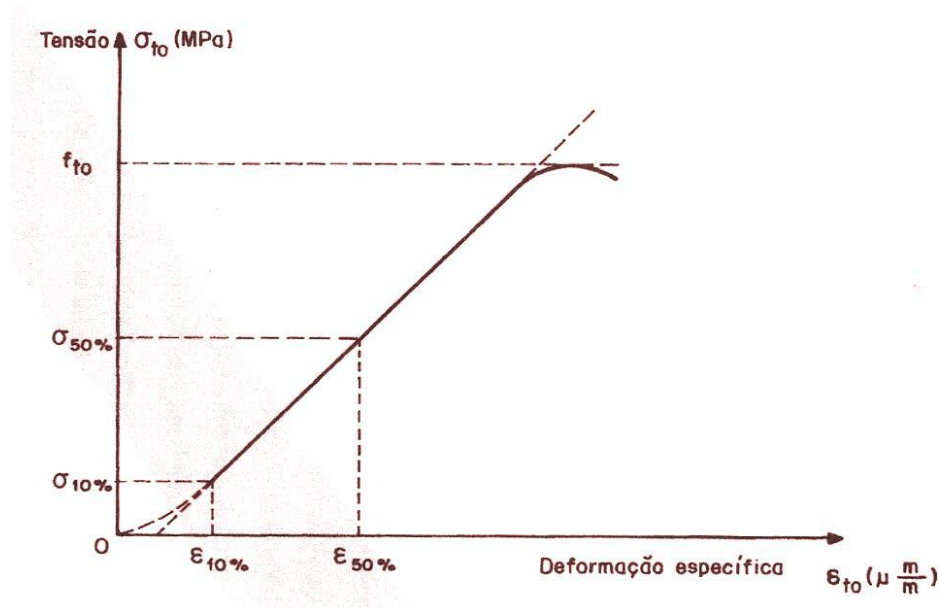


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O módulo de elasticidade (Equação 3.8) é determinado como a inclinação do trecho linear da reta secante à curva tensão×deformação (Figura 3.12) definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}, \varepsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}, \varepsilon_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras medidas no ensaio, dado por:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.8)$$

Figura 3.12 - Diagrama tensão × deformação específica na tração paralela às fibras.

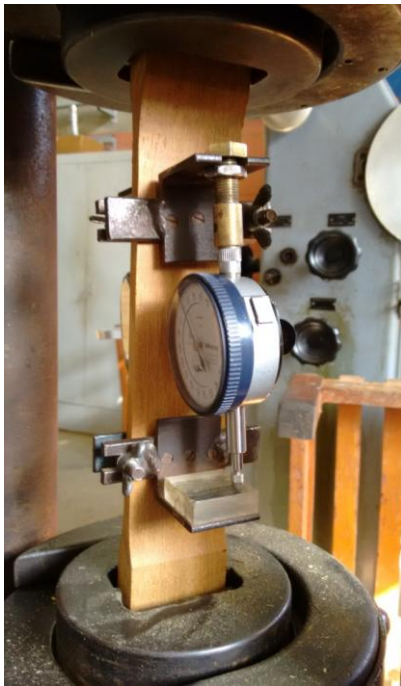


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Para a determinação da resistência e da rigidez à tração paralela às fibras, a norma brasileira permite um dos dois tipos de corpos de prova, um de seção transversal circular e outro de seção transversal retangular, conforme mostrados na Figura 3.12. Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de seção transversal retangular com dimensões $5 \times 2 \text{ cm}$ de lado e comprimento de 15 cm na direção paralela às fibras, com precisão dimensional de 0,1mm.

A medida das deformações no corpo de prova retangular deve ser feita nas faces opostas do lado medindo 5 cm (Figura 3.13), utilizando-se relógio comparador com exatidão de $50 \mu\text{m}/\text{m}$, e o carregamento aplicado pela máquina de ensaios (Figura 3.14) sobre o corpo de prova deve obedecer a uma taxa de $10 \text{ MPa}/\text{min}$.

Figura 3.13 – Vistas do corpo de prova para o ensaio de tração paralela às fibras,
(a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.



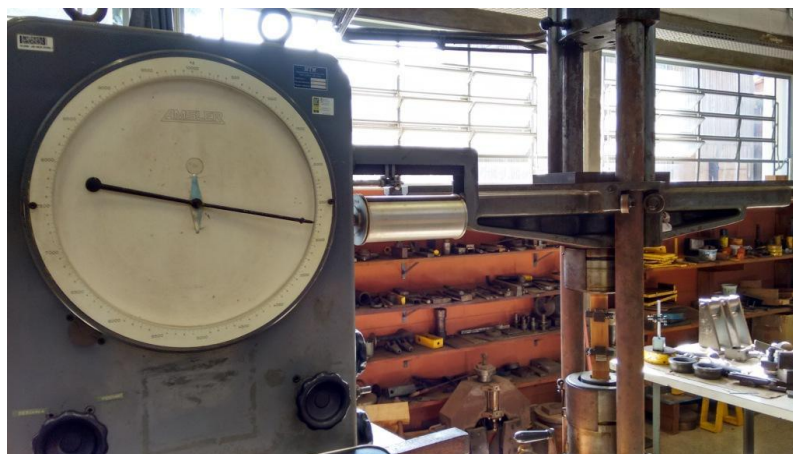
(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

Figura 3.14 – Máquina de ensaio universal utilizada para o ensaio de tração na direção paralela às fibras.



Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

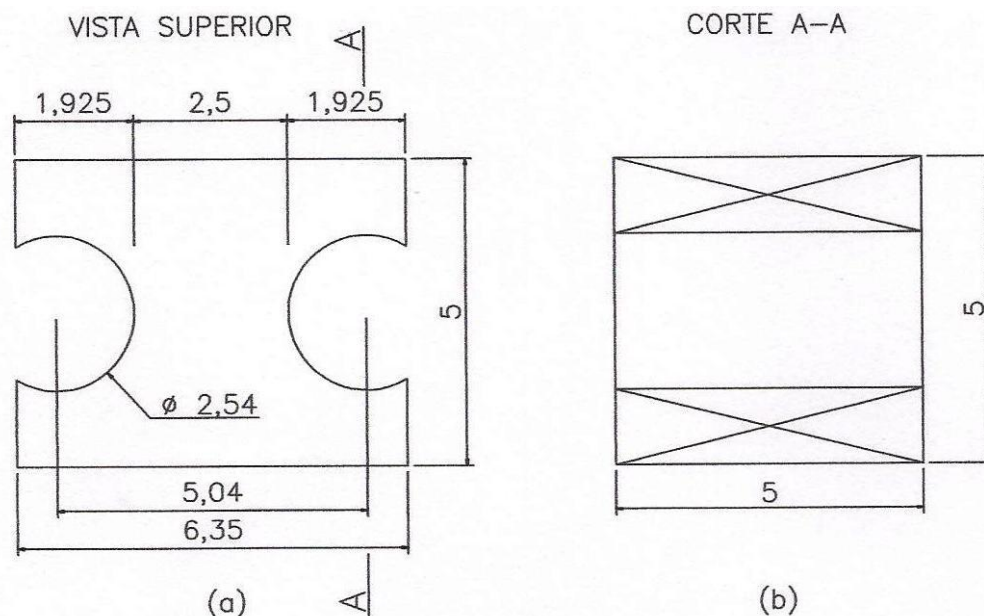
3.2.4. Tração Normal às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência e a rigidez à tração normal às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo de 12 m³.

Segundo a norma brasileira, a resistência à tração normal às fibras (f_{t90}) consiste na máxima tensão de tração que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão (Figura 3.15), expressa pela Equação 3.9.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,máx}}{A_{t90}} \quad (3.9)$$

Figura 3.15 - Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.



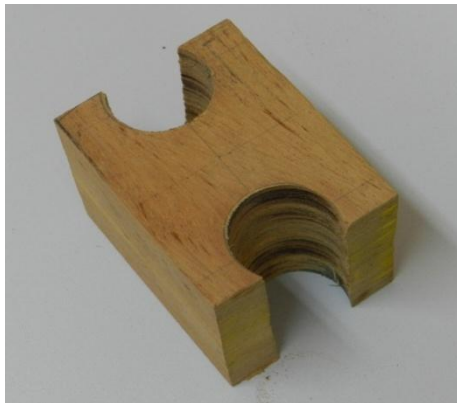
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Da Equação 3.8, $F_{t90,máx}$ é a máxima força de tração normal às fibras aplicada ao corpo de prova, expressa em N, e A_{t90} ($\approx 25\text{mm} \times 50\text{mm}$) é área da seção transversal do corpo de prova em que deve atuar a força de tração normal, expressa em m².

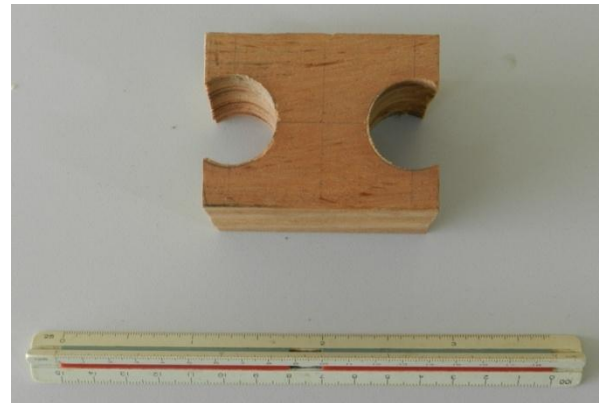
A norma brasileira não permite considerar essa propriedade mecânica na avaliação da segurança das estruturas, apenas para o estudo comparativo entre diferentes espécies de madeira. O corpo de prova (Figura 3.16) é produzido com a precisão de 0,1 mm na geometria mostrada, e durante o ensaio o carregamento deve ser aplicado preferencialmente na direção tangencial e a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 3.16 - Detalhe do corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras.

(a) perspectiva e (b) vista superior.



(a)



(b)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

O arranjo do ensaio de tração normal às fibras com o posicionamento do corpo de prova na máquina está ilustrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Ensaio de tração normal às fibras da madeira, (a) corpo de prova preparado e (b) corpo de prova rompido.



(a)



(b)

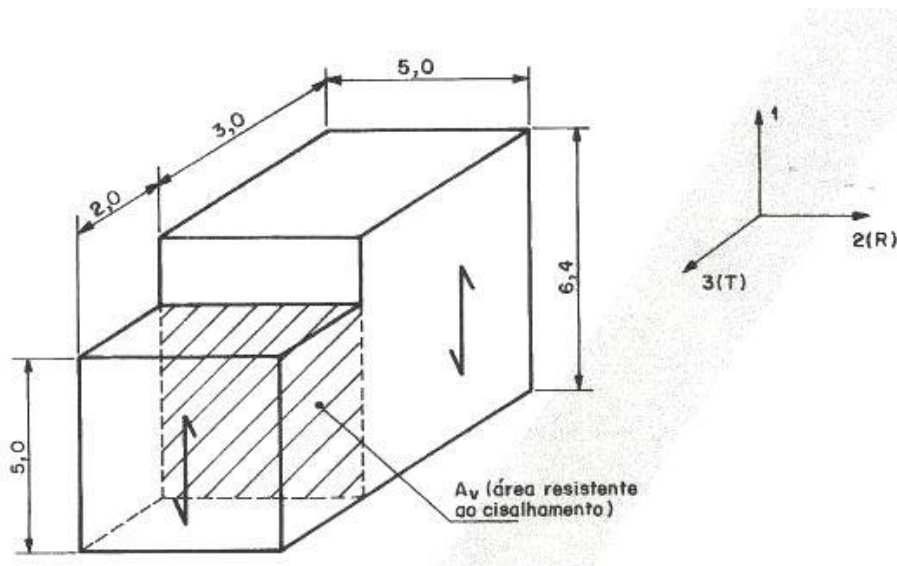
Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.2.5. Cisalhamento Paralelo às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo e com 12 m³. De acordo com a norma brasileira, a resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}) é expressa pela máxima tensão de corte (Equação 3.10) que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão (Figura 3.18), com precisão nas dimensões de 0,1 mm e carregamento aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}} \quad (3.10)$$

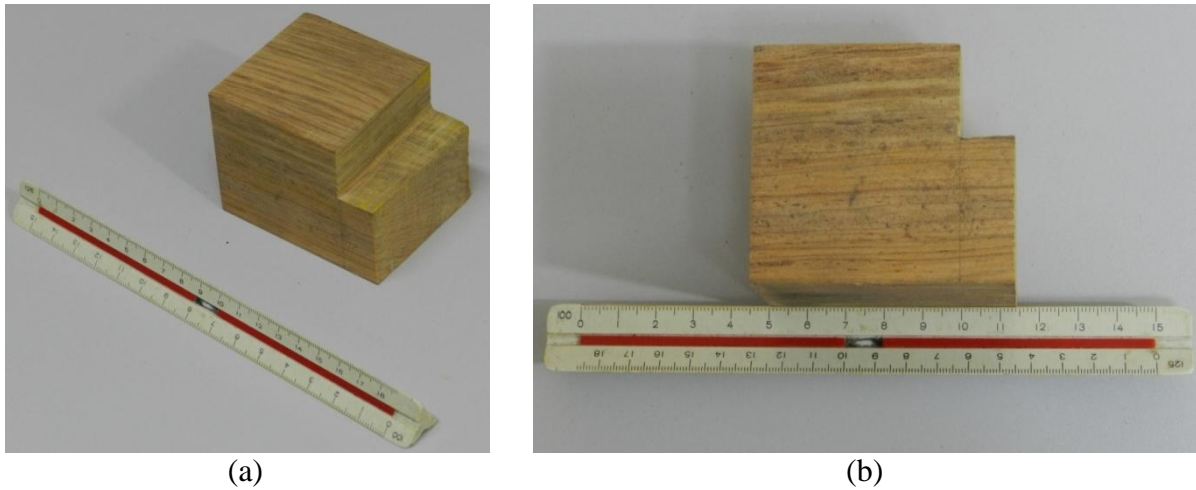
Figura 3.18 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Da Equação 3.9, $F_{v0,máx}$ é a máxima força de tração normal às fibras aplicada ao corpo de prova (Figura 3.19), expressa em N, e A_{v0} é a área ($\approx 50\text{mm} \times 50\text{mm}$) da seção transversal do corpo de prova em que deve atuar a força de tração normal, expressa em m².

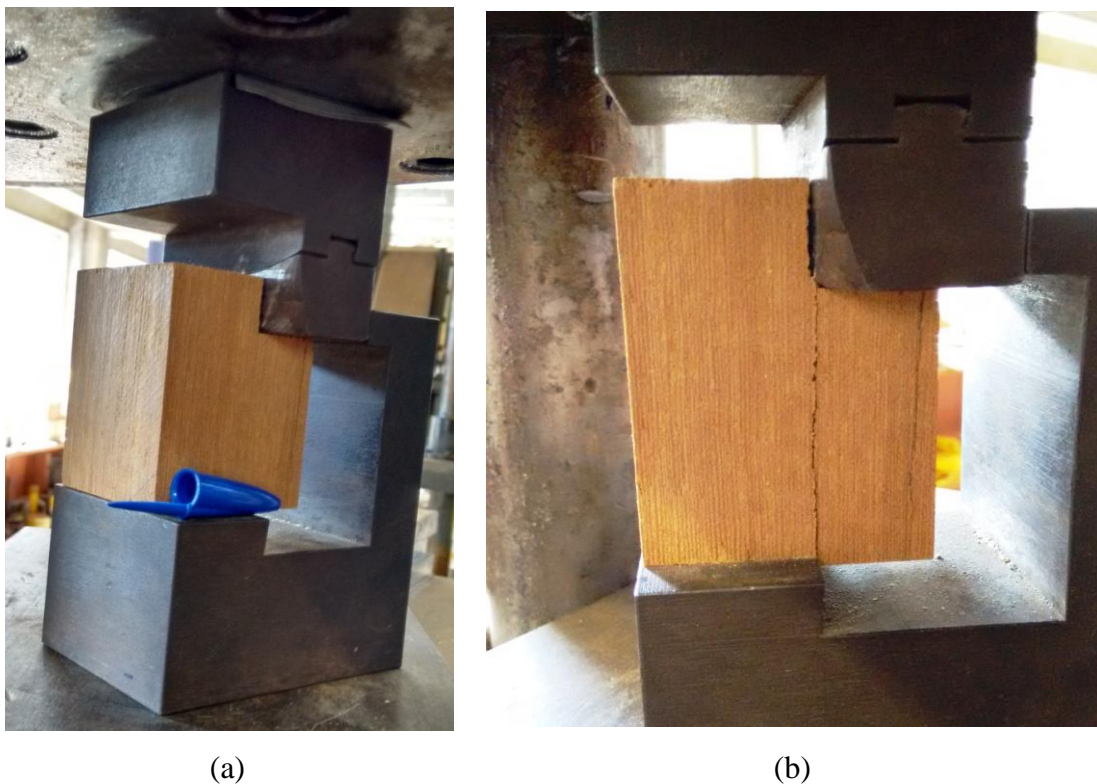
Figura 3.19 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.



Fonte: Imagens registradas pelo Autor, (a) perspectiva e (b) vista superior.

A Figura 3.20 mostra o equipamento preparado para a instalação do corpo de prova para o ensaio de determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Figura 3.20 - Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, (a) corpo de prova instalado e (b) corpo de prova rompido.



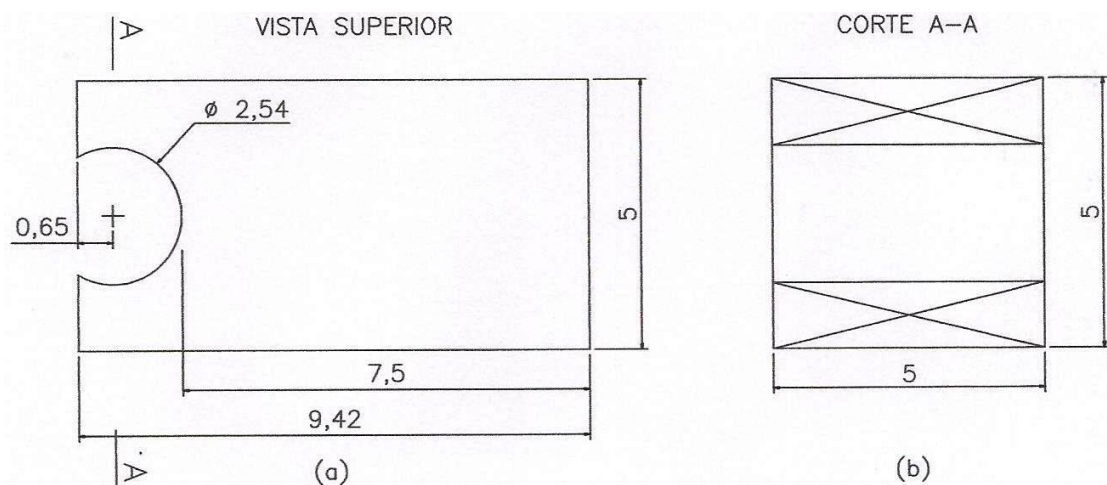
Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.2.6. Fendilhamento Paralelo às Fibras

Esse ensaio objetiva determinar a resistência ao fendilhamento na direção paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo e com 12 m³.

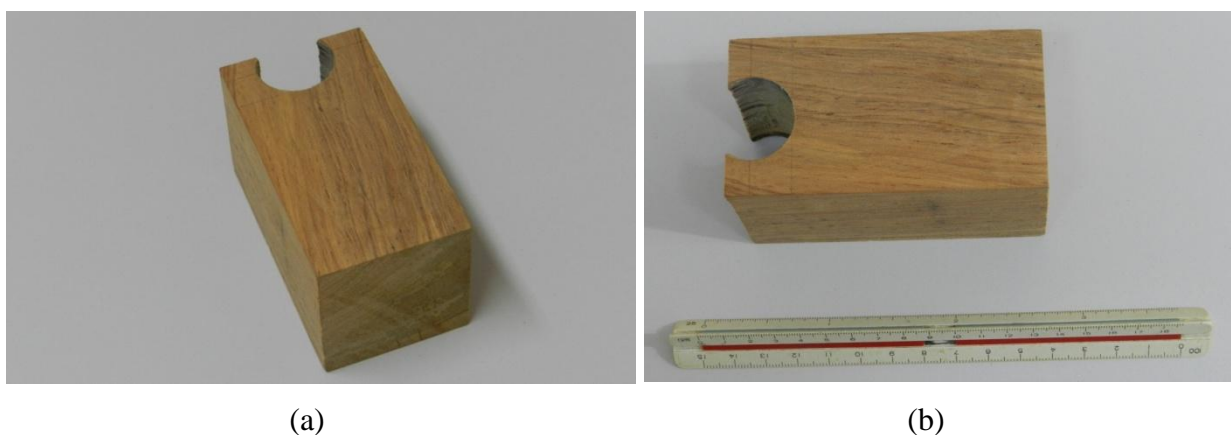
A resistência ao fendilhamento ($f_{s0}=F_{s0,máx}/A_{s0}$) consiste na razão entre a máxima força aplicada ($F_{s0,máx}$) pela área da seção útil ($A_{s0}\approx 75\text{mm}\times 50\text{mm}$) do corpo de prova padrão (Figura 3.21 e Figura 3.22), com precisão nas dimensões de 0,1 mm e carregamento aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 3.21 - Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

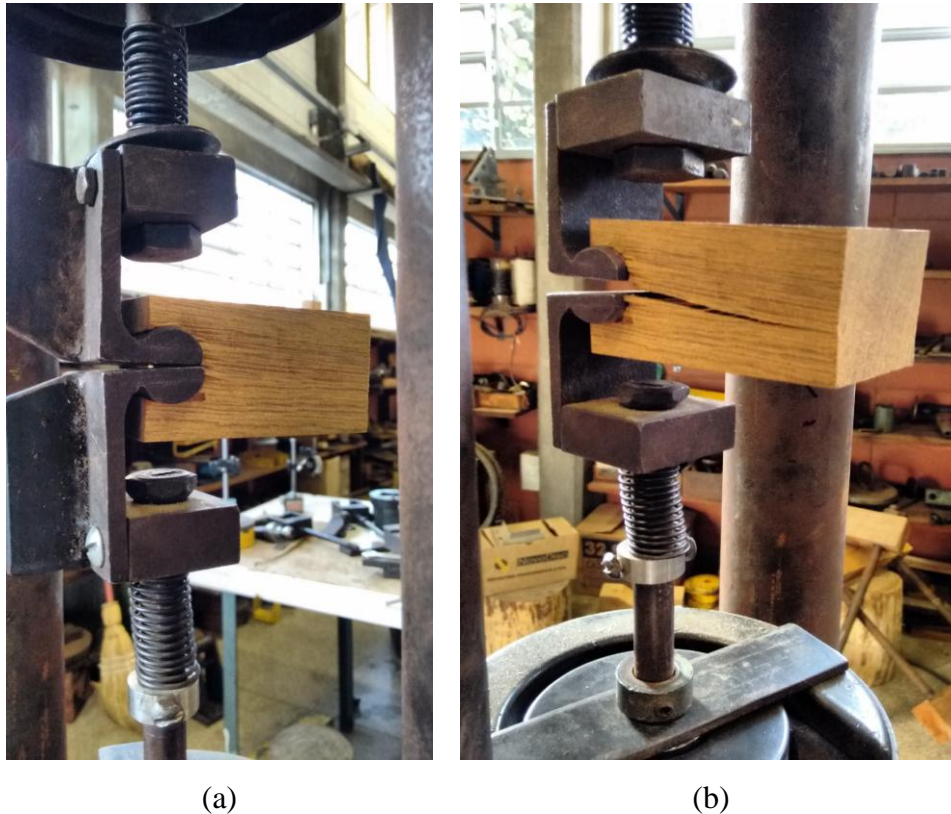
Figura 3.22 - Corpo de prova de madeira de Cupiúba para o ensaio de fendilhamento na direção paralela às fibras da madeira, (a) perspectiva e (b) vista superior.



Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) recomenda que a resistência ao fendilhamento paralelo às fibras seja considerada apenas como um valor convencional e deva ser utilizado apenas para estudo comparativo entre espécies de madeira. A Figura 3.23 ilustra o ensaio de fendilhamento em um corpo de prova de madeira de Cupiúba.

Figura 3.23 - Ensaio de fendilhamento em um corpo de prova de madeira de Cupiúba, (a) corpo de prova instalado e (b) corpo de prova rompido.



Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

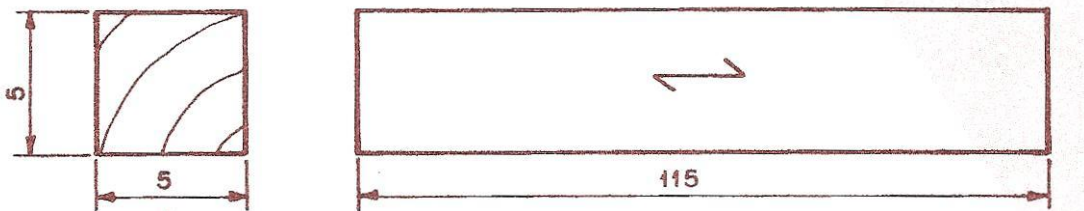
3.2.7. Flexão Estática

O objetivo desse ensaio consiste em determinar a resistência e a rigidez da madeira à flexão simples de um lote considerado homogêneo e com 12 m³. Segundo a norma brasileira, a resistência à flexão simples (f_M) é obtida de acordo com a Equação 3.11, sendo $M_{máx}$ o valor do momento fletor máximo e W_e o módulo de resistência na flexão estática, que para seções retangulares $W_e = (b \cdot h^2) / 6$, sendo b e h as medidas da base e da altura da seção transversal da amostra, respectivamente.

$$f_{wM} = \frac{M_{MÁX}}{W_e} \quad (3.11)$$

O ensaio de flexão simples (modelo estrutural de flexão a três pontos) definido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) consiste em aplicar um carregamento concentrado no ponto médio de um corpo de prova suportado por apoios nas suas extremidades, sendo prismática a geometria da amostra (Figuras 3.24 e 3.25) de seção transversal 5×5 cm e comprimento 115 cm.

Figura 3.24 - Corpo de prova para a flexão estática.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

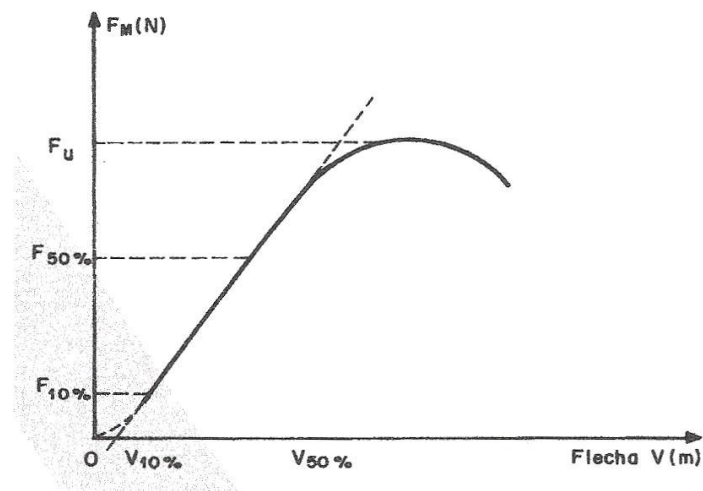
Figura 3.25 – Corpo de prova de madeira de Cupiúba para o ensaio de flexão estática.



Fonte: Imagem registrada pelo Autor.

A determinação da rigidez ou do módulo de elasticidade (E_M) da madeira na flexão simples (Equação 3.12) é obtida pela inclinação da reta secante à curva de carga \times deslocamento vertical entre os pontos correspondentes a 10% e 50% da carga máxima F_U , conforme ilustrado na Figura 3.26, sendo a carga máxima F_U determinada por ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo.

Figura 3.26 - Curva força×flecha para a determinação do módulo de elasticidade.



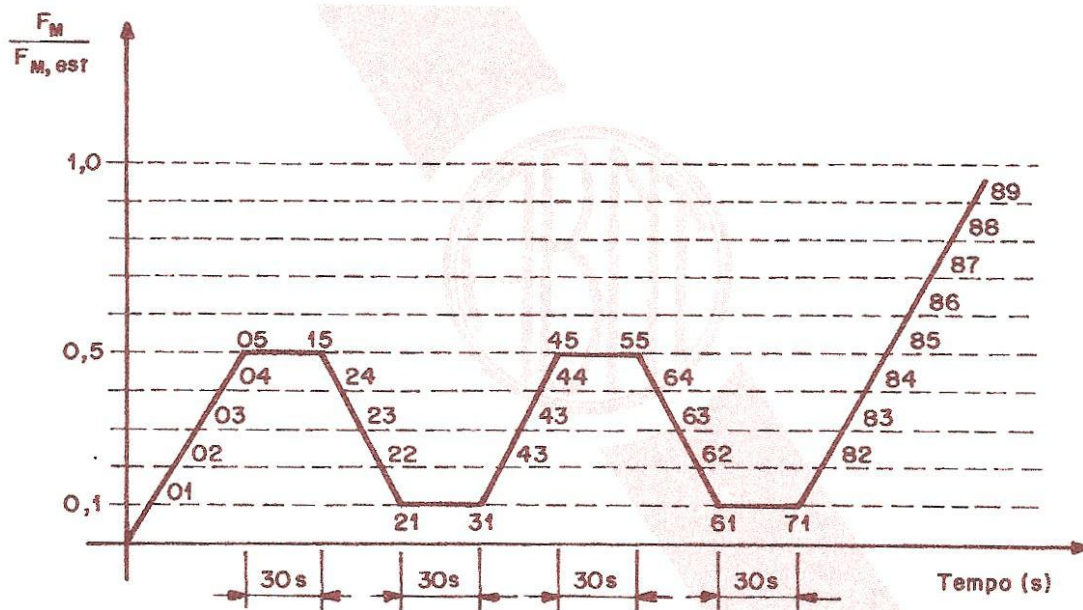
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3.12)$$

Da Equação 3.12, $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada ($F_{M,est} = F_U$) aplicada no corpo de prova, e representadas respectivamente pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 3.25, $V_{10\%}$ e $V_{50\%}$ são os deslocamentos medidos no meio do vão do corpo de prova correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada ($F_{M,est}$) e b, h e L consistem nas medidas da largura, altura e comprimento do corpo de prova.

A carga estimada ($F_{M,est}$) utilizada na determinação da rigidez da amostra é a mesma definida pela norma ABNT NBR 7190 (1997) como aquela que produz a ruptura do corpo de prova gêmeo (F_U). Conhecido o valor da resistência estimada $f_{M,est}$, o carregamento deve ser aplicado ao corpo de prova em dois ciclos de carga e descarga (Figura 3.26) a uma taxa de 10MPa/min.

Figura 3.27 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Os deslocamentos sob o ponto de aplicação do carregamento devem ser medidos a cada ponto do diagrama de carregamento especificado na Figura 3.26 por transdutores de deslocamentos com precisão de 0,01 mm. Neste caso o registro dos deslocamentos é efetuado até o valor de 70% da carga estimada, em seguida retirado o instrumento de medição e o carregamento aumentado até a ruptura do corpo de prova.

A Figura 3.28 apresenta o corpo de prova da madeira de Cupiúba no ensaio de flexão estática.

Figura 3.28 - Ensaio de flexão estática da madeira de Cupiúba, (a) corpo de prova posicionado, (b) durante o ensaio, (c) ruptura no ensaio e (d) corpo de prova rompido.



(a)



(b)



(c)



(d)

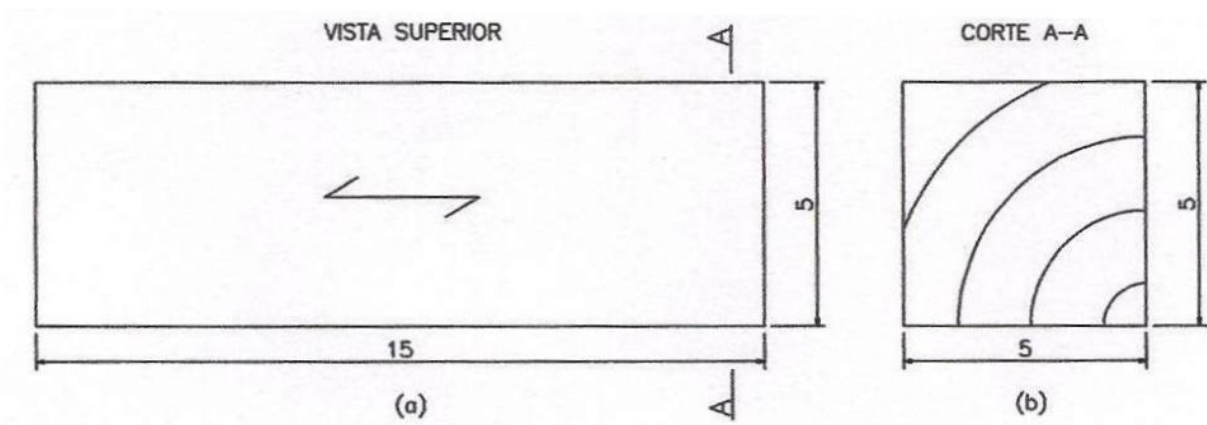
Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.2.8. Dureza Janka

Esse ensaio objetiva determinar a dureza da madeira para um lote considerado homogêneo. A norma brasileira estabelece como critério para se determinar o grau de dureza de uma determinada espécie o método proposto por Janka, que define convencionalmente a dureza (f_H) como a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) de compressão que atua em uma face do corpo de prova quando ocorre a penetração de uma semiesfera de área diametral ($A_{seção\ diametral}$) de 1,0 cm². A dureza Janka é medida na direção paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras

A forma prismática do corpo de prova, como mostram as Figuras 3.29 e 3.30, tem seção transversal medindo 5×5cm e comprimento paralelo de 15 cm, elaborados com precisão dimensional de 0,1 mm.

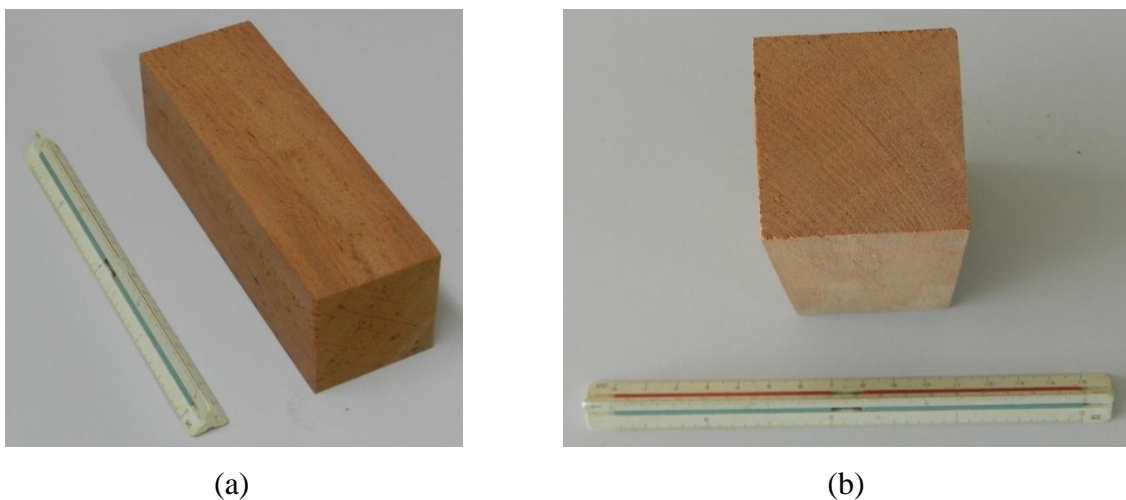
Figura 3.29 - Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.30 - Corpo de prova da madeira de Cupiúba para o ensaio de dureza Janka.

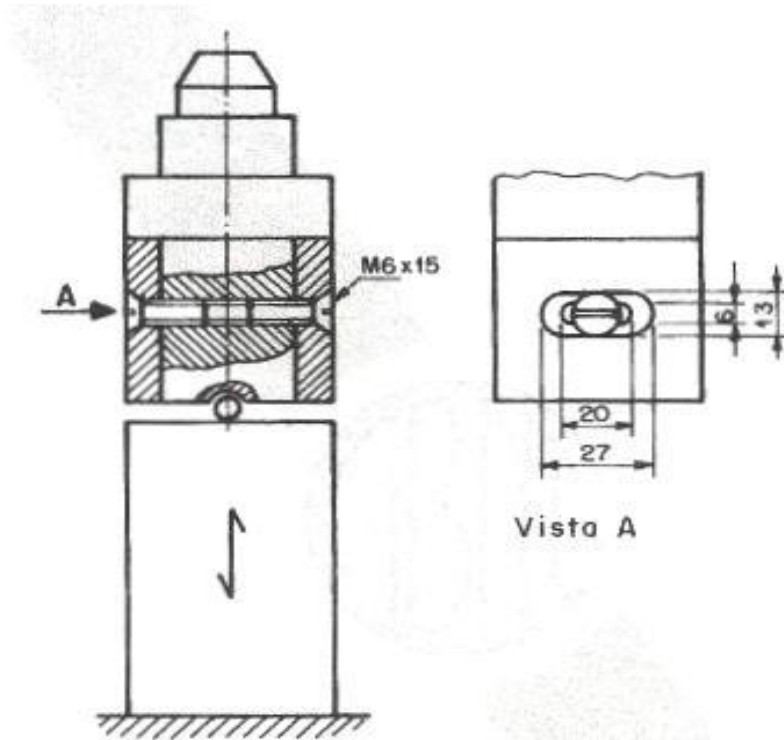
(a) Perspectiva e (b) Vista superior.



Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

O esquema do dispositivo especial utilizado para se determinar o grau de dureza Janka é proposto pela NBR 7190:1997, como mostrado na Figura 3.31.

Figura 3.31 - Detalhe esquemático do dispositivo especial para o ensaio de dureza Janka.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

As Figuras 3.32 e 3.33 apresentam os ensaios de dureza Janka na direção paralela e normal às fibras da madeira de Cupiúba, respectivamente.

Figura 3.32 - Dureza Janka da madeira de Cupiúba na direção paralela às fibras.

(a) Ensaio e (b) Resultado



(a)

(b)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

Figura 3.33 - Dureza Janka da madeira de Cupiúba na direção normal às fibras.

(a) Ensaio e (b) Resultado.



(a)

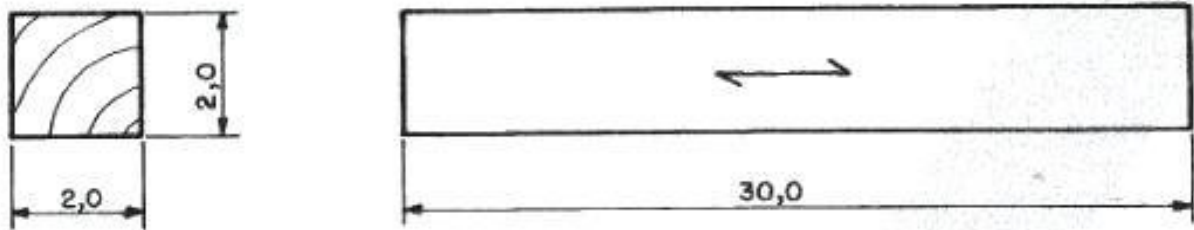
(b)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.2.9. Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão

Esse ensaio objetiva determinar a tenacidade (W) da madeira, que consiste na energia necessária para a fratura do corpo de prova ($2 \times 2 \times 30$ cm - Figura 3.34), é calculada com o uso da Equação 3.13, em que m é a massa do pêndulo, g é a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$), L é o comprimento do braço do pêndulo Charpy, que consiste na elevação máxima para o cálculo da energia potencial gravitacional, e L' é a altura final que o pêndulo atinge posteriormente ao impacto com o corpo de prova de madeira. A Figura 3.35 ilustra o esquema utilizado no cálculo da tenacidade.

Figura 3.34 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$W = m \cdot g \cdot (L - L') \text{ [N}\cdot\text{m=J]} \quad (3.13)$$

A Figuras 3.36 (a), (b) e (c) apresentam respectivamente o corpo de prova, o ensaio e a ruptura para o cálculo da tenacidade da madeira de Cupiúba.

O conhecimento da tenacidade (W) permite calcular a resistência ao impacto na flexão (f_{bw}), assim como expressa a Equação 3.14, em que b e h são as medidas da seção transversal ($20\text{mm} \times 20\text{mm}$) do corpo de prova utilizado. O conhecimento da resistência ao impacto na flexão da madeira permite uma análise da estrutura mais precisa quando a mesma é solicitada por ações dinâmicas.

$$f_{bw} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (3.14)$$

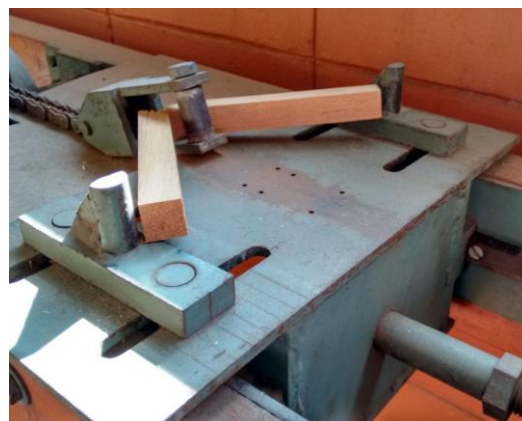
Figura 3.36 - Ensaio para a determinação da tenacidade da madeira de Cupiúba.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Imagens registradas pelo Autor.

3.3. Análise Estatística

Para avaliar a influência do fator origem de extração das madeiras de Cupiúba nas propriedades físicas e mecânicas utilizou-se a análise de variância de Kruskal-Wallis (teste não paramétrico). Para tanto, o nível de significância (α) da ANOVA considerado foi de 5%. A hipótese nula (H_0) consistiu em considerar que a propriedade da madeira de uma determinada região é equivalente (ou representa) a mesma propriedade considerando o grupo com o conjunto dos resultados das três regiões de extração, e na diferença das médias dos dois grupos (região; conjunto das regiões) como hipótese alternativa (H_1). Dessa forma, P-valor (probabilidade P) do teste superior ao nível de 5% de significância implica em assumir a equivalência das médias dos dois grupos (aceitar H_0), e da não equivalência em caso contrário ($P\text{-valor} < 0,05$).

Como forma de investigar a abrangência dos resultados da ANOVA no estudo da influência das regiões de extração das madeiras para cada propriedade investigada, utilizou-se a técnica de simulação ou de reamostragem “bootstrap”, que consiste em gerar por simulação de uma pequena amostra, numerosas outras com a retirada e reposição de alguns dos seus elementos. Para tanto, com o nível de significância admitido de 5%, a hipótese nula assumida consistiu em admitir equivalência das médias de cada propriedade proveniente de uma região isolada com mesma propriedade considerando o conjunto das três regiões, e a não equivalência dos dois grupos como hipótese alternativa. O número de simulações adotado nesta investigação foi de 10000.

P-valor simulado maior que 5%, que significa em aceitar, por extrapolação, que a média dos dois grupos é equivalente, e não equivalente para P-valor menor que 5%.

A estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba em função da densidade aparente foi avaliada com o uso de modelos de regressão de acordo com as Equações de 3.15 a 3.18, e fundamentados em análise de variância (ANOVA).

Nas Equações de 3.15 a 3.18, Y denota a variável dependente, podendo ser uma propriedade física ou mecânica, X consiste na variável independente, aqui definida como sendo a densidade aparente e a e b são os parâmetros dos modelos ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

$$Y = a + b \cdot X \quad [\text{Lin} - \text{linear}] \quad (3.15)$$

$$Y = a \cdot e^{b \cdot X} \quad [\text{Exp} - \text{exponencial}] \quad (3.16)$$

$$Y = a + b \cdot \ln(X) \quad [\text{Log - logarítmico}] \quad (3.17)$$

$$Y = a \cdot X^b \quad [\text{Geo - geométrico}] \quad (3.18)$$

Pela ANOVA dos modelos de regressão, considerados ao nível de 5% de significância (α), a hipótese nula formulada consiste na não representatividade dos modelos testados ($H_0: \beta = 0$), e na representatividade como hipótese alternativa ($H_1: \beta \neq 0$). P-valor inferior ao nível de significância considerado implica em aceitar H_0 e o modelo testado não é representativo, portanto, variações de $\rho_{ap,12\%}$ são incapazes de explicar as variações da propriedade estimada e deve ser refutado, caso contrário o modelo testado é representativo.

Além do uso da ANOVA, que permite aceitar ou não a representatividade dos modelos testados, os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram obtidos como forma de avaliar a capacidade das variações de densidade aparente em explicar a variável analisada, possibilitando eleger, dentre os modelos considerados significativos, os de melhor ajuste. Cabe ressaltar que a densidade aparente foi utilizada para estimar as 15 propriedades estudadas nesta pesquisa, sendo 3 propriedades físicas e 12 propriedades mecânicas, com o uso de 4 modelos matemáticos distintos, linear, exponencial, logarítmico e geométrico, totalizando 60 ajustes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores médios (\bar{x}), coeficientes de variação (Cv), os menores (*Mín*) e os maiores (*Máx*) valores, o intervalo de confiança da média (IC - 95% de confiabilidade) das propriedades físicas e mecânicas e os valores característicos (f_{wk}) das propriedades de resistência para as madeiras de Cupiúba provenientes dos municípios Caracará [Car] em Roraima; Bonfim [Bon] em Roraima e Cláudia [Cla] em Mato Grosso, respectivamente.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Caracará - RR.

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,84	4,04	0,77	0,90	0,82; 0,86	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	4,17	11,85	3,26	4,88	3,89; 4,44	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,30	6,91	6,19	7,93	7,03; 7,58	---
PSF (%)	20,96	16,43	15,36	27,51	19,05; 22,87	---
f_{c0} (MPa)	62,07	15,10	47,00	74,00	56,88; 67,26	49,11
f_{t0} (MPa)	72,80	21,78	50,00	103,00	64,02; 81,58	54,26
f_{i90} (MPa)	3,07	24,99	2,10	5,30	2,30; 3,83	2,21
f_{v0} (MPa)	17,60	12,67	14,00	21,00	16,37; 18,84	15,03
f_{s0} (MPa)	0,72	24,17	0,40	1,00	0,62; 0,82	0,53
f_M (MPa)	87,53	17,15	63,00	114,00	79,22; 95,85	74,07
f_{H0} (MPa)	99,80	14,55	75,00	120,00	91,22; 107,84	79,93
f_{H90} (MPa)	68,70	10,34	57,10	80,00	64,17; 71,94	59,18
W (N·m)	9,12	26,23	6,03	14,67	7,79; 10,44	---
E_{c0} (MPa)	15976	10,56	13371	19036	15042; 16910	---
E_{t0} (MPa)	14561	15,77	10958	19487	13290; 15833	---
E_M (MPa)	15060	13,90	11603	19344	13901; 16220	---

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Bonfim - RR.

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
ρ_{12} (g/cm ³)	0,81	3,55	0,78	0,87	0,79; 0,83	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	3,77	6,02	3,33	4,20	3,62; 3,92	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,57	9,15	6,76	8,71	7,11; 8,04	---
PSF (%)	20,86	23,28	15,44	29,98	17,58; 24,13	---
f _{c0} (MPa)	47,73	25,59	35,00	71,00	39,52; 55,93	33,20
f _{t0} (MPa)	60,09	36,85	38,00	99,00	45,22; 74,97	38,63
f _{t90} (MPa)	3,33	27,05	2,30	5,00	2,72; 3,93	2,64
f _{v0} (MPa)	16,18	18,50	11,00	21,00	14,17; 18,19	12,65
f _{s0} (MPa)	0,61	26,38	0,30	0,90	0,47; 0,74	0,39
f _M (MPa)	65,64	25,44	45,00	102,00	54,42; 76,85	46,90
f _{H0} (MPa)	78,18	17,14	65,00	106,00	69,18; 87,18	68,20
f _{H90} (MPa)	54,99	15,42	47,30	71,60	49,29; 60,69	52,42
W (N·m)	9,59	43,26	4,98	18,20	6,80; 12,38	---
E _{c0} (MPa)	12061	23,19	8564	18642	10182; 13940	---
E _{t0} (MPa)	12180	26,23	8976	18383	10034; 14326	---
E _M (MPa)	11773	25,58	8589	19353	9750; 13797	---

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

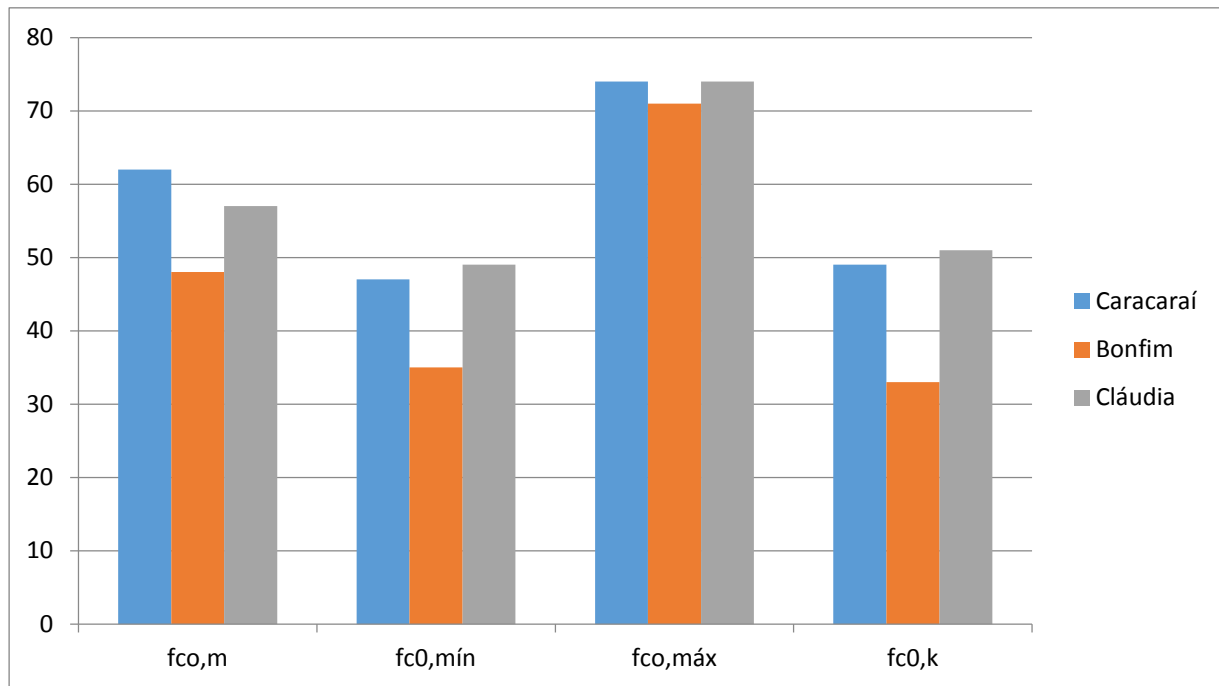
Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba proveniente do município de Cláudia - MT.

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
ρ_{12} (g/cm ³)	0,84	2,77	0,81	0,88	0,83; 0,86	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	4,59	9,61	3,86	5,32	4,31; 4,87	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,57	6,93	6,78	8,53	7,24; 7,91	---
PSF (%)	21,33	11,87	17,64	25,04	19,72; 22,91	---
f _{c0} (MPa)	57,42	13,84	49,00	74,00	52,37; 62,47	51,04
f _{t0} (MPa)	70,58	19,41	49,00	90,00	61,88; 79,29	50,06
f _{t90} (MPa)	3,60	24,12	2,40	5,10	3,05; 4,16	2,65
f _{v0} (MPa)	16,83	18,76	10,00	21,00	14,82; 18,84	13,20
f _{s0} (MPa)	0,71	23,67	0,50	1,00	0,60; 0,81	0,48
f _M (MPa)	75,00	15,15	60,00	93,00	67,78; 82,22	60,00
f _{H0} (MPa)	89,00	15,52	69,00	117,00	87,44; 106,56	77,00
f _{H90} (MPa)	70,58	16,64	54,00	82,00	59,54; 73,62	58,74
W (N·m)	8,56	25,71	3,20	10,20	6,35; 9,18	---
E _{c0} (MPa)	12970	15,35	9964	16162	11704; 14235	---
E _{t0} (MPa)	12767	26,30	7843	18275	10634; 14900	---
E _M (MPa)	13217	14,75	10010	16777	11978; 14456	---

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

Os gráficos 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam para algumas das propriedades mecânicas mais significativas, um comparativo entre as madeiras utilizadas neste estudo e provenientes das três diferentes regiões.

Gráfico 4.1 – Comparativo das resistências na compressão paralela às fibras das três regiões.

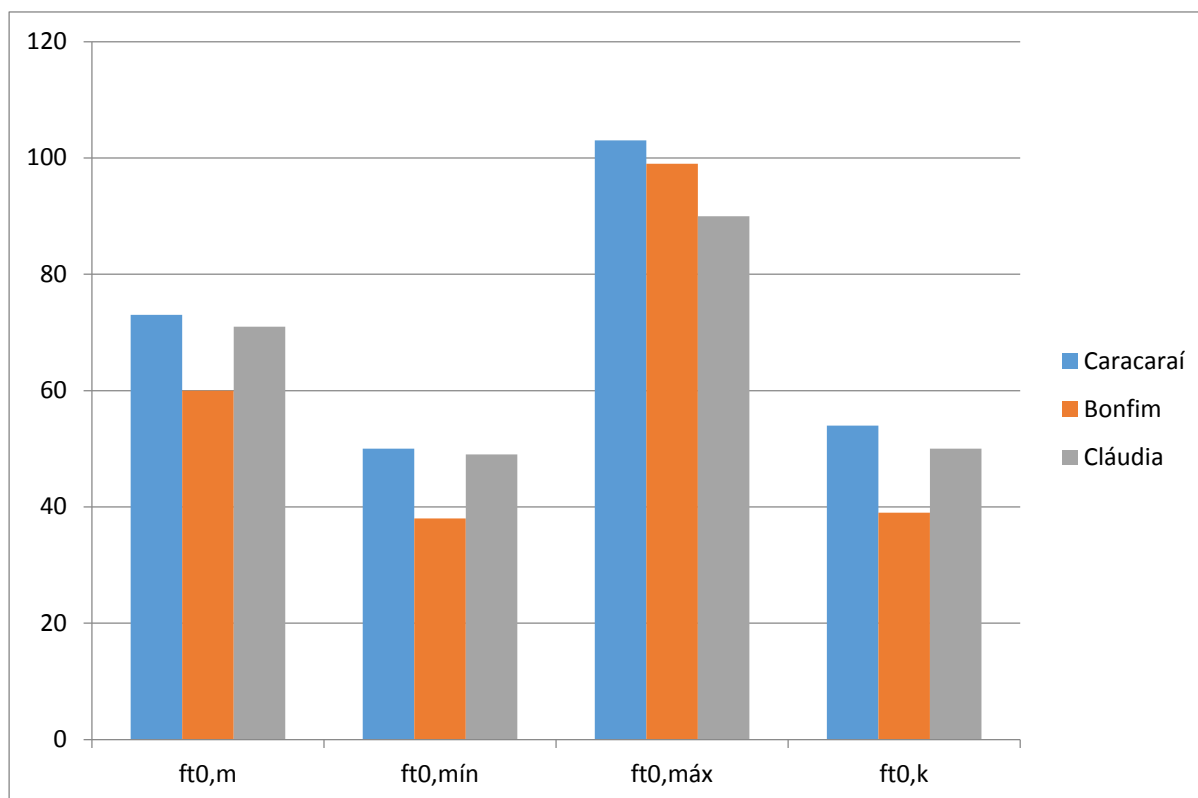


Fonte: Gráfico elaborado pelo Autor

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1990) não faz menção à procedência da espécie da madeira na consideração de suas propriedades físicas e mecânicas, este fato não impede que estas diferenças existam e possam ser consideráveis, no Gráfico 4.1 fica evidente que a resistência característica na compressão paralela às fibras, das madeiras provenientes de cada uma das regiões estudadas, Caracará, Bonfim e Cláudia, se enquadram em classes de resistência diferentes, respectivamente C40, C30 e C50, valores acima ao estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) que classifica esta espécie na classe de resistência C30, independente da região de onde a madeira é extraída.

Quanto aos valores médios para a resistência na compressão paralela às fibras os resultados obtidos para as amostras provenientes de Caracará e Cláudia são superiores ao apresentado pela norma brasileira NBR 7190 (1990), que é de 54,4 MPa, enquanto para as amostras provenientes de Bonfim resultou valor inferior.

Gráfico 4.2 – Comparativo das resistências na tração paralela às fibras das três regiões.

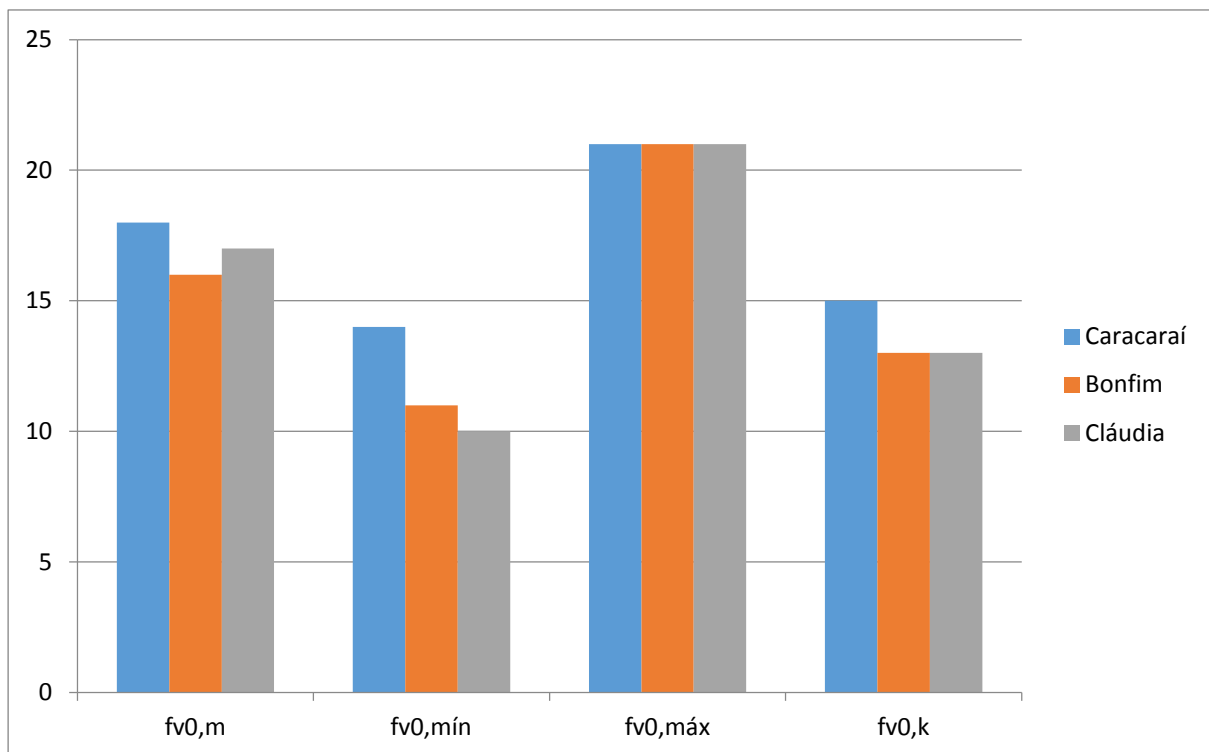


Fonte: Gráfico elaborado pelo Autor

Observa-se pelo Gráfico 4.2 que as amostras provenientes das regiões Caracaráí e Cláudia apresentaram valores mais homogêneos, com valores próximos de 50 MPa de resistência característica na tração paralela às fibras, enquanto as amostras das madeiras provenientes da região Bonfim resultou em valor próximo de 40 MPa, portanto inferior.

Comparando valores médios da resistência na tração paralela às fibras, os resultados encontrados para as amostras das regiões Caracaráí e Cláudia apresentaram valores médios próximos de 70 MPa e Bonfim de 60 MPa, próximos ao valor apresentado pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1990) de 62,1 MPa.

Gráfico 4.3 – Comparativo das resistências no cisalhamento paralelo às fibras das três regiões.

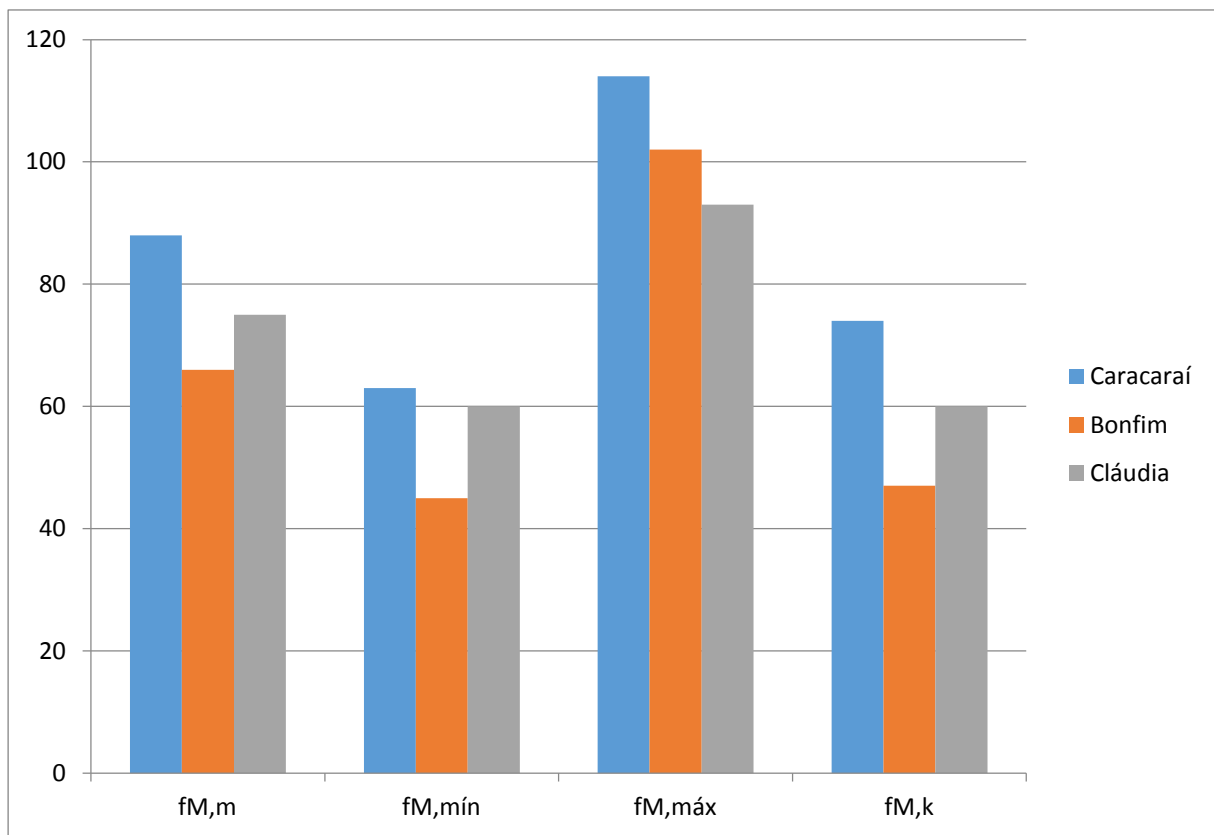


Fonte: Gráfico elaborado pelo Autor

Observa-se pelo Gráfico 4.3 que a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras que as amostras das madeiras provenientes da região Caracaraí apresentam maior resistência, $f_{v0k} = 15 \text{ MPa}$ aproximadamente, enquanto as madeiras das regiões de Bonfim e Cláudia apresentam menor resistência $f_{v0k} = 13 \text{ MPa}$ aproximadamente. Para esta propriedade as resistências são muito próximas.

Com relação às resistências médias os valores determinados para as amostras das regiões de Caracaraí, Bonfim e Cláudia foram respectivamente 18 MPa, 16 MPa e 17 MPa, todos acima do valor médio apresentado pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1990) que é de 10 MPa.

Gráfico 4.4 – Comparativo das resistências na flexão estática das três regiões.



Fonte: Gráfico elaborado pelo Autor

Observa-se pelo Gráfico 4.4 que a resistência característica na flexão estática que as amostras das madeiras provenientes das regiões Caracaraí e Cláudia apresentaram maiores resistências, $f_{M,k} = 74 \text{ MPa}$ e $f_{M,k} = 60 \text{ MPa}$, respectivamente, enquanto as amostras das madeiras provenientes da região de Bonfim apresentaram menores resistências, $f_{M,k} = 47 \text{ MPa}$.

A norma brasileira ABNT NBR 7190(1997) estabelece valores limites para o coeficiente de variação (C_v) para que a caracterização seja qualificada como adequada, sendo de 18% para as resistências a esforços normais e 28% para esforços tangenciais. Destaca-se que boa parte das propriedades atenderam aos requisitos exigidos pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

As madeiras de Cupiúba podem ser consideradas como pesadas ($\rho_{12}=0,830 \text{ g/cm}^3$), pois Melo et al. (1990) classificaram a madeira de *Calycophyllum multiflorum*, com densidade $0,770 \text{ g/cm}^3$, como sendo uma madeira pesada e portanto de aplicação nas estruturas de construção civil de médio e grande portes.

Cabe destacar que a retração radial ($\epsilon_{r,2}$) da madeira de Cupiúba é menor do que a retração tangencial ($\epsilon_{r,3}$), resultados que estão de acordo com afirmações feitas por alguns autores tais como Dias e Lahr (2004), Del Menezzi (2006) e Melo et al. (2010).

Com relação as classes de resistência, nota-se uma diferença de região para região. A madeira de Cupiúba proveniente do município de Caracaraí (RR) pertence à classe de resistência C40, sendo C30 a classe de resistência dessa madeira para a região de Bonfim (RR), e C50 a classe de resistência para a região de Cláudia (MT), conforme discutido no Gráfico 4.1.

O valor obtido da resistência na compressão paralela às fibras da madeira de Cupiúba encontrados nessa pesquisa é próximo ao valor obtido para as madeiras de Amescla-Aroeira (59,03 MPa) apresentadas no trabalho desenvolvido por Logsdon et al. (2005), que concluem sobre a possibilidade da utilização da madeira de Amescla-Aroeira em estruturas de médio a grande porte, que pode ser estendida para as madeiras de Cupiúba.

Os resultados das propriedades físicas (ρ_{ap} , $\epsilon_{r,2}$, $\epsilon_{r,3}$) e mecânicas (f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} , f_{v0} , f_{s0} , f_M , E_{c0} , E_{t0} , E_M , f_{H0} , f_{H90} , W) do trabalho de Dias e Lahr (2004) [Tabela 2.2], que também caracterizaram a madeira de Cupiúba, foram próximos dos resultados das madeiras de Cupiúba da presente pesquisa, o mesmo ocorreu com os resultados de propriedades dessa espécie de madeira divulgados nos trabalhos de Oliveira e Sales (2002), Faria et al. (2008), Nicolas, Mascia e Todeschini (2008) e do Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (2013).

A Tabela 4.4 apresenta os resultados (P-valores) da ANOVA de Kruskal-Wallis determinados com a utilização do programa BioEstat 5.3, para cada propriedade e confrontando uma região com o conjunto de resultados das três regiões {Car, Bon, Cla}, encontrando-se sublinhados os (P-valores) considerados significativos (P-valor<0,05).

Tabela 4.4 - Resultados dos (P-valores) da ANOVA de Kruskal-Wallis.

Prop.	Car×{Car, Bon, Cla}	Bon×{Car, Bon, Cla}	Cla×{Car, Bon, Cla}
ρ_{12}	0,4868	<u>0,0275</u>	0,1960
$\varepsilon_{r,2}$	0,9606	<u>0,0131</u>	<u>0,0217</u>
$\varepsilon_{r,3}$	0,4528	0,7372	0,5855
PSF	0,9606	0,6063	0,6659
f_{c0}	0,0986	<u>0,0213</u>	0,7760
f_{t0}	0,4066	0,1571	0,6991
f_{t90}	0,4827	0,9904	0,4129
f_{v0}	0,5048	0,4194	0,823
f_{s0}	0,5077	0,2594	0,7554
f_M	0,0527	<u>0,0403</u>	0,7761
f_{H0}	0,1696	<u>0,0122</u>	0,4262
f_{H90}	0,1437	<u>0,0087</u>	0,4196
W	0,6425	0,7920	0,4330
E_{c0}	<u>0,0094</u>	<u>0,0480</u>	0,2655
E_{t0}	0,1638	0,2549	0,6012
E_M	0,0517	<u>0,0319</u>	0,8380

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

Os resultados da Tabela 4.4 indicam que as regiões de Caracaraí e de Cláudia, analisadas separadamente, forneceram resultados das propriedades com 94% de equivalência ao conjunto com as propriedades da madeira de Cupiúba das três regiões, o mesmo não ocorreu com a madeira de Bonfim, em que 50% das propriedades não apresentaram equivalência com o conjunto envolvendo os três lotes.

A não equivalência de 50% para as amostras de Bonfim pode ser considerável, e neste caso seria prudente enquadrá-las como não equivalente, e desta forma a região de extração teve influência no resultado das propriedades.

A Tabela 4.5 apresenta os (P-valores) da ANOVA, determinados com a utilização do programa BioEstat 5.3, dos resultados extrapolados pela técnica de simulação ou de reamostragem bootstrap de cada propriedade confrontando-se uma região com o conjunto de resultados das três regiões {Car, Bon, Cla}.

Tabela 4.5 - Resultados (P-valores) da ANOVA, extrapolação pela técnica de bootstrap.

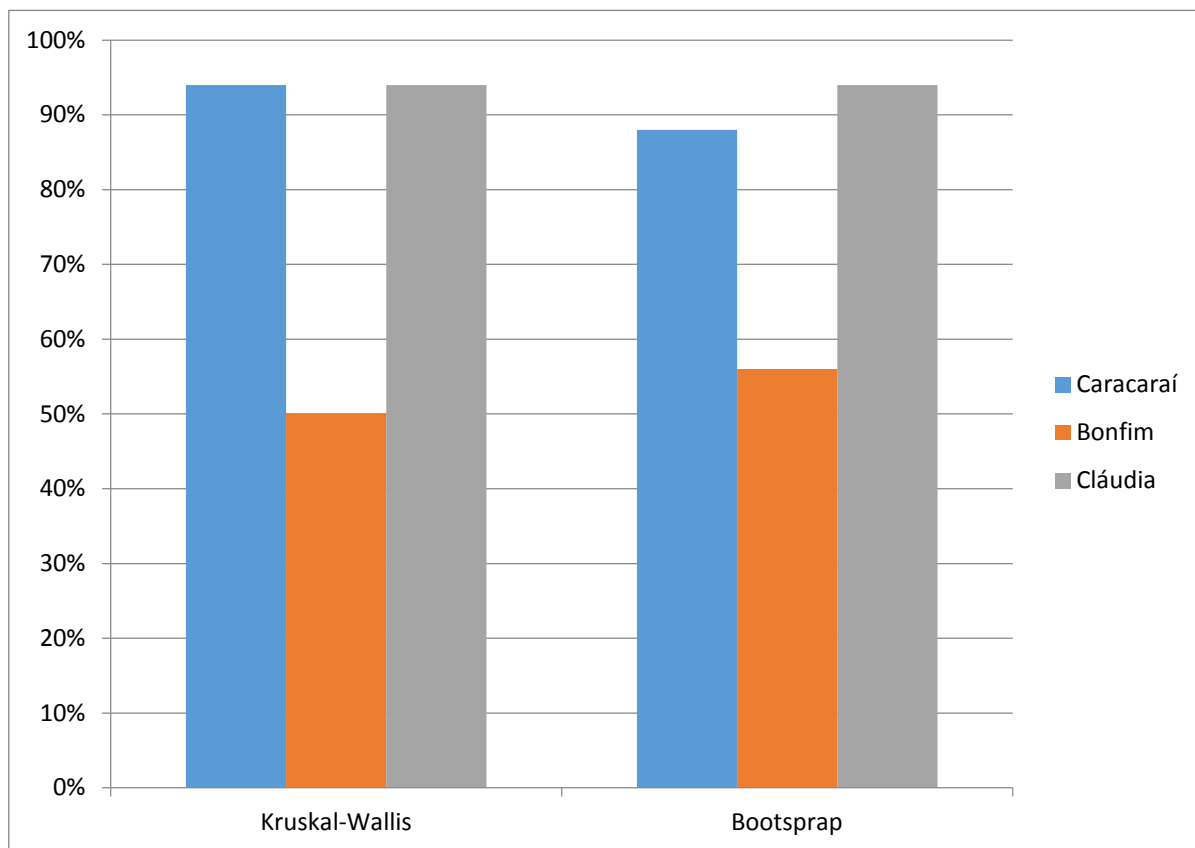
Prop.	Car×{Car, Bon, Cla}	Bon×{Car, Bon, Cla}	Cla×{Car, Bon, Cla}
ρ_{12}	0,4993	<u>0,0302</u>	0,1803
$\varepsilon_{r,2}$	0,0986	<u>0,0130</u>	<u>0,0188</u>
$\varepsilon_{r,3}$	0,3266	0,4001	0,4516
PSF	0,0603	0,1180	0,2104
f_{c0}	0,0977	<u>0,0299</u>	0,2221
f_{t0}	0,3998	0,2046	0,2923
f_{t90}	0,4939	<u>0,0300</u>	0,3915
f_{v0}	0,4149	0,1781	0,4242
f_{s0}	0,4889	0,2303	0,3210
f_M	<u>0,0486</u>	<u>0,0475</u>	0,3344
f_{H0}	0,1480	<u>0,0117</u>	0,4276
f_{H90}	0,1504	<u>0,0127</u>	0,4264
W	0,2715	0,4912	0,2502
E_{c0}	<u>0,0083</u>	0,0534	0,2790
E_{t0}	0,1453	0,2802	0,3990
E_M	0,0517	0,0677	0,2949

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

Os resultados da ANOVA mostrados na Tabela 4.5 indicam que as regiões de Caracaraí-RR e de Cláudia-MT, analisadas separadamente, continuaram fornecendo bons resultados para as propriedades, com 88% e 94% de equivalência ao conjunto com as propriedades da madeira de Cupiúba das três regiões, respectivamente, no entanto, o mesmo não ocorreu com as madeiras da região de Bonfim-RR, pois continuam a fornecer resultados das propriedades com apenas 56% de equivalência com o conjunto envolvendo os três lotes. Observa-se que o ajuste pela técnica bootstrap não melhorou de forma significativa a condição de equivalência, pois aumentou de 50% para 56%.

O Gráfico 4.5 reúne os resultados dos (P-valores) equivalentes obtidos por Kruskal-Wallis e pela extrapolação usando a técnica Bootstrap.

Gráfico 4.5 – (P-valores) equivalentes por Kruskal-Wallis e por extrapolação Bootstrap.



Fonte: Gráfico elaborado pelo Autor

Sendo assim pode-se concluir para as três regiões deste estudo em particular, que a representatividade do lote de madeiras é dependente da região ou do local de extração, resultado esse que é desfavorável à consideração da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1977) que não faz menção a possíveis diferenças nos valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira em função da sua origem. Tais resultados são diferentes dos obtidos da pesquisa de Rocco et al. (2016) com relação a influência das mesmas regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Jatobá.

A Tabela 4.6 apresenta os melhores modelos obtidos por propriedade considerando os quatro tipos de ajustes utilizados nessa pesquisa para o conjunto das três regiões (grupo único), sendo a e b os coeficientes ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados (modelos a dois parâmetros), R^2 é o coeficiente de determinação (mede a qualidade do ajuste) e o P-valor é a probabilidade P que permite julgar a representatividade (P-valor<0,05) ou a não representatividade (P-valor>0,05) dos modelos testados. Cabe destacar que os modelos ajustados são estimados pela densidade aparente, cujo intervalo de valores é 0,78 a 0,88 g/cm³.

Tabela 4.6 - Resultados dos (P-valores) da ANOVA dos modelos de regressão.

Prop.	Modelo	P-valor	a	b	Expressão	R² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	Exponencial	0,000	0,19	3,7	$\varepsilon_{r,2} = a. e^{b \cdot \rho_{ap,12\%}}$	87,22
$\varepsilon_{r,3}$	Linear	0,000	-5,1	15,0	$\varepsilon_{r,3} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	75,60
PSF	Geométrico	0,000	38,8	3,5	$PSF = a. (\rho_{ap,12\%})^b$	72,88
f_{c0}	Linear	0,000	-203,5	311,2	$f_{c0} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	79,73
f_{t0}	Geométrico	0,000	202,3	6,2	$f_{t0} = a. (\rho_{ap,12\%})^b$	84,24
f_{t90}	Linear	0,000	-19,0	26,7	$f_{t90} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	64,82
f_{v0}	Linear	0,000	-42,1	70,6	$f_{v0} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	69,57
f_{s0}	Logarítmico	0,000	1,4	4,1	$f_{s0} = a + b. \ln(\rho_{ap,12\%})$	78,23
f_M	Exponencial	0,000	0,63	5,7	$f_M = a. e^{b \cdot \rho_{ap,12\%}}$	73,97
f_{H0}	Geométrico	0,000	208,9	4,6	$f_{H0} = a. (\rho_{ap,12\%})^b$	87,96
f_{H90}	Linear	0,000	-181,3	293,6	$f_{H90} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	81,55
W	Linear	0,000	-46,8	66,3	$W = a + b. \rho_{ap,12\%}$	75,82
E_{c0}	Linear	0,000	-44521	69837	$E_{c0} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	75,69
E_{t0}	Linear	0,000	-51921	77974	$E_{t0} = a + b. \rho_{ap,12\%}$	76,65
E_M	Linear	0,000	-40547	64565	$E_M = a + b. \rho_{ap,12\%}$	74,62

Fonte: Resultados encontrados e tabelados pelo Autor.

Os modelos de regressão foram todos considerados significativos pela ANOVA (P -valor $<0,05$), e os ajustes resultaram em boas aproximações por exibirem coeficiente de determinação R^2 em torno de 70%, o que indica a possibilidade da estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira em função da densidade aparente. Esse resultado permite ao projetista, conhecido o valor da densidade da madeira a ser utilizada no projeto, realizar um pré-dimensionamento mais preciso e de maior confiabilidade.

Almeida et al. (2016a) testaram modelos de regressão utilizando-se da densidade aparente como variável independente e encontraram bons ajustes na estimativa da resistência na compressão paralela às fibras das madeiras de Canafístula e Castelo. Lahr et al. (2016a) encontraram relações significativas da estimativa da resistência na compressão paralela às fibras e na dureza normal e perpendicular às fibras em função da densidade aparente para a madeira de *Vatairea sp*, entretanto, o que não foi encontrado no trabalho de Lahr et al. (2016b) com relação a estimativa de propriedades de resistência e de rigidez da madeira de *Erismia uncinatum Warm*. Outros exemplos que evidenciam o comportamento variado (modelo representativo ou não) do uso da densidade como estimador de propriedades físicas e mecânicas da madeira podem ser notados nos trabalhos de Almeida et al. (2014) e Christoforo et al. (2014), que encontraram resultados favoráveis na estimativa da tenacidade da madeira em função da densidade aparente, o que não ocorreu com os trabalhos de Almeida et al. (2016a), Cavalheiro et al. (2016) e Christoforo et al. (2016).

A análise dos resultados das várias pesquisas aponta para a necessidade de outras pesquisas na temática e com resultados amostrais mais amplos, como número maior de corpos de prova, de espécies de madeira e de regiões de extração, para que se possam ter resultados mais contundentes.

5. CONCLUSÕES

As amostras da espécie Cupiúba extraídas das regiões Caracarái-RR, Bonfim-RR e Cláudia-MT desta pesquisa tiveram suas propriedades físicas e mecânicas determinadas e algumas delas apresentaram divergências significativas, e portanto, neste caso específico a região de extração teve influência. Nesta pesquisa as madeiras de Cupiúba para as três regiões estudadas apresentou classes de resistência C30, C40 e C50, portanto, superiores ao valor de referência apresentado pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1990) Projeto de Estruturas de Madeira.

Os resultados da análise de variância evidenciaram a probabilidade de 50% das propriedades da região de Bonfim-RR não serem equivalentes entre o conjunto das três regiões pesquisadas, e mesmo utilizando a técnica da simulação ou reamostragem bootstrap o resultado ainda apresentou 44% das propriedades não equivalentes, ou seja, uma quantidade considerável de valores inferior ao grau de confiabilidade de 5% estabelecido. Para as outras duas outras regiões, Caracarái-RR e Cláudia-MT os resultados apresentaram 88% e 94% de equivalência respectivamente.

Os modelos de regressão utilizados nesta pesquisa apresentaram coeficientes de determinação da ordem de 70%, evidenciando a possibilidade de utilização da densidade aparente como estimador de propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cupiúba.

Importante registrar que todo o estudo se baseou em lotes de amostras das madeiras depositadas no pátio do LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo pela empresa fornecedora, e para todos os procedimentos utilizados, desde a extração das toras de madeira na floresta, seu beneficiamento em peças estruturais e a estocagem inicial na serraria de origem, a escolha das peças que formaram os lotes e o transporte da região de extração até o pátio do LaMEM não existem registros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, D. H.; Ferro, F. S.; Icimoto, F. H.; Takeshita, S.; Modes, K. S.; Almeida, T. H.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis** (IPEF), v. 44, p. 1-5, 2016b.

Almeida, D. H.; Scaliante, R. M.; Christoforo, A. L.; Varanda, L. D.; Rocco, F. A. L.; Dias, A. A.; Calil Jr., C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore** (Impresso), v. 38, p. 203-207, 2014.

Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Chahud, E.; Branco, L. A. M. N.; Lahr, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 67-71, 2016a.

Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Chahud, E.; Branco, L. A. M. N.; Lahr, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 67-71, 2016.

Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Marcolin, L. A.; Goncalves, D.; Christoforo, A. L.; Rocco, F. A. L. Correlation between Dry Density and Volumetric Shrinkage Coefficient of Three Brazilian Tropical Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 5, p. 50-63, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro. **Cupiúba**. Disponível em: <<http://sistemas.florestal.gov.br/madeirasdobrasil/features.php?>>

Cavalheiro, R. S.; Almeida, D. H.; Almeida, T. H.; Araujo, V. A.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. Mechanical Properties of Paricá Wood Using Structural Members and Clear Specimens. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 56-59, 2016.

Cavalheiro, R. S.; Almeida, D. H.; Almeida, T. H.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 107-112, 2016.

Christoforo, A. L.; Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Santos, J. C.; Panzera, T. H.; Lahr, F. A. R. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 23-27, 2016.

Christoforo, A. L.; Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Santos, J. C.; Panzera, T. H.; Lahr, F. A. R. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 23-27, 2016.

Christoforo, A. L.; Silva, S. A. M.; Panzera, T. H.; Rocco, F. A. L. Estimative of Wooden Toughness by the Apparent Density and Bending Strength. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, p. 49-55, 2014.

CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M.; PANZERA, T. H.; ROCCO, F. A. L. Estimative of Wooden Toughness by the Apparent Density and Bending Strength. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, p. 49-55, 2014.

Del Menezzi, C. H. S. Instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos: causas, consequências e prevenção. Brasília: UNB, **Comunicações Técnicas Florestais**, v.8, n.2, 37 p., 2006.

Dias, F. M.; Lahr, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis** (IPEF), v. 65, p. 102-113, 2004.

Faria, O. B.; Lahr, F. A. R.; Barros Jr., O.; Chahud, E. Influência da umidade no módulo de elasticidade longitudinal da madeira. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos (SP), v. 9, n. 22, p. 57-69, 2008.

Gurgel, E. S.; Gomes, J. I.; Groppo, M.; Margalho, L. **Conhecendo Espécie de Plantas da Amazônia: Cupiúba (*Goupia Glabra Aubl.* – *Goupiaceae*)**. Comunicado Técnico 262, Belém, PA. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, março, 2015.

Hellmeister, J. C. Madeiras e suas características. In.: Encontro Brasileiro em Madeiras em Estruturas de Madeira, I, São Carlos, 1983. São Carlos. **Anais**, São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1983.

Hirai, E. H.; Carvalho, J. O. P. De; Pinheiro, K. A. O. Comportamento populacional de Cupiúba (*Goupia glabra aubl.*) em floresta de terra firme na fazenda rio capim, Paragominas (PA). **Revista de Ciências Agrárias**, n. 47, p. 89-101, 2007.

Humphreys, R. D.; Chimelo, J. P. Comparação entre propriedades físicas, mecânicas e estereológicas para o agrupamento de madeiras. In: Congresso Nacional sobre Essências Nativas, 2, São Paulo. **Anais**, São Paulo, p. 480-490, 1992.

Icimoto, F. H.; Ferro, F. S.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L. ; Rocco, F. A. L. Influence of Specimen Orientation on Determination of Elasticity in Static Bending. **Maderas. Ciencia y Tecnología** (Impresa), v. 17, p. 229-238, 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), portal de consultas http://www.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acessado em 08/12/2016 às 8:00 horas.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). **Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil**. Publicação IPT; 4371, 104 p., ISBN: 978-85-09-00175-9, 2013.

Lahr, F. A. R.; Aftimus, B. H. C.; Arroyo, F. N.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Chahud, E.; Branco, L. A. M. N. Full Characterization of *Vatairea* sp Wood Specie, **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 92-96, 2016a.

Logsdon, N. B.; Finger, Z.; Estevão, J. G. Descrição Dendrológica e caracterização físico-mecânica da madeira de Amescla-aroeira, *Protium heptaphyllum* (Aubl) March. (Burseraceae), **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, 2005.

Loureiro, A.; Silva, M. F.; Alencar, J. C. *Essências madeireiras da Amazônia*. Manaus: INPA, 1979. v. 1, p. 142-145.

Melo, J. E.; Coradin, V. T. R.; Mendes, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. Silvicultura. **Anais do Congresso Florestal Brasileiro**, v. 12, n. 42, p. 695-699, São Paulo, 1992.

Melo, R. R.; Stangerlin, D. M.; Del Menezzi, C. H. S.; Gatto, D. A.; Calegari, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, **Revista Brasileira de Ciência Agrária**. Recife, v.5, n.1, p.67-73, 2010.

Nicolas, E. A.; Mascia, N. T.; Todeschini, R. Comparação entre o critério de resistência de Tsai-Wu e a fórmula de Hankinson na tração da madeira. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos (SP), v. 9, n. 23, p. 13-29, 2008.

Oliveira, F. G. R.; Sales, M. Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultrassom. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos (SP), v. 3, n. 8, p. 1-25, 2002.

Oliveira, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Tese (Doutorado). Departamento de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

PROMAP - Produtos de Madeiras do Pará Ltda, Estrada do Outeiro, nº 2275, Icoaraci, Bélem-PA. <http://www.promapmadeiras.com.br/cupiuba.htm>. Acessado em 18/08/2016 às 14:00 horas.

Rocco, F. A. L.; Christoforo, A. L.; Silva, C. E. G.; Andrade Jr., J. R.; Pinheiro, R. V. Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa Hayne*) com diferentes teores de umidade e extraídas de regiões distintas. **Revista Árvore** (Online), v. 40, p. 147-154, 2016.

Shimoyama, V. R.; Barrichelo, L. E. G. Influência das características anatômica e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: Congresso Anual de Celulose e Papel, 24, São Paulo. **Anais**, São Paulo: ABTCP, 1991.

Souza, M. H. **Incentivo ao uso de novas madeiras para a fabricação de móveis**. IBAMA, Brasília, 70p, 1997.

Tonini, H.; Oliveira Jr., M. M C.; Schwengber, D. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 2, p. 151-158, 2008.

Zangiacomo, A. L.; Christoforo, A. L.; Rocco, F. A. L. Elasticity moduli in round wooden beams of *Pinus caribaea*. **Engenharia Agrícola (Online)**, v. 36, p. 566-570, 2016.