

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

**ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS EM DIFERENTES REGIÕES DE EXTRAÇÃO DA
MADEIRA DE CAMBARÁ (*Erisma uncinatum* Warm.)**

Vinicius Borges de Moura Aquino

São Carlos
2019

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

ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E
MECÂNICAS EM DIFERENTES REGIÕES DE EXTRAÇÃO DA
MADEIRA DE CAMBARÁ (*Erisma uncinatum* Warm.)

Vinicius Borges de Moura Aquino

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: André Luis Christoforo

São Carlos
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO



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 Vinicius Borges de Moura Aquino, realizada em 15/03/2019.

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Julio Cesar Molina
UNESP

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia a meu querido irmão Igor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, ao Messias Meishu-Sama e aos meus antepassados e ancestrais pela permissão de vir a São Carlos concretizar um sonho e pela proteção e purificações passadas nesta bela cidade.

Aos meus pais, Blair e Bernardina, e meus irmãos, Iure e Tatiana, pelo carinho e apoio devotados. Profunda gratidão por possibilitarem concretizar este sonho.

Ao sensei André Luis Christoforo pela atenção, pelo carinho e pela amizade. Uma pessoa ímpar que conheci nesta jornada acadêmica e um grande amigo para a vida toda.

Ao dai sensei Francisco Antonio Rocco Lahr, pelos inestimáveis préstimos envidados para a realização deste trabalho e pelos conhecimentos ministrados do alto de uma experiência única em madeiras e afins.

Agradeço aos docentes Fernando Menezes de Almeida Filho e Julio Cesar Molina pelas relevantes e profícuas contribuições a esta pesquisa.

Aos profissionais e técnicos do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Aos amigos João Paulo e Natalia, parceiros de primeira viagem em São Carlos nessa empreitada.

Aos irmãos da República Vegas e agregados, em Barra do Garças-MT pelo apoio e carinho na vinda à São Carlos.

A todos que, de alguma forma, propiciaram meu aprimoramento espiritual, material e acadêmico.

RESUMO

AQUINO, Vinicius Borges de Moura. **Relações entre Propriedades Físicas e Mecânicas em Diferentes Regiões de Extração da Madeira de Cambará (*Erisma uncinatum* Warm.)** 2019. 68 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

Esta pesquisa teve a finalidade de avaliar de relação existente entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará extraída de três locais distintos: Vera, Mucajaí e sul de Rondônia. Também será avaliado a possibilidade de se estimar (modelos de regressão linear, exponencial, geométrico e logarítmico) as propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente. Tal pesquisa foi motivada por não haver no dispositivo normativo nenhuma consideração acerca da influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras, uma vez que diferentes condições climáticas, vegetação e solo na qual a árvore medra podem influenciar seu crescimento e, por consequência, os valores de suas propriedades. Considerou-se na realização dos procedimentos a ABNT NBR 7190, a análise de variância de Kruskal-Wallis e a técnica de amostragem. Os resultados da ANOVA indicaram índice de equivalência igual a 100% para as propriedades da região de Vera, 94% para as regiões de Mucajaí e Sul de Rondônia. A técnica de amostragem levou a resultados semelhantes para as regiões de Vera e Mucajaí e para a região Sul de Rondônia, o índice de equivalência foi igual a 89%. Os resultados da ANOVA para estimativa de propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente indicaram que não foi possível fazer tais estimativas para a madeira de Cambará.

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

ABSTRACT

AQUINO, Vinicius Borges de Moura. **Relations Between Physical and Mechanical Properties on Different Harvest Regions of Cambará (*Erisma uncinatum* Warm. Wood Specie.** 2019. 68 f. Dissertation (Master on Civil Construction) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2018.

This research had the purpose of evaluating the relationship between the physical and mechanical properties of Cambará wood extracted from three distinct sites: Vera, Mucajaí and south of Rondônia. The possibility of estimating (linear regression, exponential, geometric and logarithmic models) the physical and mechanical properties as a function of apparent density will also be evaluated. This research was motivated by the fact that there is no consideration in the normative code the influence of the extraction regions on the physical and mechanical properties of timber, since different climatic conditions, vegetation and soil in which the tree can influence their growth and, consequently, the values of its physical and mechanical properties. The ABNT NBR 7190, the Kruskal-Wallis variance analysis and the resampling technique were considered in the accomplishment of the procedures. The results of ANOVA indicated an equivalence index equal to 100% for the properties of the Vera region, 94% for the regions of Mucajaí and South of Rondônia. The resampling technique led to similar results for the Vera and Mucajaí regions and for the southern region of Rondônia, the equivalence index was equal to 89%. The results of the ANOVA to estimate the physical and mechanical properties in function of the apparent density indicated that it was not possible to make such estimates for Cambará wood.

Keywords: Cambará wood, Physical and Mechanical Properties, Analysis of Variance (ANOVA), Compression Strength, Apparent Density.

Figura 1.1 - Residência estadunidense feita com Madeira Serrada	12
Figura 1.2 - Estrutura em Madeira Lamelada Colada (MLC).....	13
Figura 1.3 - Painel de Madeira Lamelada Cruzada (CLT).....	14
Figura 1.4 - Edifício multipavimento executado em CLT	15
Figura 1.5 - Visão geral das regiões de extração das amostras da madeira de Cambará nos estados de Mato Grosso, Roraima e Rondônia.....	18
Figura 1.6 - Destaque da localização das regiões de extração da madeira de Cambará: (a) Mato Grosso e (b) Roraima.....	18
Figura 2.1 - Madeira de Cambará: (a) árvore e (b) casca e face.....	20
Figura 3.1 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela	33
Figura 3.2 - Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.....	34
Figura 3.3 - Imagem do corpo de prova com os relógios - Compressão paralela	34
Figura 3.4 - Foto do Corpo de prova com os relógios na prensa - Compressão paralela	35
Figura 3.5 - Máquina de ensaio com o corpo de prova durante o ensaio - Compressão paralela	35
Figura 3.6 - Diagrama tensão x deformação específica para a determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.....	36
Figura 3.7 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão normal às fibras	37
Figura 3.8 - Corpo de prova à compressão normal na prensa (a) Instrumentado (b) Antes da Ruptura	38
Figura 3.9 – Corpo de prova alongado de seção retangular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros) (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral	38
Figura 3.10 – Corpo de prova alongado de seção circular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros).	39
Figura 3.11- Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.	39
Figura 3.12 – Corpo de prova na máquina para ensaio - (a) Vistas frontal e (b) lateral - Tração Paralela.....	40
Figura 3.14 - Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras. Seção lateral e corte (Dimensões em centímetros)	41
Figura 3.15 - Corpo de prova - Tração Normal - (a) perspectiva (b) vista superior ...	41
Figura 3.16 - Ensaio do corpo de prova - Tração Normal - (a) antes e (b) depois do ensaio.....	41
Figura 3.17 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.	42
Figura 3.18 - Corpo de prova - Cisalhamento - (a) Vista Superior (b) Perspectiva. ...	42
Figura 3.19 - Corpo de prova na máquina de ensaio - (a) Antes e (b) depois (b) do ensaio de cisalhamento.....	43
Figura 3.20 - Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte.	43
Figura 3.21 - Corpo de prova de Cambará nas vistas superior (a) e perspectiva (b) - Fendilhamento	44
Figura 3.22 - Ensaio de fendilhamento - Corpo de prova (a) antes e (b) após o ensaio.....	44
Figura 3.23 - Corpo de prova para a flexão estática.	45

Figura 3.24 - Corpo de prova para a flexão de Cambará.	45
Figura 3.25 - Diagrama força x flecha para a determinação do módulo de elasticidade.	46
Figura 3.26 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão.	46
Figura 3.27 - Ensaio de flexão estática da madeira de Cambará Rosa - (a) Corpo de prova instrumentado durante o ensaio e (b) o Corpo de Prova rompido após o ensaio;.....	47
Figura 3.28 - Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte (Dimensões em cm).	48
Figura 3.29 - Arranjo para ensaio de dureza Janka.	48
Figura 3.30 - Ensaio de Dureza Janka da madeira de Cambará na direção paralela às fibras - (a) Antes e (b) após o ensaio.	49
Figura 3.31 - Ensaio de Dureza Janka da madeira de Cambará na direção paralela às fibras - (a) Antes (b) e após o ensaio.	49
Figura 3.32 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade (dimensões em cm).	50
Figura 3.33 - Ensaio para a determinação da tenacidade da madeira de Cambará - Foto do corpo de prova (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio na máquina.	50
Figura 4.1 - Comparativo entre as resistências à compressão paralela às fibras das três regiões.	55
Figura 4.2 - Comparativo entre as resistências à tração paralela às fibras das três regiões.	56
Figura 4.3 - Comparativo entre as resistências ao cisalhamento paralelo às fibras das três regiões.....	57
Figura 4.4 - Comparativo entre as resistências à flexão estática das três regiões.	58
Figura 4.5 - Comparativo entre o índice de equivalência das três regiões.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores médios de propriedades da madeira de Cambará.	22
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr (2004).	22
Tabela 2.3 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.	23
Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.	23
Tabela 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cambará.....	30
Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará proveniente do município de Vera - MT.....	53
Tabela 4.2 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará proveniente do município de Mucajaí - RR.....	54
Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará proveniente do sul de Rondônia.	54
Tabela 4.4- Resultados dos (P-valores) da ANOVA de Kruskal-Wallis.	59
Tabela 4.5 - Resultados (p-valores) da ANOVA, extrapolação pela técnica de <i>bootstrap</i>	60
Tabela 4.6 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão.	62

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Descrição dos Capítulos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Breve Histórico.....	20
2.2 Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará	21
2.3 Estimativa de Propriedades em Função da Densidade Aparente.....	24
2.4 Influência da Região de Extração	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Propriedades Físicas	31
3.1.1 Densidade Aparente	31
3.1.2 Retração da Madeira	32
3.2 Propriedades Mecânicas	33
3.2.1 Compressão Paralela às Fibras.....	33
3.2.2 Compressão Normal às Fibras	36
3.2.3 Tração Paralela às Fibras.....	38
3.2.4 Tração Normal às Fibras	40
3.2.5 Cisalhamento Paralelo às Fibras	42
3.2.6 Fendilhamento Paralelo às Fibras	43
3.2.7 Flexão Estática	45
3.2.8 Dureza Janka.....	47
3.2.9 Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão	49
3.3 Análise Estatística	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5. CONCLUSÕES.....	64
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

O uso de madeira na indústria e construção civil é uma prática realizada por muitos anos desde quando o ser humano necessitava suprir suas demandas, desde guardar alimento e construção de abrigos e atualmente é utilizada na construção civil, indústria de papel e celulose, indústria moveleira, instrumentos musicais, equipamento esportivo e madeira processada, como painéis de madeira (CHRISTOFORO et al, 2017a; DIAS e LAHR, 2004).

A madeira possui grande potencial de aproveitamento em estruturas, pois apresenta resistências próximas de outros materiais de construção como aço e concreto. Além disso, é um material natural, renovável e possui uma baixa demanda energética em seu processo produtivo (ALMEIDA et al., 2016a) .

O uso deste versátil material é amplo. Destaca-se o seu uso nos Estados Unidos da América para construção de novas residências, demandando mais de um terço da produção deste país de madeira serrada (158 milhões de metros cúbicos), painéis estruturais e outros materiais não estruturais de madeira, como móveis, portas e acabamentos (HOWARD e JONES, 2016) (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Residência estadunidense feita com Madeira Serrada



Fonte: Wood House Log Homes - <http://www.woodhouseloghomes.com/gambrel-plans/>

Pode-se destacar também o uso de madeira laminada colada curva para grandes obras, como no *LeMay Car Museum*, em Tacoma, WA, Estados Unidos da América (Figura 1.2).

Figura 1.2 - Estrutura em Madeira Lamelada Colada (MLC)



Fonte: Western Wood Structures - <http://westernwoodstructures.com/index.php/engineered-wood/curved-glulam/>

No Canadá, evidencia-se o uso de painéis de madeira em edificações. Estes painéis devem seguir as normas locais de conforto térmico para uso residencial. Segundo Qasass et al. (2014), 60% do consumo energético residencial no Canadá é utilizado para aquecimento doméstico. Com isso correspondendo a 15% das emissões de gás de efeito estufa do Canadá. O uso de painéis extras em detalhes arquitetônicos pode contribuir para um melhor conforto térmico da residência, influenciando no consumo energético da mesma.

O'Born (2018) apresentou um estudo de caso comparando os impactos dos projetos da ponte Mjøsa, Noruega, com 1650 m de comprimento e 4 pistas de rodagem, um projeto em madeira e outro em concreto armado. O maior objetivo do uso de madeira era reduzir os impactos ambientais na construção da ponte e incentivar a indústria local. O estudo mostrou que o projeto da ponte em madeira possui redução das emissões de gás carbônico CO₂ de

23% (15413 toneladas de CO₂-equivalente) e que projetos de pontes em madeira em larga escala devem ser considerados em projetos futuros.

O Brasil é o país com a maior diversidade de flora de madeira do mundo, tendo 8715 espécies. Possui também o maior número de espécies de árvores endêmicas do mundo, com 4333 espécies. O país possui vasta cobertura vegetal, cobrindo 58% de seu território (493.5 milhões de hectares). Dentre esta área, 10 milhões de hectares são de florestas plantadas. (BEECH et al., 2017; SNIF, 2016 - <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>)

A forte tradição da construção em alvenaria de tijolos de barro presente no Brasil e posteriormente, em concreto armado, foi trazida pelos portugueses desde a colonização do país. Nas regiões com predomínio de colonização de outros povos europeus, como no Sul e Sudeste do país, houve predomínio das construções em madeira. Em 1905, o governo da cidade de Curitiba proibiu a construção de casas de madeira na zona central da cidade, gerando no meio técnico preconceito contra as estruturas de madeira. O uso de técnicas construtivas não apropriadas fizeram das estruturas de madeira sinônimas de pouca durabilidade, paradigma este que deve ser quebrado (MEIRELLES, C. R. M; et al., 2005).

Com o avanço tecnológico, os produtos engenheirados à madeira, como a Madeira Laminada Colada (MLC), composta por lamelas de madeira coladas e Madeira Lamelada Cruzada (CLT) (Figura 1.3), consistindo em lamelas coladas em direções cruzadas. Os painéis de madeiras compostos de partículas de madeira, com destaque para o painel OSB (*Oriented Strand Board*) ganharam força no mercado da construção civil no Brasil e no mundo por ser um material com baixo peso próprio, renovável e elevada resistência mecânica. Todos estes produtos têm seu uso em móveis, acabamentos e painéis estruturais para residências e edificações multipavimentos (Figura 1.4) (FINK et al., 2018; ABIMCI, 2009; NAZAR, 2007).

Figura 1.3 - Painel de Madeira Lamelada Cruzada (CLT)



Fonte: APA Wood - <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber>

Figura 1.4 - Edifício multipavimento executado em CLT



Fonte: Architecture and Design Australia -
<https://www.architectureanddesign.com.au/features/product-in-focus/cross-laminated-timber-clt-australia-s-rising-star>

Estudo feito pela Fundação João Pinheiro (2018) aponta que o Brasil possui um déficit habitacional de 6.355 milhões de domicílios para o ano de 2015. Considerando a cobertura florestal do país e o déficit habitacional apresentado, o uso de madeira e de produtos engenheirados à madeira se apresenta uma alternativa viável na construção de estruturas residenciais a fim de atender a demanda habitacional existente no país.

As estruturas de madeira, sejam residenciais ou industriais, são regidas, no Brasil, pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Ela discorre sobre as condições gerais executivas, de projeto e de controle das estruturas de madeira.

Na referida Norma ABNT NBR 7190 (1997) o dimensionamento das peças é feito de acordo com o método semiprobabilístico dos Estados Limites, com o Estado Limite Último avaliando a perda de capacidade resistente e instabilidade em parte ou em toda a estrutura e o Estado Limite de Utilização, avaliando deformações e vibrações excessivas em parte ou em toda a estrutura.

A Norma além de preconizar as ações atuantes, critérios de dimensionamento e detalhamento das estruturas e ligações, também trata de questões relativas à caracterização de madeira, seja ela completa, mínima ou simplificada, com métodos para obtenção das propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

Para a caracterização completa de uma espécie, a NBR 7190 (1997) não determina o número mínimo de corpos de prova que devem ser avaliados, prescrevendo somente a classe

de umidade em que os corpos de prova devem estar, com estes na classe 1, referente à umidade de equilíbrio (U_{Eq}) da madeira, igual a 12% em que Para a caracterização completa as propriedades físicas e mecânicas exigidas são: resistência à compressão paralela e normal às fibras, resistência à tração paralela e normal às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo e normal às fibras, resistência ao embutimento paralelo e normal às fibras, densidade básica e densidade aparente com os corpos de prova a 12% de umidade.

Tratando de espécies pouco conhecidas, a Norma permite a caracterização mínima, efetuando a determinação das resistências à compressão e tração paralelas às fibras, do cisalhamento paralelo às fibras e as densidades básica e aparente. Utiliza-se aqui doze corpos de prova para cada lote de madeira com esta na umidade de equilíbrio.

Para espécies usuais, é permitido a caracterização simplificada das resistências a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras, calculando-se o valor característico da propriedade e a partir deste valor, avalia-se a resistência e rigidez com base em relações dispostas na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), fazendo uso do mínimo preconizado pela ABNT NBR 7190 (1997) de seis corpos de prova por lote de madeira com doze metros cúbicos.

Quando trata-se de rigidez em madeira, a Norma recomenda que estas propriedades são determinadas pelos métodos completo e simplificado de caracterização. A caracterização completa da rigidez é feita com a madeira na umidade padrão (12%), com a determinação, com no mínimo dois ensaios para cada, do valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela (E_{c0}) e normal (E_{c90}) às fibras. A Norma permite admitir que sejam iguais os valores médios do módulo de elasticidade à compressão (E_{c0}) e tração (E_{t0}) paralelas às fibras.

A Norma também prescreve que se o lote de madeira a ser caracterizado em quaisquer métodos, seja ele simplificado ou mínimo, apresente umidade entre 10% e 20%, os resultados devem ser corrigidos para umidade padrão de 12% e a classe de umidade 1 através de equações dispostas na NBR 7190 (ABNT, 1997).

Na Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) são apresentados também a classificação das resistências das madeiras em classes. Esta classificação é feita a fim de padronizar as madeiras com propriedades equivalentes e orientar a escolha do material para elaboração de projetos estruturais. A classificação é feita em função do valor característico da resistência à compressão paralela às fibras. Existem 4 classes (C20, C30, C40 e C60), seja para madeiras de folhosas ou coníferas, e de acordo com o valor característico do lote de madeira, classifica-se o lote de madeira.

A Norma também apresenta valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de madeira nativas e de reflorestamento. Estes valores são encontrados no *Anexo E* da ABNT NBR 7190 (1997). Porém, este anexo não trata a diferença existente nas propriedades físicas e mecânicas existentes dentro de uma mesma espécie variando o local de sua extração. Como os valores dispostos no *Anexo E* são base para o pré-dimensionamento, estes valores podem apresentar diferenças significativas com o valores de resistência e rigidez da madeira a ser utilizada, demandando assim a caracterização de determinada espécie o uso de madeiras de diferentes regiões (LAHR et al., 2016a).

A madeira de Cambará é utilizada na construção civil como elementos não estruturais e acabamentos, portas, molduras, andaimes, formas para concreto armado, entre outras utilidades. Também é utilizada na fabricação de móveis, chapas compensadas e embalagens (IPT, 2018)

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes regiões de extração de Vera, estado de Mato Grosso; Mucajaí, estado de Roraima; e região Sul de Rondônia da espécie de madeira Cambará (*Erismia uncinatum* Warm.) em suas propriedades físicas e mecânicas (Figuras 1.5, 1.6 e 1.7). Para a região Sul de Rondônia, não foi possível determinar o município de extração, adotando de forma geral a localidade como Sul de Rondônia. De posse das propriedades de uma região, objetiva-se verificar se a média de uma propriedade equivale a média da mesma propriedade para a mesma espécie de madeira das diferentes regiões em conjunto. Também foi avaliada, com auxílio da ANOVA dos modelos de regressão a possibilidade de estimar propriedades físicas, de resistência e rigidez pela densidade aparente.

No dispositivo normativo vigente no Brasil não há consideração acerca da influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas da espécies de madeira. Considerando as formas de caracterização preconizada pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) e também que algumas espécies já foram relacionadas com suas propriedades na Norma Brasileira, deve-se avaliar a influência da região de extração a fim de balizar futuras revisões da Norma Brasileira para que, havendo influência da região de extração, isso pode impossibilitar a consideração de que os dados da caracterização das propriedade de uma espécie de madeira são representativos para a determinada espécie, não importando a região de extração.

Figura 1.5 - Visão geral das regiões de extração das amostras da madeira de Cambará nos estados de Mato Grosso, Roraima e Rondônia.



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

Figura 1.6 - Destaque da localização das regiões de extração da madeira de Cambará: (a) Mato Grosso e (b) Roraima.



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

1.2 JUSTIFICATIVA

As distintas condições climáticas, vegetação e solo na qual a árvore medra podem influenciar em seu crescimento e por consequência, os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira. É usual a presença de madeira de diferentes regiões em um mesmo lote. Por isso, faz-se necessário saber a sua influência nos valores de suas propriedades.

Reconhecendo que os ensaios para estimar as propriedades de resistência e rigidez são elevados e que isto pode elevar o custo do material, faz-se necessário a construção de modelos matemáticos com boa acurácia para estimar propriedades de resistência e rigidez em função de sua densidade aparente, permitindo uma maior eficiência no pré-dimensionamento de uma estrutura.

A Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) não trata as possíveis influências nas propriedades de resistência e rigidez de madeiras de mesma espécie e de locais distintos de extração e também não discorre sobre relações a fim de estimar suas propriedades mecânicas em função da densidade aparente.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho desenvolvido foi organizado em capítulos. O trabalho foi dividido em seis capítulos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são apresentadas pesquisas relacionadas ao Cambará, a estimativa de propriedades físicas e mecânicas a partir da densidade aparente e estudos sobre a influência das regiões de extração nas propriedades físicas e mecânicas.

O capítulo 3 expõe a metodologia utilizada nesta pesquisa.

O capítulo 4 exhibe os resultados e discussões, com base na literatura científica.

O capítulo 5 evidencia as conclusões sobre esta pesquisa.

O capítulo 6 mostra as referências bibliográficas utilizadas no corpo do texto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica teve a finalidade de mostrar estudos sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará, o uso de modelos de regressão utilizando a densidade aparente para estimar propriedades físicas e mecânicas como também as regiões de extração influencia nestas propriedades em madeiras distintas.

2.1 BREVE HISTÓRICO

A elevada demanda de madeira no mercado madeireiro brasileiro aliado a poucas opções de madeira disponíveis levou a uma exploração predatória destas poucas espécies, impactando seus preços no mercado, sendo necessário definir novas espécies que podem substituir estas madeiras conhecidas com larga aplicação (LAHR et al., 2016b, LAHR et al., 2016c).

Desta forma, sendo necessário definir novas espécies para uso na construção civil, a espécie de madeira Cambará (Figura 2.1) é uma boa opção, ocorrendo na floresta pluvial Amazônica de terra firme, sendo característica desta região, esta sendo composta pelos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia (LORENZI, 1998).

Figura 2.1 - Madeira de Cambará: (a) árvore e (b) casca e face



Fonte: LORENZI, 1998.

O Cambará é uma árvore que alcança de 7 a 18 metros de altura, com tronco muito ereto e muito ramificado desde a base, com diâmetro variando de 40 a 70 centímetros com ramos acinzentados. Possui casca rugosa fissurada e descarnante através de placas estreitas e compridas. Sua madeira é macia com textura média e medianamente resistente. É utilizada na construção civil para tabuado em geral, compensados e caixarias. É indicada para reflorestamentos heterogêneos destinados a recuperação e enriquecimento de áreas degradadas (LORENZI, 1998).

A madeira de Cambará é classificada como madeira medianamente pesada por sua densidade aparente ($\rho_{12} = 544 \text{ kg/m}^3$) conforme Melo *et al.* (1992) com características físicas e mecânicas para uso na construção civil leve. Seu cerne possui cor marrom a marrom-avermelhado e o alburno, marrom acinzentado claro. Tem textura média, com boa trabalhabilidade com fácil serragem e aplainamento (BRASIL, 2018).

Hellmeister (1982) afirmou que a densidade aparente, dentre as propriedades da madeira, é primordial pois há relação entre resistência e densidade, sendo que quanto maior a densidade, maior a resistência. Shimoyama e Barrichelo (1991) e Humphreys e Chimelo (1992) afirmaram também que a densidade, propriedade de fácil determinação, está relacionada a todas outras propriedades da madeira.

Segundo Oliveira (1997), a densidade da madeira pode ser avaliada de diversas formas, de acordo com a umidade da amostra. As formas mais comuns de avaliação da densidade são a densidade básica e a densidade aparente. A primeira relaciona a massa da madeira totalmente seca em estufa com o seu volume saturado, com umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF). A segunda, relaciona a massa e o volume da amostra ambos na umidade de referência igual a 12%. Esta segunda, do ponto de vista prático, é o valor de maior interesse.

Conforme Logsdon (1992), a densidade pode ser obtida em diversos valores percentuais de umidade mas, devido a variabilidade de resultados que podem existir, impõe-se a necessidade de adoção de um valor de referência a título de possibilitar a padronização. A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que este valor de referência da umidade seja igual a 12%.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE CAMBARÁ

A norma ABNT NBR 7190 (1997) dispõe os valores médios da densidade aparente na umidade de referência (ρ_{12}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t0}), resistência ao cisalhamento (f_v) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras

(E_{c0}) em seu Anexo E. Estes valores foram obtidos para um número de 11 corpos de prova ensaiados. A Tabela 2.1 apresenta os dados.

Tabela 2.1 - Valores médios de propriedades da madeira de Cambará.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m^3)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
544	37,8	58,1	2,6	5,8	9067

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

Dias e Lahr (2004) efetuaram a caracterização completa da madeira de Cambará, colocando-a na classe de resistência C20 por sua resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) igual a 27,2 MPa. As propriedades investigadas são dispostas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr (2004).

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 de resistência e rigidez obtidas foram corrigidas para a umidade padrão de referência 12% conforme disposto na norma ABNT NBR 7190 (1997). Estes resultados estão dispostos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
544	3,6	7,2	38	58	2,6	9,6	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,4	67	8783	9172	8842	64	39	4,9

Fonte: Dias e Lahr (2004)

Segundinho *et al.* (2013) avaliam vigas de madeira laminada colada de Cambará. Neste estudo foi determinado os módulos de elasticidade dinâmico (E_{Mvt}) e estático (E_M) por intermédio do ensaio de vibração transversal e ensaio de flexão estática, respectivamente. Foram determinados o módulo de ruptura (f_M), resistência à compressão (σ_{cp}) e o módulo de elasticidade paralelo (E_{cp}). Foi possível estabelecer relação entre os módulos de elasticidade dinâmico (E_{Mvt}) e estático (E_M) de forma significativa por intermédio da análise de variância (ANOVA) com modelos de regressão, com o E_{Mvt} sendo um bom estimador do E_M . A partir dos ensaios de compressão, a madeira de Cambará foi classificada na classe de resistência C30 das folhosas.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2018), afirma que a madeira de Cambará, conhecido como cedrinho, jaboti, entre outros, pode ser encontrado na Amazônia, nos estados brasileiros do Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Rondônia e também em países vizinhos ao Brasil, como Guiana, Guiana Francesa, Suriname e Venezuela. Sua madeira possui baixa durabilidade ao ataque de fungos e insetos xilófagos. O cerne e o alburno são moderadamente fáceis de preservar em processos sob pressão. Possui boa trabalhabilidade com fácil aplainamento, serragem mas possui acabamento ruim. Sua secagem ao ar é fácil e sem ocorrência significativa de defeitos. A secagem em estufa é rápida mas pode ocorrer empenamento, rachaduras e endurecimento superficial em condições drásticas. As propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.

Densidade aparente a 15% de umidade	590 kg/m ³
Densidade básica (massa seca da amostra / volume saturado)	480 kg/m ³
Retratibilidade radial	3,3%
Retratibilidade tangencial	7,7%

Retratibilidade volumétrica	12,5%
Resistência na flexão estática (madeira verde)	72,50 MPa
Resistência na flexão estática (madeira com 15% de umidade)	80,20 MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática (madeira verde)	9365 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira verde)	33,70 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira com 15% de umidade)	42,20 MPa
Módulo de elasticidade na compressão paralela (madeira verde)	12101 MPa
Trabalho absorvido no impacto (madeira com 15% de umidade)	21,50 J
Dureza Janka (madeira verde)	3,84 kN
Resistência à tração normal às fibras (madeira verde)	4,20 MPa
Resistência ao fendilhamento (madeira verde)	0,50 MPa

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas (2018)

2.3 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

Tendo em vista a importância da densidade em relação às outras propriedades da madeira e observando a estimativa das propriedades da madeira disposta na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), uma alternativa, com auxílio de modelos matemáticos de regressão, é proceder a estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira em função da densidade aparente. Utilizando várias amostras de uma mesma espécie extraídas de diversos locais do país e feita a determinação da densidade aparente das amostras de madeira, os modelos de regressão que possuírem um bom ajuste e assim, estabelecerem relação entre as propriedades de resistência e rigidez com a densidade, viabiliza o uso destas relações por projetistas para um pré-dimensionamento ser feito de forma mais confiável e mais eficiente (DIAS e LAHR, 2004; CHRISTOFORO et al., 2014; SILVA et al., 2018).

Dias e Lahr (2004) apresentam relações, com auxílio de modelos matemáticos de regressão (linear, logarítmico, exponencial, geométrico e polinômio de grau 2), entre a densidade aparente e demais propriedades físicas e mecânicas da madeira de quarenta espécies nativas folhosas brasileiras, dentre elas o Cambará. Os resultados dos coeficientes de determinação (R^2) apresentados para as relações que estimam propriedades de resistência e rigidez, exceto a resistência ao fendilhamento (f_{s0}) e resistência à tração normal as fibras (f_{i90}) estiveram entre 0,628 e 0,922, evidenciando uma forte relação entre a densidade aparente com aquelas propriedades. O modelo que teve o melhor ajuste foi o geométrico Para as propriedades físicas, resistência à tração normal (f_{i90}) e resistência ao

fendilhamento (f_{s0}), foram obtidos que possuíam valores baixos para os coeficientes de determinação (R^2), sendo estatisticamente não significativos, mostrando uma fraca relação entre a densidade aparente e estas propriedades.

Almeida et al. (2014) avaliaram, com o uso de modelos de regressões polinomial linear, quadrática e cúbica a possibilidade de estimar a tenacidade a partir da densidade aparente em seis espécies distintas, pertencentes às classes de resistência C20, C40 e C60 das folhosas: Teca (*Tectoma grandis*), Paricá (*Schilozobium amazonicum*) e Pinus (*Pinus oocarpa Shiede*) [C20]; Eucalypto (*Corymbia citriodora*) [C40]; Jatobá (*Hymenaea sp.*) e Angico (*Anadenanthera falcata*) [C60] (ABNT, 1997). Os modelos foram avaliados com a Análise de Variância (ANOVA). Todos os modelos foram considerados significativos pela ANOVA e o modelo de regressão que teve o melhor ajuste foi o polinomial cúbico, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 84,70% indicando boa qualidade no ajuste e a possibilidade de poder estimar a tenacidade nestas espécies por intermédio da densidade aparente.

Christoforo et al. (2014) investigaram a possibilidade de estimar a tenacidade a partir da densidade aparente e da resistência na flexão com o uso de modelos de regressão polinomiais linear, quadrático e cúbico. Foram utilizadas 15 espécies folhosas, divididas igualmente entre cinco classes de resistência [C20, C30, C40 C50 e C60]: Cedro Doce (*Cedrela sp.*), Cedrona (*Cedrelinga cateniformis*) e Quarubarana (*Erismia uncinatum*) [C20]; Canafístula (*Peltophorum dubium*), Cedro Amargo (*Cedrela odorata*) e Cupiúba (*Goupia glabra*) [C30]; Branquilha (*Terminalia sp.*), Cafearana (*Andira sp.*) e Louro Preto (*Ocotea sp.*) [C40]; Castelo (*Gossypiospermum praecox*), Angico Preto (*Pipitadenia macrocarpa*) e Catanudo (*Calophyllum sp.*) [C50]; Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Champanhe (*Dipteryx odorata*) e Sucupira (*Diplotropis sp.*). Os modelos de regressão foram avaliados pela Análise de Variância (ANOVA). Todos os modelos foram considerados significativos pela ANOVA. A tenacidade média da Quarubarana (Cambará) foi igual a 43 J. Para estimar a tenacidade em função da densidade aparente, o modelo de regressão com melhor ajuste foi o modelo quadrático, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 67,80%, mostrando a possibilidade de estimar a tenacidade em função da densidade aparente. Para estimar a tenacidade em função da resistência na flexão estática, o modelo com melhor ajuste foi o quadrático, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 58,70%.

Almeida et al. (2016b) avaliaram a possibilidade de inferir a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) a partir da densidade aparente utilizando três espécies de madeiras folhosas de três classes de resistências (ABNT, 1997) distintas: Canafístula (*Cassia ferruginea*) [C30], Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) [C40] e Castelo (*Gossypiospermum sp.*) [C50]. Foram utilizados modelos de regressão (polinomial linear,

exponencial, logarítmico e geométrico) para estimar a resistência à compressão paralela às fibras. As relações foram avaliadas com base na Análise de Variância (ANOVA) dos modelos de regressão. O modelo de regressão com melhor ajuste para as espécies de madeira Canafístula e Castelo foi o modelo geométrico, com coeficientes de determinação (R^2) igual a 48,57% e 52,84%, respectivamente, indicando a possibilidade de estimar a resistência à compressão paralela às fibras. Para a espécie Angelim araroba, não houve correlação estatisticamente significativa, indicando a impossibilidade de estimar a resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade aparente.

Cavalheiro et al. (2016) testaram modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmico e geométrico) para verificar a possibilidade de estimar retração em madeira, sendo as retrações longitudinal (RL), radial (RR), tangencial (RT), volumétrica (RV) e também o coeficiente de anisotropia (CA), em função da densidade aparente (ρ_{ap}) e da densidade básica (ρ_{bas}), estas como variáveis independentes. Para o estudo foram utilizadas cinco espécies de madeira: *Pinus sp.* e *Pinus oocarpa*, do grupo das coníferas; Paricá (*Schilozobium amazoncum*), Jatobá (*Hymnenaea sp.*) e *Lyptus®* do grupo das dicotiledôneas (ABNT, 1997). As relações seguiram a Análise de Variância (ANOVA) para os modelos de regressão. Os resultados para estimativa dos índices de retração foram estatisticamente insignificantes, mostrando a não possibilidade da estimativa da retração seja para a densidade aparente, seja para a densidade básica. O único modelo que se mostrou significativo foi o modelo envolvendo a densidade básica e a densidade aparente, com coeficientes de determinação (R^2) igual a 91,72% (coníferas) e 83,36% (dicotiledôneas), com boa qualidade no ajuste, indicando a possibilidade da estimativa da densidade básica em função da densidade aparente.

Christoforo et al. (2016) avaliaram a possibilidade de estimar a retração total (radial, tangencial e longitudinal), coeficiente de anisotropia (CA) e os coeficientes de retração radial (RR), tangencial (RT) e volumétrica (RV) em função da densidade com o uso de modelos de regressão polinomial (linear, quadrático e cúbico) e exponencial. Foram utilizadas cinco espécies de madeira dicotiledôneas, cada uma representando uma classe de resistência (ABNT, 1997): Cedro Doce (*Cedrela sp.*) [C20], Canafístula (*Cassia ferruginea*) [C30], Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) [C40], Mandioqueira (*Qualea sp.*) e Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) [C60]. A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para avaliação dos modelos de regressão polinomial e exponencial. Os resultados mostram que as melhores relações foram obtidas para as retrações tangencial e volumétrica com modelo exponencial, tendo como valores de coeficiente de determinação (R^2) variando entre 51 e 54%, indicando a possibilidade de estimativa das retrações tangencial e volumétrica.

Entretanto, com o coeficiente de determinação abaixo de 70%, demanda-se mais pesquisas com outras espécies de madeira.

Lahr et al (2016c) efetuaram a completa caracterização (física e mecânica) do Cambará e com o suporte de modelos de regressão (polinomial linear, exponencial, logarítmico e geométrico) baseados na Análise de Regressão (ANOVA), avaliaram a possibilidade de estimativa de propriedades de resistência e rigidez em função da densidade aparente. Os resultados apresentados não foram estatisticamente significantes, indicando a impossibilidade de se estimar alguma propriedade de resistência ou rigidez em função da densidade aparente.

Almeida et al. (2017) investigaram a possibilidade de estimativa de importantes quantidades de estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras utilizando modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmico e geométrico) em função da densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{12}), densidade anidra (ρ_s) e densidade básica (ρ_{bas}), com estas sendo variáveis independentes. Estas quantidades são a retração radial (RR), retração tangencial (RT), retração longitudinal (RL), retração volumétrica (RV), coeficiente de anisotropia (CA), ponto de saturação das fibras (PSF), taxa de inchamento volumétrico (IV/PSF) e a taxa de retração volumétrica (RV/PSF). No estudo foram utilizadas três espécies de cada classe de resistência das árvores dicotiledôneas (ABNT, 1997), totalizando quinze espécies: Cedro-doce, Cedro-amargo e Cambará [C20]; Canafístula, Catanudo e Casca Grossa [C30]; Angelim araroba, Cupiúba e Angelim amargoso [C40]; Mandioqueira, Castelo e Tatajuba [C50]; Angelim vermelho, Champanhe e Itaúba [C60]. A análise das relações seguiu a Análise de Variância (ANOVA) para os modelos de regressão. Os resultados mostram que as densidades básica (ρ_{bas}) e anidra (ρ_s) podem ser estimadas a partir da densidade aparente (ρ_{12}) pelo modelo geométrico, com coeficientes de determinação (R^2) iguais a 72,92% e 99,69%, indicando boa qualidade no ajuste. Para os parâmetros de estabilidade dimensional, a densidade mostrou-se como um mau estimador de indicadores de estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras, com o maior coeficiente de determinação (R^2) encontrado foi igual a 19,58%, indicando má qualidade no ajuste.

2.4 INFLUÊNCIA DA REGIÃO DE EXTRAÇÃO

Levando em conta os fragmentos florestais onde diversas espécies de árvores medram, incluindo nestas o Cambará, as reservas florestais ocupam considerável área geográfica e por isso, podem haver diferenças nas propriedades estudadas de uma mesma espécie de madeira. Portanto, deve-se avaliar se existem variações significativas entre as

propriedades de madeiras extraídas em locais distintos, sob pena de uma subestimativa ou superestimativa de suas propriedades, levando ao desperdício, sobrecarga desnecessária, efeitos deletérios e até mesmo a ruína da estrutura.

Machado et al. (2014) avaliaram influência na densidade a 12% de umidade e nas propriedades mecânicas em madeiras extraídas de locais distintos, de madeira para madeira e também mudanças dentro da mesma madeira, avaliando mudanças radiais e longitudinais. A espécie de madeira estudada foi acácia-preta (*Acacia melanoxyton* R. Br.), extraída de quatro locais em Portugal: Floresta Nacional Camarido, Vala da Maceda, Floresta de Santa Maria e Floresta da Montanha Crasto. As propriedades mecânicas avaliadas foram a resistência na flexão (f_M), módulo de elasticidade na flexão (E_M) seguindo a norma internacional ISO 3131 (1975) e ISO 3133 (1975). Também foram avaliados a resistência à compressão (f_{c0}) e o módulo de elasticidade na compressão conforme a ISO 3787(1976). Para avaliação das relações foi seguida a análise de variância (ANOVA). Conforme os resultados, o local de extração não foi uma fonte de variação para a densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{12}) e para as propriedades mecânicas testadas, indicando a possibilidade de uso desta madeira para a indústria europeia de madeira.

Lahr et al. (2016a) investigaram a influência das regiões de extração da madeira da espécie Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) em quinze propriedades físicas e mecânicas. Os locais de extração foram os municípios de Caracaraí-RR, Bonfim-RR e Alta Floresta-MT, no Brasil. Também foi avaliada a influência do teor de umidade, seja a 12% ou saturada, nas propriedades físicas e mecânicas. Os resultados, obtidos com a análise de variância (ANOVA), mostram que não existiram diferenças significativas nas propriedades quando analisado o local de extração. Quanto ao teor de umidade, verificou-se que a madeira saturada apresentou valores para as propriedades menores do que a madeira a 12% de umidade.

Silva et al (2018) avaliaram a influência das regiões de extração da madeira de Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) em suas propriedades físicas e mecânicas. Os locais de extração foram os municípios de Bonfim do Sul-RR, Caracaraí-RR, e Cláudia-MT, no Brasil. Também foi avaliado com modelos de regressão (linear, exponencial, geométrico e logarítmico) a possibilidade de estimar propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{12}). As relações foram avaliadas com a análise de variância (ANOVA). Os resultados mostram que houve equivalência em 94% das propriedades das madeiras extraídas de Caracaraí e Cláudia e sem equivalência em 50% das propriedades de madeiras de Bonfim do Sul. De acordo com os modelos de regressão, foi possível estimar as propriedades físicas e mecânicas a partir da densidade aparente.

Vale ressaltar a importância de avaliar a influência das regiões de extração nas propriedades das madeiras fornecidas por diversas empresas madeireiras devido a variabilidade dos fornecedores e, por conseguinte, dos locais de extração destas madeiras. A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) não discorre sobre esta variabilidade nas propriedades, o que demonstra uma melhor avaliação desta influência e a demanda por futuras pesquisas utilizando maior número de locais de extração para determinar propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

Desta forma, considerando os dados apresentados nesta revisão bibliográfica, verifica-se que não existem trabalhos versando sobre a influência dos locais de extração nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará, sendo assim um trabalho inédito.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo foi apresentado a metodologia para estimar as propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cambará abatidas nos municípios Vera - MT [Ver], Mucajaí-RR [Muc] e sul de Rondônia [SRo] e também a metodologia estatística usada a fim de avaliar se há equivalência entre as propriedades físicas e mecânicas em razão das regiões de extração e a apresentação dos modelos de regressão para estimar as propriedades de resistência e rigidez em função da densidade aparente.

A partir de informações fornecidas das madeireiras, as peças de madeira foram extraídas, desdobradas em caibros, vigas e terças em serraria próxima e transportadas por caminhão até o pátio do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), onde foram estocadas seguindo o disposto na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), com teor de umidade próximo a umidade de equilíbrio (12%) e feita a extração das amostras e ensaio das mesmas no mesmo local.

As propriedades físicas e mecânicas foram obtidas conforme o disposto no Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) - "Determinação de Propriedades das Madeiras para Projetos de Estrutura", e o número de amostras (NA) por região de abate são mostrados na Tabela 3.1, que resultaram em 612 resultados experimentais.

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

Propriedades	Sigla	NA por Região		
		Ver	Muc	SRo
Densidade aparente	ρ_{12}	12	12	12
Retração radial total	$\epsilon_{r,2}$	12	12	12
Retração tangencial total	$\epsilon_{r,3}$	12	12	12
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	12	12	12
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	12	12	12
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	12	12	12
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}	12	12	12
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	12	12	12
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	12	12	12
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	12	12	12
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	12	12	12

Módulo de elasticidade na flexão estática	E_m	12	12	12
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	12	12	12
Dureza normal às fibras	f_{H90}	12	12	12
Tenacidade	W	12	12	12
Resistência à compressão normal às fibras	f_{c90}	12	12	12
Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras	E_{c90}	12	12	12

NA: Número de Amostras

Fonte: Próprio Autor (2019).

Foram calculados os valores característicos das propriedades de resistência (Equação 3.1), além dos valores médios das propriedades físicas e mecânicas, conforme a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

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

Conforme a Equação 3.1, os resultados experimentais da resistência à solicitação específica (f) foram colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), desprezando o maior valor caso o número de corpos de provas seja ímpar e o valor característico não pode ser inferior a 70% do valor médio da resistência e não inferior ao menor valor obtido experimentalmente. Vale ressaltar que a classificação das madeiras foi feita com o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, com esta classificação da madeira nas respectivas classes de resistência dos grupos das coníferas e folhosas, respectivamente.

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

São apresentadas a forma de obtenção das propriedades físicas nas madeiras nesta pesquisa.

3.1.1 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente da madeira ($\rho_{ap,12\%}$) consiste na razão entre a massa ($m_{12\%}$) e o volume ($v_{12\%}$) dos corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, sendo expresso na Equação 3.2.

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

As amostras para estimativa da densidade aparente possuíam dimensões 20x30x50 mm, com a direção preponderante ao longo das fibras e a seção transversal considerou pelo menos cinco anéis de crescimento. Para sua estimativa são utilizados um paquímetro digital e balança eletrônica. O paquímetro digital possui precisão de 0,01 mm e a balança digital possui sensibilidade de 0,001 gramas.

3.1.2 RETRAÇÃO DA MADEIRA

A estabilidade dimensional da madeira foi avaliada através das propriedades de retração e inchamento nas direções preferenciais 1, 2 e 3 de um lote de madeira considerado homogêneo obtidas em 12 amostras. Conforme a norma ABNT NBR 7190 (1997), a propriedade de retração (ϵ) é avaliada nas direções (n) - longitudinal (1), radial (2) e tangencial (3) - e também avaliado o coeficiente de retração volumétrica (ΔV), expressos nas Equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

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

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

Da Equação 3.3 infere-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.

Conforme a norma ABNT NBR 7190 (1997), o corpo de prova deve conter umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF). Caso esteja menor, deve-se reumidificar o corpo de prova. Para o estudo do inchamento, o corpo de prova deve estar seco, geralmente utilizando o mesmo tipo de amostra usado no estudo de retratibilidade.

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

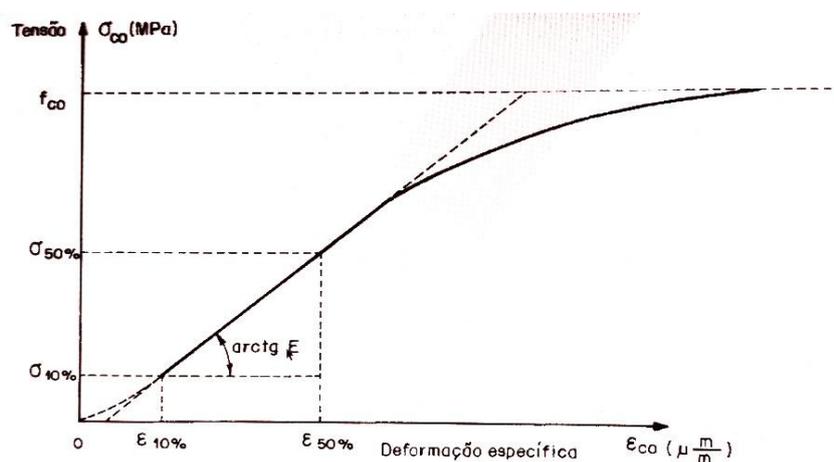
A resistência à compressão (f_{c0}) é definida pela razão entre a máxima força de compressão aplicada a um corpo de prova ($F_{c0,max}$) por sua Área de seção transversal (A), com dimensões 50x50 mm, conforme mostrado na Equação 3.5.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (3.5)$$

O módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação (Figura 3.1), expresso na Equação 3.6, onde os quantis $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{50\%}$, $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ representam os valores de tensão e deformação respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} obtidas no terceiro ciclo de carregamento, nos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento (Figura 3.2).

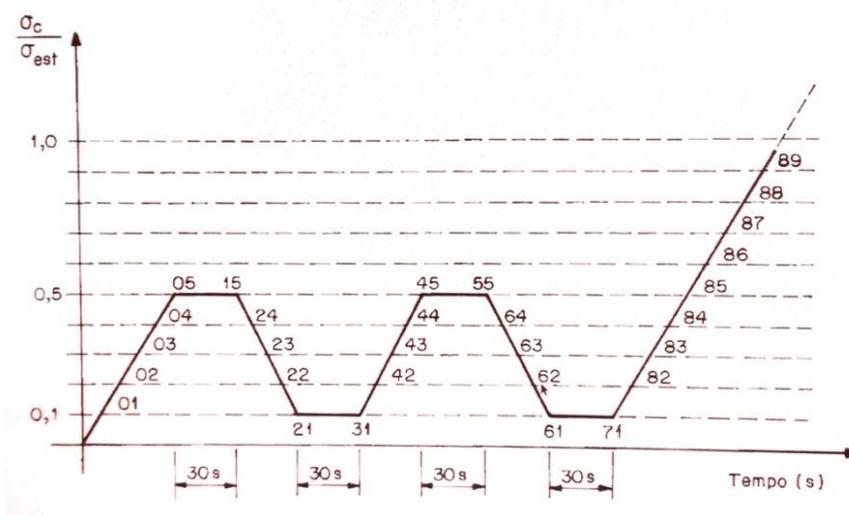
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.6)$$

Figura 3.1 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.2 - Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

O corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras deve ter seção quadrada igual a 50 mm e comprimento igual a 150 mm na direção das fibras.

A norma ABNT NBR 7190 (1997) determina que as deformações medidas nos corpos de prova na compressão paralela às fibras sejam avaliadas usando relógios comparadores, com precisão de 0,001 mm, fixados por meio de duas cantoneiras metálicas pregadas no corpo de prova, com distância nominal igual a 100 mm entre as linhas de pregação, afastadas 25 mm das extremidades do corpo de prova (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Imagem do corpo de prova com os relógios - Compressão paralela



Fonte: Próprio Autor (2019).

A aferição das deformações específicas foram feitas com extensômetros com exatidão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e taxa de carregamento igual a 10 MPa/min, de forma monotônica e crescente.

O afastamento de 25 mm das bordas do corpo de prova é justificado devido ao esmagamento da madeira nas bordas não interfira na aferição das deformações.

Considerando a heterogeneidade da madeira por ser um material natural e que cada do corpo de prova pode apresentar deformações diferentes (ICIMOTO et al., 2015), a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) permite fixar os relógios comparadores em no mínimo duas faces do corpo de prova e atribuir a deformação característica a média das deformações registradas em cada relógio comparador.

Figura 3.4 - Foto do Corpo de prova com os relógios na prensa - Compressão paralela



Fonte: Próprio Autor (2019)

Figura 3.5 - Máquina de ensaio com o corpo de prova durante o ensaio - Compressão paralela



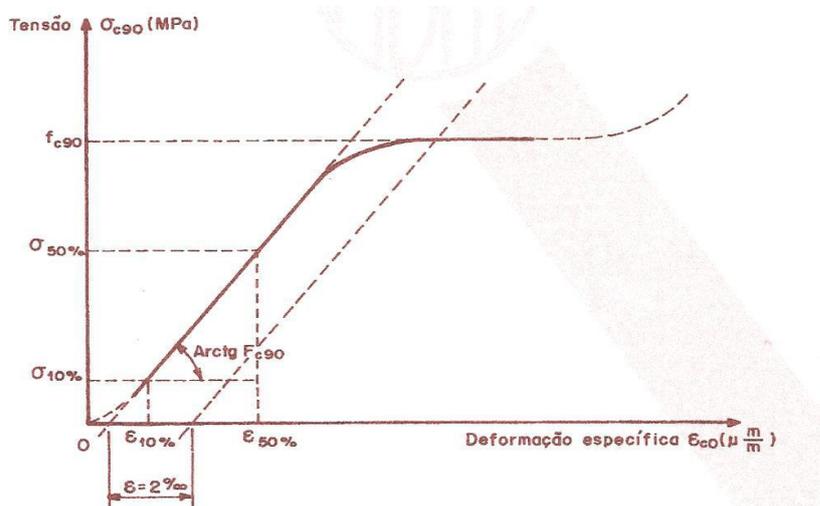
Fonte: Próprio Autor (2019)

3.2.2 COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

O ensaio de compressão normal às fibras consistiu na avaliação da resistência e rigidez à compressão normal. É definido pela razão entre a força máxima de compressão ($F_{c90,max}$) pela área (A) (Equação 3.7) considerando uma deformação específica residual de 2‰, em corpos de prova prismáticos, na direção tangencial às fibras (Figura 3.6).

$$f_{c90} = \frac{F_{c90,max}}{A} \quad (3.7)$$

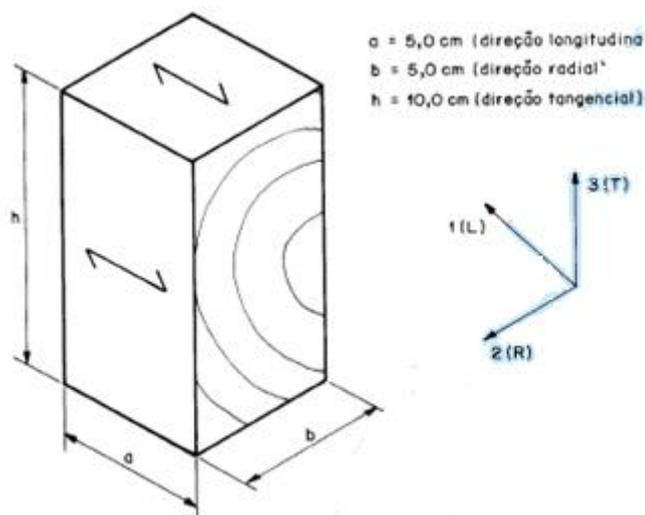
Figura 3.6 - Diagrama tensão x deformação específica para a determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Para avaliação da resistência e rigidez a compressão normal às fibras, a geometria do corpo de prova é análoga à geometria do corpo de prova para avaliação da resistência e rigidez à compressão normal (Figura 3.7), com a maior dimensão na direção tangencial das fibras e precisão dimensional de 0,1 mm. As deformações devem ser aferidas por extensômetros com exatidão mínima de 50 $\mu\text{m/m}$ e o carregamento deve ser monotônico e crescente aplicado a uma taxa de 10 MPa/min (ABNT, 1997).

Figura 3.7 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão normal às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A rigidez à compressão normal é definida pelo módulo de elasticidade (E_{c90}) obtido a partir da inclinação do trecho linear do diagrama tensão x deformação (Figura 3.6), estimado pela Equação 3.8, onde os quantis $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{50\%}$, $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ representam os valores de tensão e deformação respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c90} no diagrama mostrado na Figura 3.2.

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3.8)$$

Para aferição da rigidez à compressão normal, utilizou-se a resistência da madeira encontrada em ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, proveniente da mesma amostra a ser avaliada. Com a resistência conhecida, aplicou-se dois ciclos de carga e descarga conforme a Figura 3.3, com a avaliação da tensão e deformação nos pontos 71 e 85, referentes à tensões e deformações correspondentes à 10% e 50% da resistência f_{c90} , seguindo o mesmo procedimento para a compressão paralela. Em ensaios instrumentados, a aplicação do carregamento ocorre até 70% da força de ruptura e é levado a ruptura após a retirada dos instrumentos.

Figura 3.8 - Corpo de prova à compressão normal na prensa (a) Instrumentado (b) Antes da Ruptura



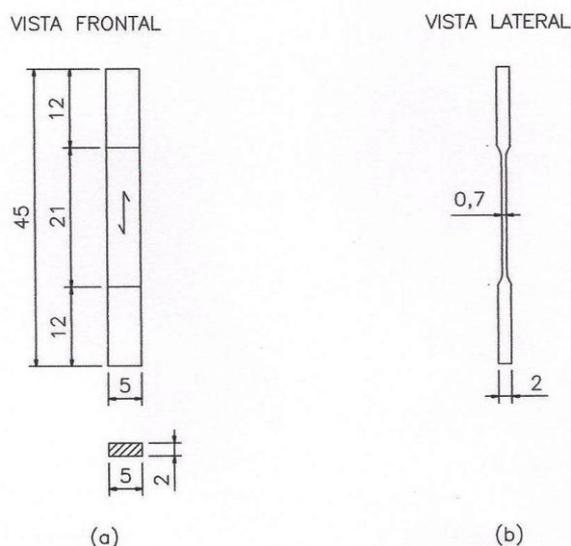
Fonte: Próprio Autor (2019)

3.2.3 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Este ensaio objetiva determinar a resistência e rigidez à tração paralela às fibras de madeira. Conforme a Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997), a resistência é dada pela razão entre a máxima força aplicada ao corpo de prova ($F_{t0,max}$) pela área da seção transversal (A), conforme expresso pela Equação 3.9. O corpo de prova pode ser de seção retangular (Figura 3.9) ou circular (Figura 3.10).

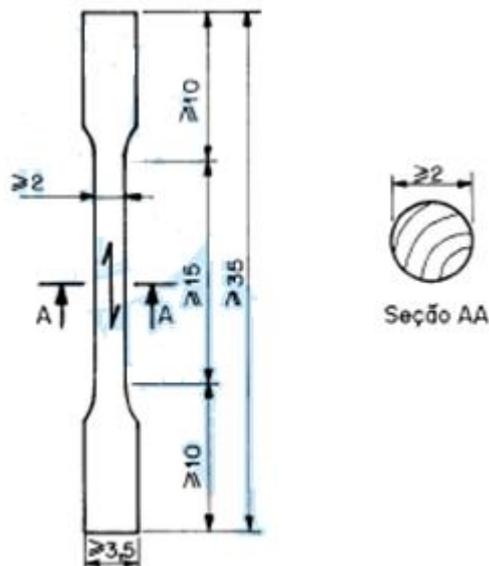
$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} \quad (3.9)$$

Figura 3.9 – Corpo de prova alongado de seção retangular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros) (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.10 – Corpo de prova alongado de seção circular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros).

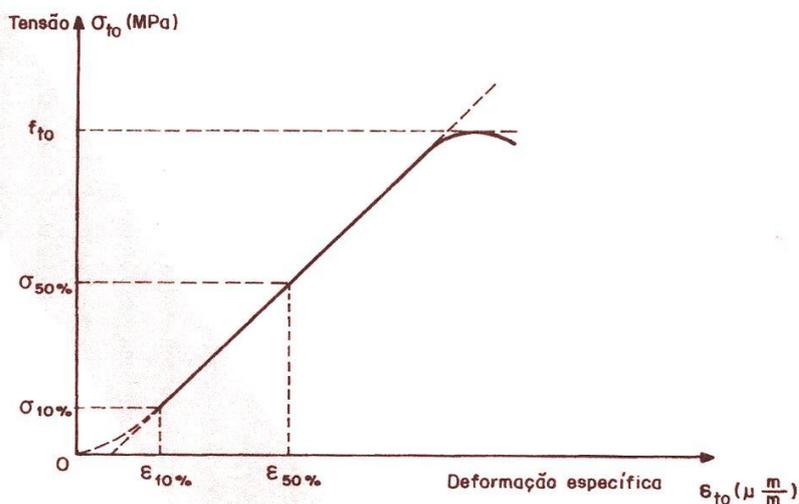


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A rigidez é aferida pelo módulo de elasticidade (Equação 3.10) na tração paralela às fibras, que é medido pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação (Figura X.X), definida pelos pontos $\sigma_{10\%}$, $\epsilon_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$, $\epsilon_{50\%}$, correspondendo às tensões e deformações iguais a 10% e 50% da resistência à tração paralela.

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3.10)$$

Figura 3.11- Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Nesta pesquisa foi utilizado o corpo de prova com seção retangular com dimensões 5 x 2 cm de lado e 15 cm de comprimento na direção paralela às fibras e precisão dimensional de 0,1 mm, conforme preconizado pela norma brasileira.

As deformações no corpo de prova foram aferidas no lado de maior dimensão (5 cm) com o uso de extensômetros com exatidão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e o carregamento deve ser aplicado de forma crescente e monotônico a uma taxa de 10 MPa/min (Figuras 3.12 e 3.13).

Figura 3.12 – Corpo de prova na máquina para ensaio - (a) Vistas frontal e (b) lateral - Tração Paralela



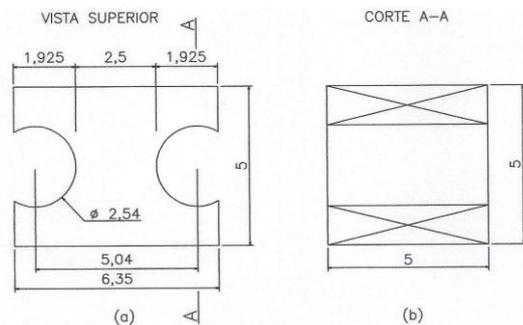
Fonte: Próprio Autor (2019)

3.2.4 TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Este ensaio objetivou determinar a resistência à tração normal às fibras da madeira. Conforme a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), a resistência à tração normal (f_{t90}) é dada pela razão entre a força máxima de tração (F_{t90}) aplicada ao corpo de prova e a área da seção transversal do corpo de prova ($A_{t90} \approx 25\text{mm} \times 50\text{mm}$) na qual deve atuar a força de tração normal, conforme expresso na Equação 3.11. O corpo de prova é descrito na Figura 3.14.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,m\acute{a}x}}{A_{t90}} \quad (3.11)$$

Figura 3.13 - Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras. Seção lateral e corte (Dimensões em centímetros)



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A norma brasileira veda o uso desta propriedade mecânica na avaliação de segurança de estruturas, sendo utilizado apenas para fins comparativos. O corpo de prova deve ser feito com precisão de 0,1 mm e o carregamento no ensaio deve ser monotônico crescente, aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 3.14 - Corpo de prova - Tração Normal - (a) perspectiva (b) vista superior



Fonte: Próprio Autor (2019)

Figura 3.15 - Ensaio do corpo de prova - Tração Normal - (a) antes e (b) depois do ensaio



Fonte: Próprio Autor (2019)

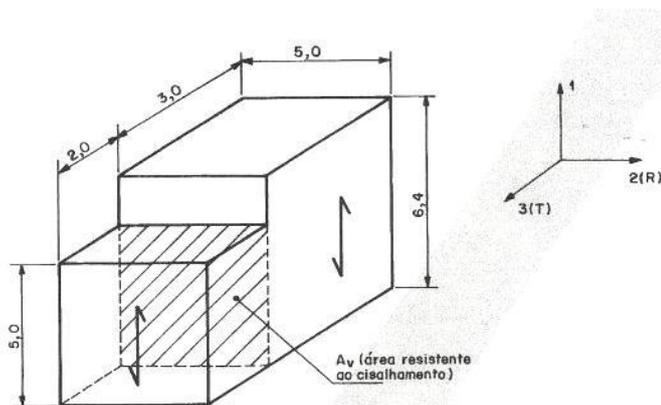
3.2.5 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

A resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}) é dada pela razão entre a força máxima de cisalhamento ($F_{v0,max}$) pela área de cisalhamento (A_{v0}), conforme mostrado na Equação 3.12.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (3.12)$$

O corpo de prova padrão é mostrado na Figura 3.17, com as dimensões em centímetros. Deve possuir precisão dimensional de 0,1 mm e o carregamento deve ser monotônico crescente de 2,5 MPa/min.

Figura 3.16 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

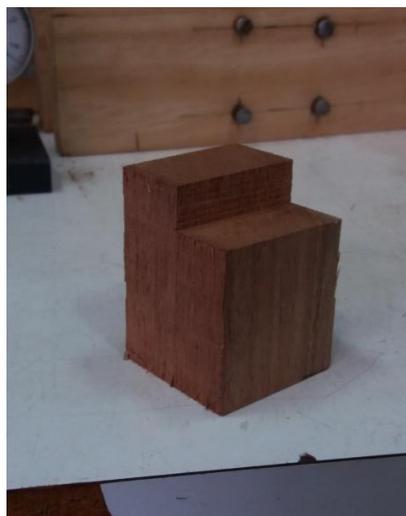


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.17 - Corpo de prova - Cisalhamento - (a) Vista Superior (b) Perspectiva.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor (2019)

A Figura 3.19 ilustra o equipamento pronto para realizar o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Figura 3.18 - Corpo de prova na máquina de ensaio - (a) Antes e (b) depois (b) do ensaio de cisalhamento.

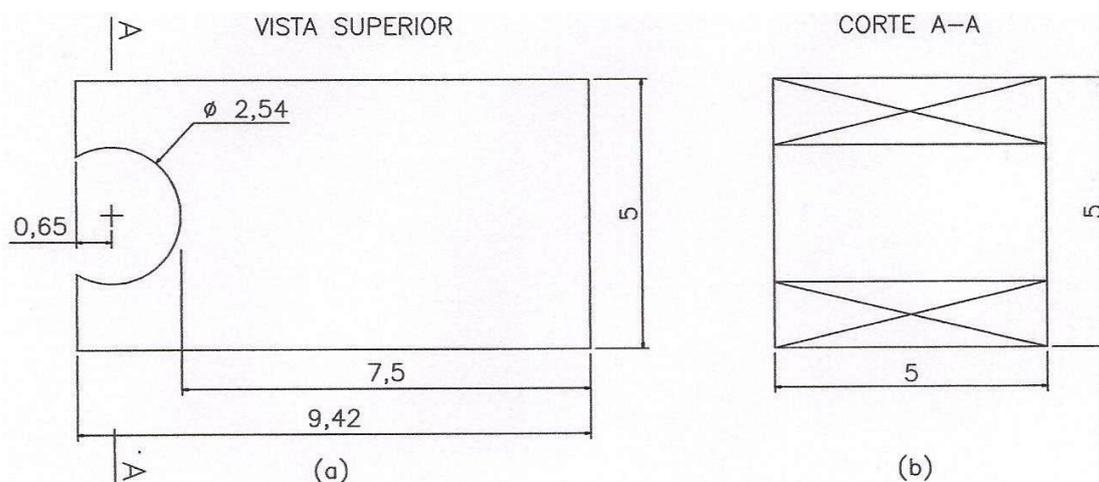


Fonte: Próprio Autor (2019)

3.2.6 FENDILHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

A resistência ao fendilhamento (f_{s0}) é definida pela razão entre a força máxima aplicada ($F_{s0,max}$) pela área da seção útil ($A_{s0} \approx 75\text{mm} \times 50\text{mm}$) do corpo de prova (Figura 3.20) e precisão dimensional de 0,1 mm e carregamento monotônico crescente aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

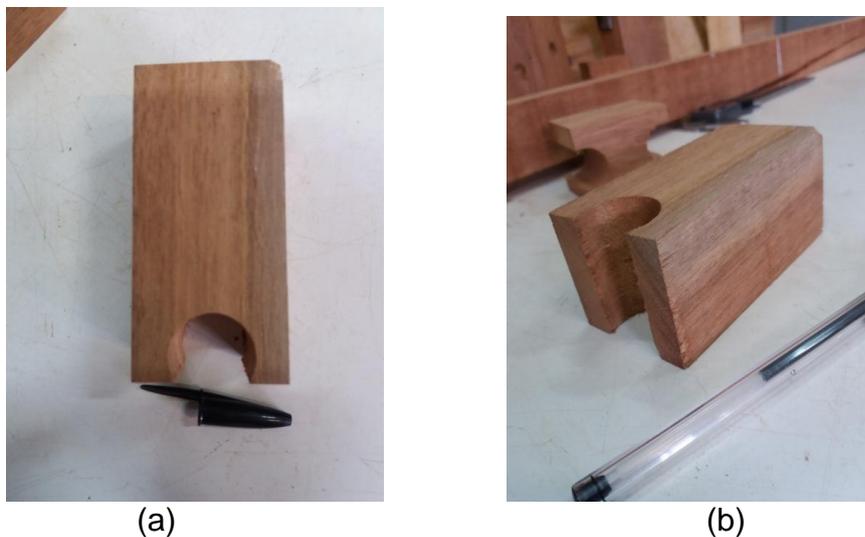
Figura 3.19 - Corpo de prova para ensaio de fendilhamento, vista superior e corte.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A Figura 3.21 ilustra o corpo de prova de madeira de Cambará para o ensaio de fendilhamento paralelo às fibras.

Figura 3.20 - Corpo de prova de Cambará nas vistas superior (a) e perspectiva (b) - Fendilhamento



Fonte: Próprio Autor (2019)

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) trata a resistência ao fendilhamento como um valor convencional, sendo utilizado apenas para estudo comparativo entre espécies de madeira. A Figura 3.22 mostra o ensaio de fendilhamento em um corpo de prova da madeira de Cambará.

Figura 3.21 - Ensaio de fendilhamento - Corpo de prova (a) antes e (b) após o ensaio



Fonte: Próprio Autor (2019)

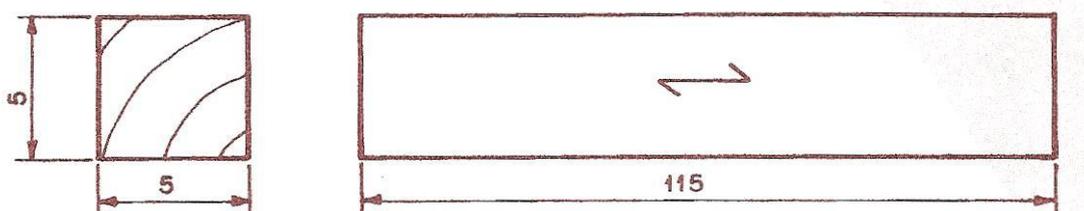
3.2.7 FLEXÃO ESTÁTICA

A resistência à flexão (f_M) é um valor convencional, sendo igual a máxima tensão atuante em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, considerando o material elástico, conforme expresso na Equação 3.13. O valor de M_{max} é o valor do momento fletor máximo e W_e corresponde ao módulo de resistência elástico na flexão, igual a $W_e = b \cdot h^2/6$, com b e h as medidas de base e altura da seção transversal, respectivamente.

$$f_M = \frac{M_{Max}}{W_e} \quad (3.13)$$

O ensaio de flexão simples em três pontos é definido pela norma ABNT NBR 7190 (1997) como a aplicação de carregamento no ponto médio do corpo de prova por meio de um cutelo. O corpo de prova deve ser vinculado a dois apoios articulados com vão livre igual a $21h$, com h sendo a altura da seção transversal. O corpo de prova deve seguir as dimensões preconizadas na Figura 3.23.

Figura 3.22 - Corpo de prova para a flexão estática.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A Figura 3.24 ilustra a geometria do corpo de prova de Cambará para ensaio de flexão estática.

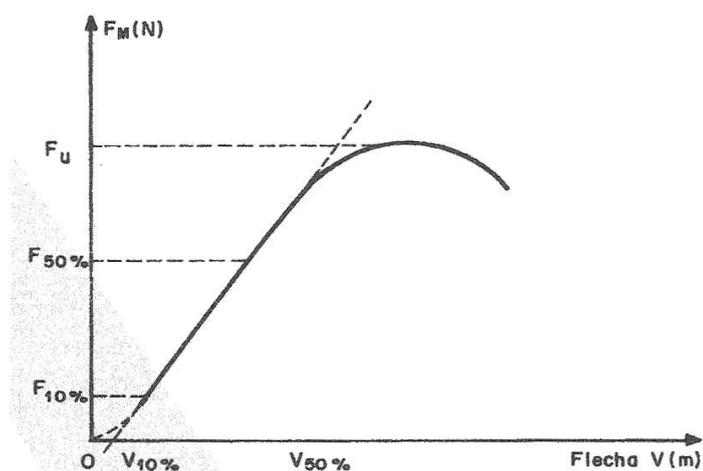
Figura 3.23 - Corpo de prova para a flexão de Cambará.



Fonte: Próprio Autor (2019)

A determinação da rigidez é feita pela pelo módulo de elasticidade (E_M) na flexão simples (Equação 3.14), que é obtido pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento nos pontos $F_{10\%}$, $v_{10\%}$ e $F_{50\%}$, $v_{50\%}$, correspondentes à força e deslocamento a 10% e 50% da carga máxima estimada (F_U), determinada com auxílio de ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo da amostra, e L sendo o vão livre entre os apoios.

Figura 3.24 - Diagrama força x flecha para a determinação do módulo de elasticidade.

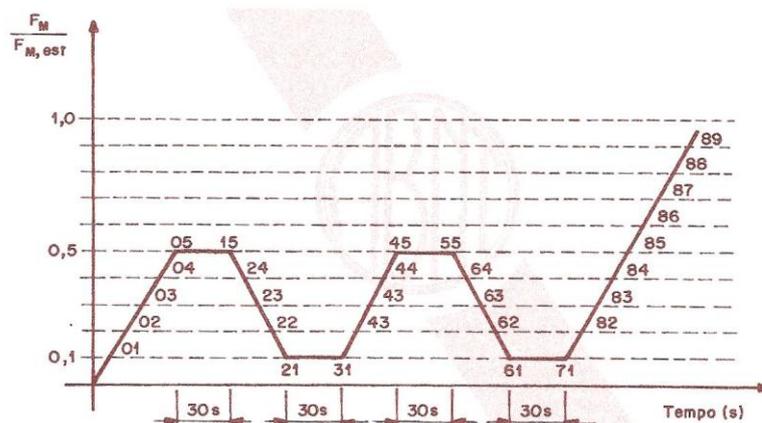


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3.14)$$

O cálculo do módulo de elasticidade na flexão simples (E_M) deve ser avaliado no terceiro ciclo de carga, nos pontos 71 e 85, conforme a Figura 3.26. A carga estimada ($F_{M,est}$) mostrada na Figura 3.26 é igual àquela definida pela norma ABNT NBR 7190 (1997) como que produz a ruptura no corpo de prova gêmeo (F_U).

Figura 3.25 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Os deslocamentos transversais no meio do vão devem ser aferidos em cada ponto do diagrama de carregamento (Figura 3.26) por intermédio de transdutores de deslocamentos com exatidão de 0,01 mm. Neste caso, procede-se a aferição de deslocamentos até 70% da carga estimada, retira-se os instrumentos e procede o carregamento até a ruptura do corpo de prova.

Na Figura 3.27 é mostrado o corpo de prova da madeira de Cambará no ensaio de flexão de três pontos.

Figura 3.26 - Ensaio de flexão estática da madeira de Cambará Rosa - (a) Corpo de prova instrumentado durante o ensaio e (b) o Corpo de Prova rompido após o ensaio;



Fonte: Próprio Autor (2019)

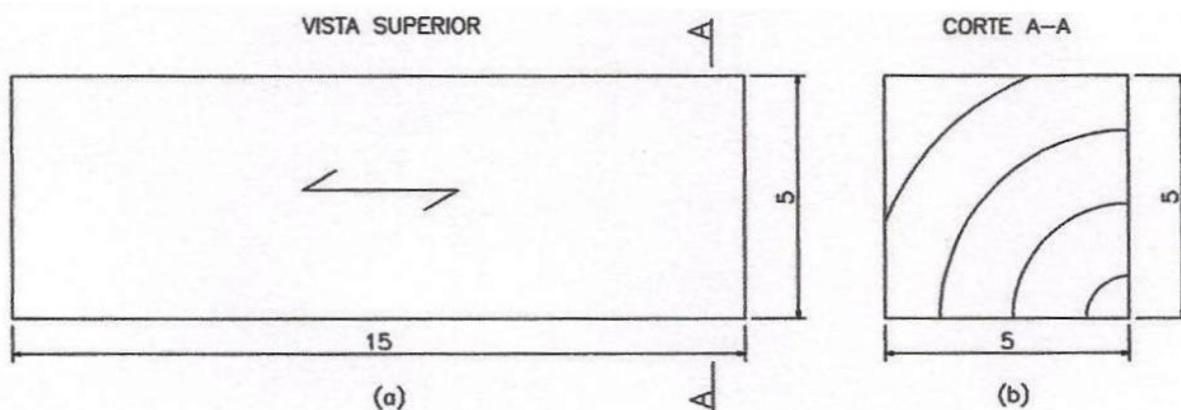
3.2.8 DUREZA JANKA

A norma brasileira baliza os critérios para determinação do grau de dureza de uma determinada espécie, definindo convencionalmente a dureza (f_H) como a tensão atuante em uma das faces do corpo de prova que produz a penetração de uma semi-esfera de aço com área diametral de 1 cm², tensão esta dada pela razão entre a força máxima (F_{max}) e a área da seção transversal ($A_{seção\ transversal} = 1\text{cm}^2$) (Equação 3.15).

$$f_H = \frac{F_{max}}{A_{seção\ transversal}} \quad (3.15)$$

A dureza Janka é medida na direção paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras. O corpo de prova para ensaio da dureza é prismático, com seção transversal quadrada de lado 5 cm e comprimento paralelo às fibras de 15 cm, com precisão dimensional de 0,1 mm. idêntico ao corpo de prova utilizado para determinação da resistência à compressão paralela às fibras (Figuras 3.28).

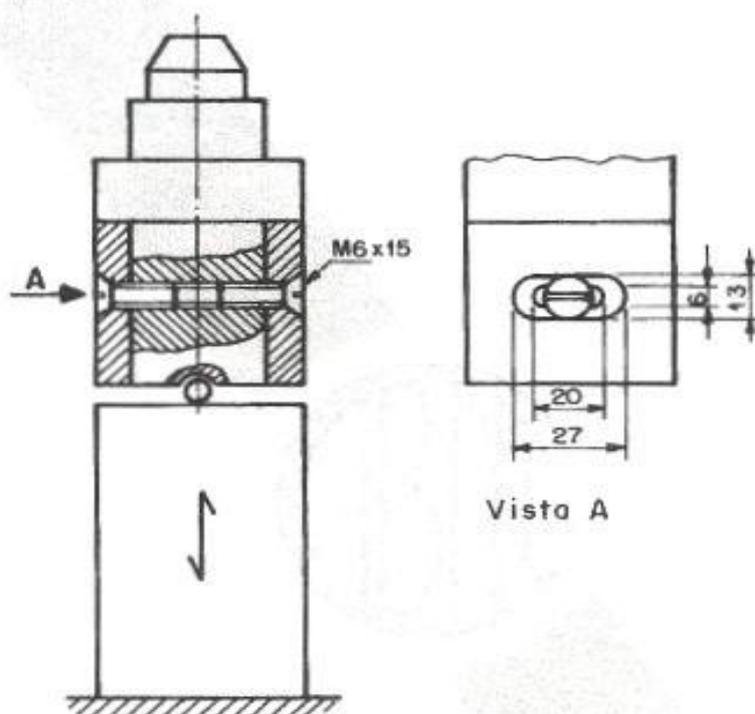
Figura 3.27 - Corpo de prova para o ensaio de dureza Janka. Vista Superior e Corte (Dimensões em cm).



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

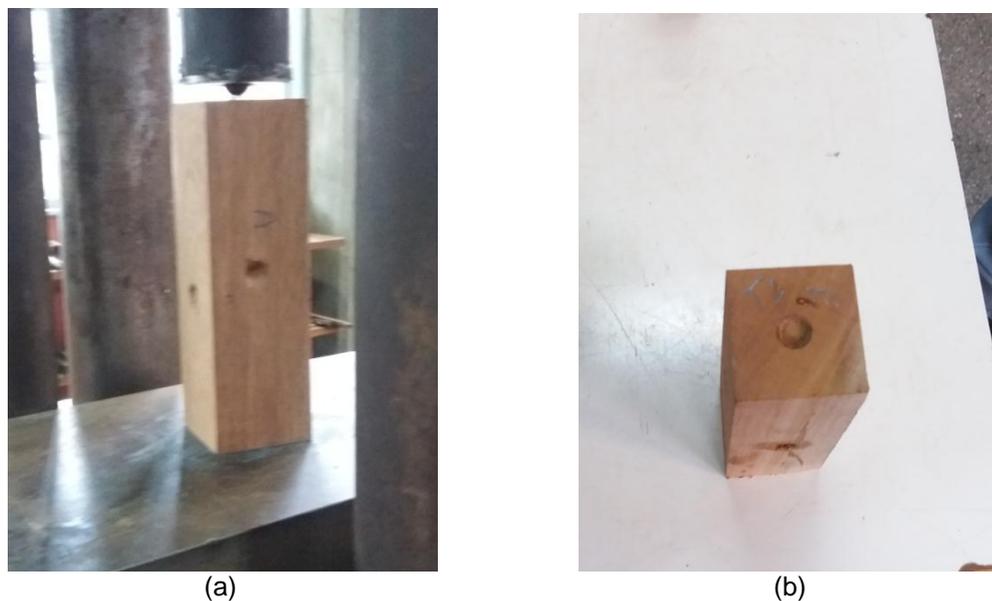
O esquema do dispositivo utilizado para determinação do grau de dureza Janka proposto pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) é disposto na Figura 3.29. As Figuras 3.30 e 3.31 mostram o ensaio de dureza Janka nas direções paralela e normal às fibras da madeira de Cambará.

Figura 3.28 - Arranjo para ensaio de dureza Janka.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.29 - Ensaio de Dureza Janka da madeira de Cambará na direção paralela às fibras
- (a) Antes e (b) após o ensaio.



Fonte: Próprio Autor (2019)

Figura 3.30 - Ensaio de Dureza Janka da madeira de Cambará na direção paralela às fibras
- (a) Antes (b) e após o ensaio.



Fonte: Próprio Autor (2019)

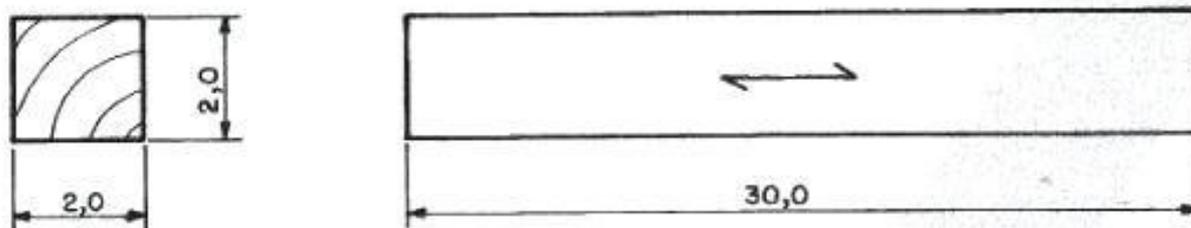
3.2.9 TENACIDADE E RESISTÊNCIA AO IMPACTO NA FLEXÃO

Este ensaio visou determinar a tenacidade (W) da madeira, que é a energia necessária para fraturar o corpo de prova padrão (Figura 3.32). A tenacidade (W) foi calculada pela Equação 3.16.

$$W = PL_1(\cos \theta_1 - \cos \theta_0) \quad (3.16)$$

Da Equação 3.16, tem-se que P é o somatório dos pesos (em N) das anilhas da máquina de ensaio de impacto, $\cos \theta_1$ sendo o ângulo final depois da ruptura da amostra, $\cos \theta_0$ sendo o ângulo inicial antes de colocar o corpo de prova na máquina de ensaio de impacto e L_1 sendo a distância de rotação do braço da máquina.

Figura 3.31 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade (dimensões em cm).

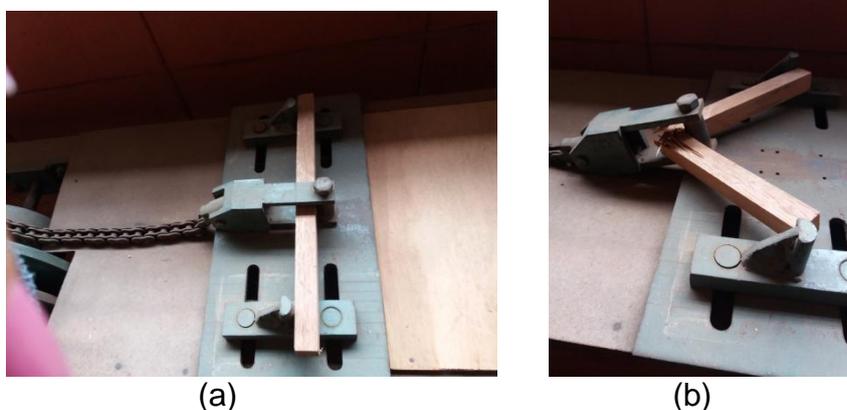


Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Conhecendo o valor da tenacidade, pode-se calcular a resistência ao impacto na flexão (f_{bw}), expresso na Equação 3.17, com b e h sendo as medidas da seção transversal (20x20 cm) do corpo de prova utilizado. O conhecimento da resistência ao impacto na flexão da madeira é extremamente relevante no dimensionamento de estruturas de madeira submetidas à ações dinâmicas.

$$f_{bw} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (3.17)$$

Figura 3.32 - Ensaio para a determinação da tenacidade da madeira de Cambará - Foto do corpo de prova (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio na máquina.



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor (2019)

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para considerar a influência do fator lugar de extração das madeiras de Cambará nas propriedades físicas e mecânicas foi utilizado a análise de variância de Kruskal-Wallis (teste não paramétrico). Para isso, 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 a mesma propriedade considerando a totalidade dos resultados conjuntos dos três locais de extração, e na diferença das médias dos dois grupos (considerando região e conjunto de regiões) como hipótese alternativa (H_1). Assim, o P-valor (probabilidade de P) do teste superior ao valor de 5% de significância denota a equivalência das médias dos dois grupos (aceitação de H_0), e da não equivalência com o P-valor menor que 0,05.

A fim de avaliar a abrangência dos resultados da análise de variância (ANOVA) no estudo da influência das regiões de extração para cada propriedade investigada, utilizou-se a técnica de simulação ou de reamostragem "bootstrap", sendo uma simulação, a partir de uma pequena amostra, de numerosas amostras com retirada e reposição de alguns dos seus elementos. Para isto, com o nível de significância admitido de 5%, a hipótese nula assumida foi na consideração da equivalência das médias de cada propriedade proveniente de uma região isolada com mesma propriedade considerando o resultado conjunto das três regiões e a hipótese alternativa, a não equivalência dos dois grupos. O número de simulações adotado nesta avaliação foi de 10000.

O P-valor simulado superior a 5% implica na aceitação, por extrapolação, que a média dos dois grupos é equivalente, e não equivalente quando P-valor inferior a 5%.

A estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará em função da densidade aparente foram feitas com o uso de modelos de regressão (Equações 3.18 a 3.21) e balizados pela ANOVA.

Na Equações 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21, Y representa a variável dependente, podendo ser uma propriedade física ou mecânica, X representa a variável independente, definida como a densidade aparente e a e b são os parâmetros dos modelos ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

$$Y = a + b \cdot X \quad [\text{Lin - linear}] \quad (3.18)$$

$$Y = a \cdot e^{b \cdot X} \quad [\text{Exp - exponencial}] \quad (3.19)$$

$$Y = a + b \cdot \ln(X) \quad [\text{Log - logaritmico}] \quad (3.20)$$

$$Y = a \cdot X^b \text{ [Geo - geométrico]} \quad (3.21)$$

Pela análise de variância dos modelos de regressão, considerando o nível de 5% de significância (α), a hipótese nula consistiu na não representatividade dos modelos testados ($H_0: \beta = 0$), e na representatividade como hipótese alternativa ($H_1: \beta \neq 0$). P-valor superior que o nível de significância implica na aceitação da hipótese nula e o modelo testado não é representativo, portanto, variações da densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) foram incapazes de explicar as variações da propriedade estimada e deve ser refutado, caso contrário, o modelo testado é representativo.

Além do uso da Análise de Variância, que permite ou não aceitar a representatividade de modelos testados, os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram obtidos a fim de avaliar a capacidade de variação da densidade aparente, podendo assim possibilitar a determinação de modelos com o melhor ajuste. Vale destacar que a densidade aparente foi utilizada para estimar 16 propriedades, sendo 2 propriedades físicas e 14 propriedades mecânicas, com o uso de 4 modelos matemáticos diferentes, linear, exponencial, logaritmico e geométrico, totalizando 64 ajustes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 os valores médios (\bar{x}), coeficientes de variação (Cv), valores máximos (Max) e mínimos (Min), o intervalo de confiança da média (IC - 95% de confiabilidade) das propriedades físicas e mecânicas e também os valores característicos (f_{wk}) das propriedades de resistência das madeiras de Cambará originadas de Vera [Ver] em Mato Grosso, Mucajaí [Muc] em Roraima e Sul de Rondônia [SRo], respectivamente.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará proveniente do município de Vera - MT.

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,59	10,00	0,53	0,61	0,56; 0,61	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	4,84	33,98	2,21	6,94	3,91; 5,77	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,52	29,91	3,73	10,95	6,24; 8,79	---
f_{c0} (MPa)	45,58	11,27	36,00	53,00	42,32; 48,83	40,00
f_{t0} (MPa)	63,85	41,77	27,00	111,00	46,90; 80,79	25,16
f_{t90} (MPa)	2,70	27,41	1,80	4,10	2,22; 3,17	2,02
f_{v0} (MPa)	8,90	18,02	7,00	12,00	7,88; 9,92	7,55
f_{s0} (MPa)	0,46	14,78	0,30	0,60	0,41; 0,50	0,37
f_M (MPa)	94,73	25,23	41,00	117,00	79,54; 109,91	49,62
f_{H0} (MPa)	48,21	14,11	40,00	59,00	43,89; 52,53	41,23
f_{H90} (MPa)	34,40	9,84	28,00	41,00	32,25; 36,55	30,42
f_{c90} (MPa)	7,28	16,09	6,00	9,00	6,54; 8,02	6,46
W (N·m)	5,65	26,73	3,10	8,70	4,69; 6,61	---
E_{c0} (MPa)	11919	27,56	7326	18024	9832; 14006	---
E_{t0} (MPa)	11426	37,74	4519	19421	8687; 14167	---
E_M (MPa)	11262	26,98	7725	16473	9332; 13192	---
E_{c90} (MPa)	529	13,23	425	634	484; 573	---

Fonte: Próprio Autor (2019)

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

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,54	9,96	0,47	0,67	0,51; 0,57	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	3,61	26,71	2,26	5,31	3,00; 4,22	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,16	13,68	6,11	9,61	6,53; 7,78	---
f_{c0} (MPa)	37,38	25,42	27,00	58,00	31,34; 43,42	25,63
f_{t0} (MPa)	57,36	22,58	32,00	75,00	49,13; 65,59	38,22
f_{t90} (MPa)	2,58	30,65	1,40	3,80	2,07; 3,08	1,28
f_{v0} (MPa)	9,55	20,99	6,00	12,00	8,27; 10,82	6,63
f_{s0} (MPa)	0,38	29,08	0,20	0,60	0,31; 0,45	0,17
f_M (MPa)	81,14	15,59	64,00	107,00	73,10; 89,18	71,07
f_{H0} (MPa)	62,35	23,91	43,00	95,00	52,88; 71,82	46,31
f_{H90} (MPa)	38,58	49,78	22,00	94,00	26,38; 50,78	22,23
f_{c90} (MPa)	6,31	18,28	5,00	9,00	5,58; 7,04	4,97
W (N·m)	4,90	36,82	2,90	8,90	3,74; 6,02	---
E_{c0} (MPa)	9190	25,17	7018	14856	7720; 10658	---
E_{t0} (MPa)	9776	15,74	8150	12342	8799; 10753	---
E_M (MPa)	9424	17,90	7473	12569	8352; 10496	---
E_{c90} (MPa)	481	11,79	386	572	444; 517	---

Fonte: Próprio Autor (2019)

Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará proveniente do sul de Rondônia.

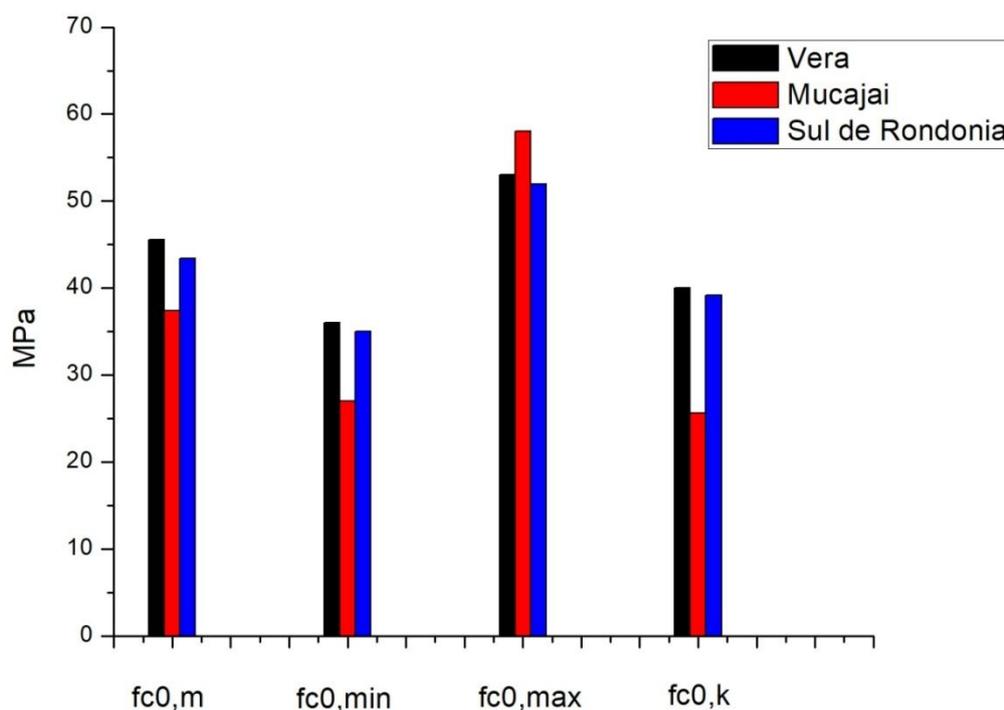
PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,56	4,17	0,53	0,61	0,55; 0,57	---
$\varepsilon_{r,2}$ (%)	3,70	14,06	2,89	4,68	3,36; 4,03	---
$\varepsilon_{r,3}$ (%)	7,10	11,54	5,34	7,95	6,57; 7,62	---
f_{c0} (MPa)	43,44	12,84	35,00	52,00	39,98; 46,98	39,18
f_{t0} (MPa)	63,65	23,91	41,00	87,00	53,98; 73,32	41,68
f_{t90} (MPa)	3,12	35,05	1,80	4,90	2,43; 3,81	1,63

f_{v0} (MPa)	7,86	24,60	5,00	11,00	6,63; 9,09	4,93
f_{s0} (MPa)	0,70	24,33	0,50	1,10	0,59; 0,81	0,48
f_M (MPa)	93,57	18,09	72,00	122,00	82,81; 104,32	75,43
f_{H0} (MPa)	52,75	17,05	38,00	65,00	47,03; 58,46	38,06
f_{H90} (MPa)	40,43	16,12	30,00	49,00	36,29; 44,57	29,97
f_{c90} (MPa)	6,14	24,01	4,00	8,00	5,21; 7,07	4,32
W (N·m)	5,80	32,13	3,20	8,80	4,66; 6,94	---
E_{c0} (MPa)	10380	16,72	8732	13262	9277; 11483	---
E_{t0} (MPa)	10612	22,61	7626	14498	9087; 12136	---
E_M (MPa)	9904	17,53	7728	12560	8801; 11007	---
E_{c90} (MPa)	520	17,78	370	645	461; 578	---

Fonte: Próprio Autor (2019)

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 dispõem um comparativo entre algumas propriedades mecânicas das madeiras extraídas de regiões distintas.

Figura 4.1 - Comparativo entre as resistências à compressão paralela às fibras das três regiões.

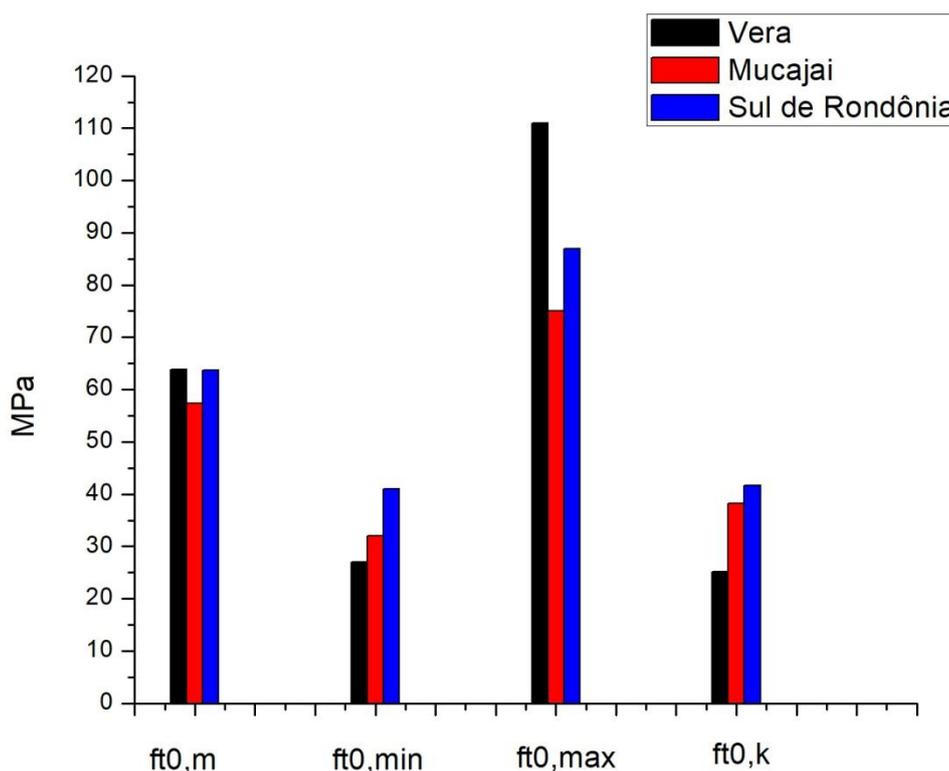


Fonte: Próprio Autor (2019)

A Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) não aponta nenhuma consideração sobre local de extração da madeira a fim de balizar a avaliação das suas respectivas propriedades físicas e mecânicas. Esta não consideração não impossibilita a existência de diferenças entre suas propriedades. Vale ressaltar que os valores para a resistência característica à compressão apresentaram diferenças significativas, com o valor para região de Mucajaí destoar dos valores encontrados para a região de Vera e Sul de Rondônia. As madeiras de Vera, Mucajaí e Sul de Rondônia foram classificadas nas classes de resistência C40, C20 e C30, valores acima do disposto na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

Quanto aos valores de resistência média à compressão, pode-se observar que os valores para as regiões de Vera e Sul de Rondônia foram superiores ao disposto na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), que é igual a 37,8 MPa, enquanto o valor para a região de Mucajaí foi inferior.

Figura 4.2 - Comparativo entre as resistências à tração paralela às fibras das três regiões.

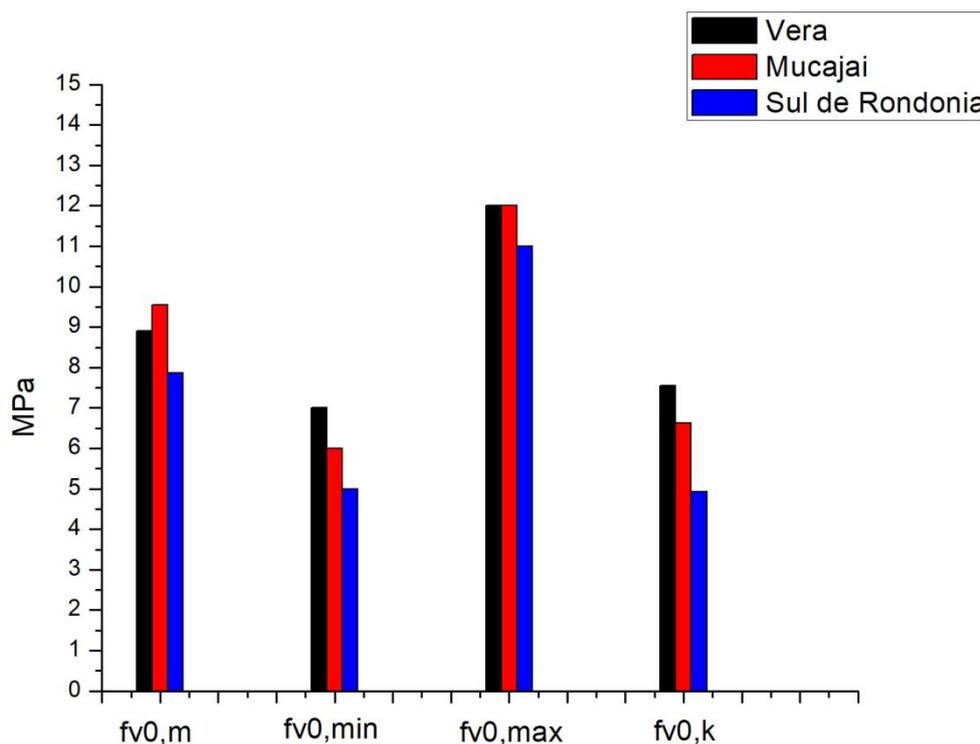


Fonte: Próprio Autor (2019)

Pode-se inferir da Figura 4.2 que os valores para a resistência característica à tração paralela às fibras das regiões de Mucajaí e Sul de Rondônia tiveram valores mais uniformes, próximo dos 40 MPa, enquanto o valor para a região de Vera ficou próximo dos 20 MPa.

Analisando os valores médios de resistência à tração paralela às fibras, os valores médios para as regiões de Vera e Sul de Rondônia foram próximos de 63 MPa, acima do valor apresentado na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), igual a 58,1 MPa. Para a região de Mucajaí, o valor médio da resistência a tração paralela, 57,4 MPa, ficou abaixo do disposto em Norma.

Figura 4.3 - Comparativo entre as resistências ao cisalhamento paralelo às fibras das três regiões.

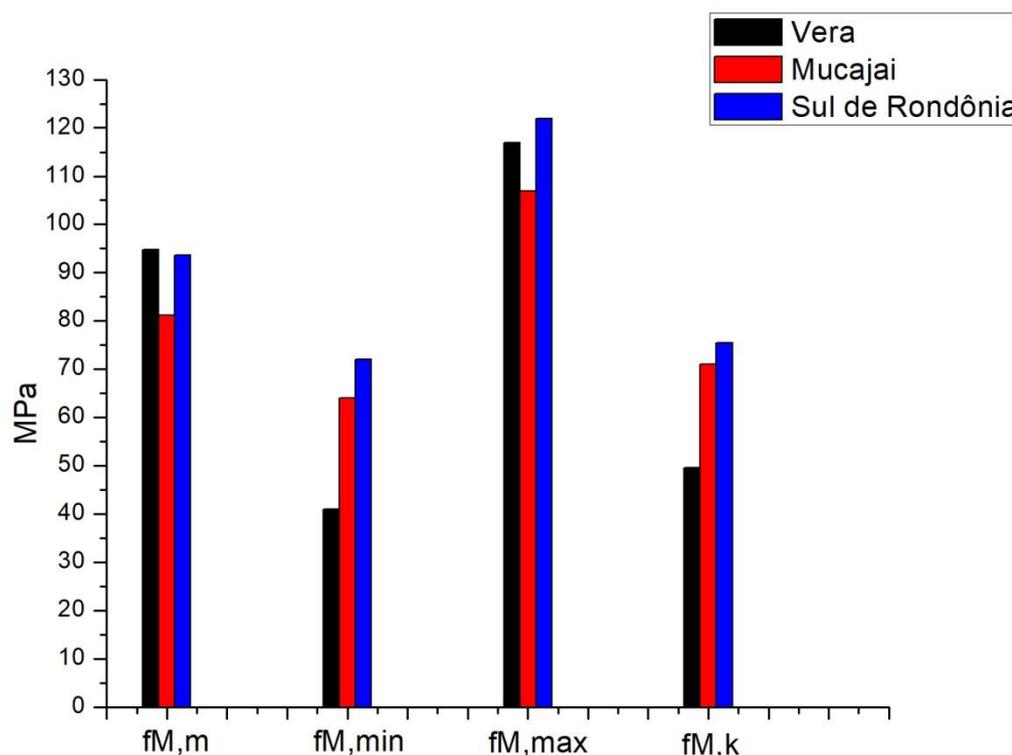


Fonte: Próprio Autor (2019)

Observando os valores para a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras, os valores para as três regiões foram distintos, variando de 4,93 MPa para a região Sul de Rondônia até 7,55 MPa para a região de Vera, com o valor intermediário de 6,63 MPa para a região de Mucajaí.

Analisando os valores médios da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, os valores de todas as regiões foram superiores ao valor disposto na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), igual a 5,8 MPa. Os valores variaram de 7,86 MPa para a região Sul de Rondônia a 9,55 MPa para a região de Mucajaí.

Figura 4.4 - Comparativo entre as resistências à flexão estática das três regiões.



Fonte: Próprio Autor (2019)

Pode-se observar da Figura 4.4 que a resistência característica na flexão estática teve diferença significativa entre os valores da região de Vera e das regiões de Mucajai e Sul de Rondônia, com $f_{M,k}$ igual a 49,62 MPa para a região de Vera, 71,07 MPa e 75,43 MPa para as regiões de Mucajai e Sul de Rondônia, respectivamente.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) define como valores máximos para o coeficiente de variação (C_v) para que a caracterização seja considerada adequada, sendo 18% para esforços normais e 28% para tensões tangenciais. Vale destacar que a maioria das propriedades atenderam aos requisitos dispostos na norma ABNT NBR 7190 (1997).

As madeiras de Cambará podem ser classificadas como madeira medianamente pesada, conforme Melo et al (1990). Seu uso não é recomendado em estruturas de médio e grande porte. Lahr et al (2016c) classificaram a madeira de Cambará como madeira pesada, mas a densidade aparente obtida neste estudo foi igual a 0,68 g/cm³, valor superior ao encontrado para as madeiras da presente pesquisa.

É importante destacar que os valores das retrações radial e tangencial obtidas neste trabalho foram inferiores aos valores obtidos por Lahr et al (2016c) e próximas aos valores

obtidos por Dias e Lahr (2004). Em todos os trabalhos, a retração radial ($\epsilon_{r,2}$) foi menor que a retração tangencial ($\epsilon_{r,3}$).

Quanto à classificação das madeiras de Cambará nas classes de resistência, a madeira extraída de Vera foi classificada na classe C40 de resistência. A madeira proveniente do Sul de Rondônia foi classificada na classe C30 de resistência, mesma classificação obtida por Segundinho et al. (2013) e por Lahr et al. (2016c). E a madeira extraída de Mucajaí foi classificada na classe C20 de resistência, mesma classificação obtida por Dias e Lahr (2004).

A resistência à compressão avaliada neste estudo foi próxima à resistência a compressão da *Cedrella sp.* (33 MPa) realizado por Dias e Lahr (2004); Paricá (24 MPa), realizado por Almeida et al. (2013) e do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage (37.34 MPa), realizado por Müller et al. (2014).

Os resultados das propriedades mecânicas (f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} , f_{v0} , f_{s0} , f_M , E_{c0} , E_{t0} , E_M , f_{H0} , f_{H90} , W) encontradas neste trabalho foram próximos aos resultados obtidos nos estudos de Dias e Lahr (2004), Lahr et al. (2016) e também próximo aos dados disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2018).

A Tabela 4.4 mostra os resultados (P-valores) da ANOVA de Kruskal-Wallis encontrados utilizando o programa BioEstat 5.3, para cada propriedade física e mecânica, confrontando uma região com o conjunto de resultados das três regiões [Ver, Muc, SRO], 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.	Verx{Ver, Muc, SRO}	Mucx{Ver, Muc, SRO}	SROx{Ver, Muc, SRO}
ρ_{12}	0,0994	0,1092	0,9619
$\epsilon_{r,2}$	0,1398	0,3407	0,6003
$\epsilon_{r,3}$	0,7841	0,7478	0,9620
f_{c0}	0,1390	0,0699	0,7385
f_{t0}	0,9430	0,6167	0,6679
f_{t90}	0,7110	0,5827	0,3580
f_{v0}	0,9711	0,2181	0,2333
f_{s0}	0,5511	<u>0,0122</u>	<u>0,0021</u>
f_M	0,2522	0,1073	0,6419
f_{H0}	0,1043	0,0775	0,8861
f_{H90}	0,4031	0,4383	0,1072
f_{c90}	0,0877	0,5986	0,2368
W	0,5836	0,2679	0,5756

E_{c0}	0,1530	0,0741	0,7209
E_{t0}	0,4045	0,3912	0,9810
E_M	0,3172	0,3530	0,9430
E_{c90}	0,4748	0,2838	0,7209

Fonte: Próprio Autor (2019)

Os dados da Tabela 4.4 indicaram que as regiões de Mucuri e Sul de Rondônia, quando avaliadas separadamente, apresentam resultados das propriedades com 94% de equivalência em relação ao conjunto das propriedades da espécie Cambará das três regiões, enquanto a região de Vera apresenta plena equivalência (100%) com as propriedades conjuntas.

A Tabela 4.5 mostra os (p-valores) da ANOVA, encontrados 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 [Ver, Muc, SRO].

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

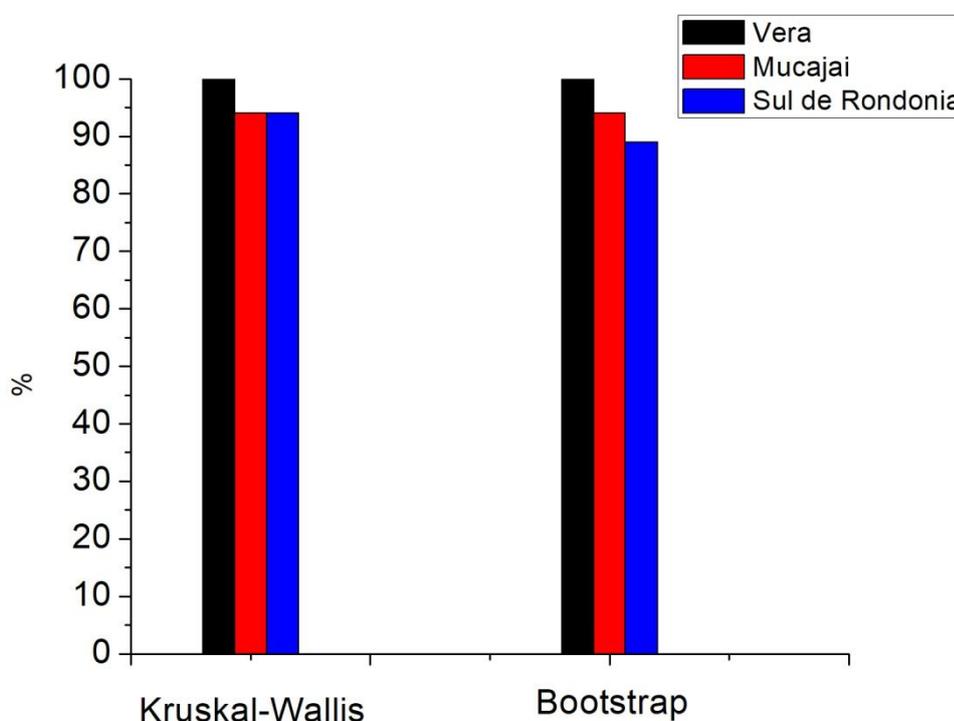
Prop.	Verx{Ver, Muc, SRO}	Mucx{Ver, Muc, SRO}	SROx{Ver, Muc, SRO}
ρ_{12}	0,1320	0,1861	0,1786
$\varepsilon_{r,2}$	0,0841	0,2516	0,3492
$\varepsilon_{r,3}$	0,3591	0,1903	0,2902
f_{c0}	0,1350	0,0884	0,3584
f_{t0}	0,2507	0,4556	0,2484
f_{t90}	0,2961	0,4902	0,3239
f_{v0}	0,0762	0,2570	0,2174
f_{s0}	0,4318	<u>0,0189</u>	<u>0,0056</u>
f_M	0,4642	0,1388	0,4645
f_{H0}	0,0950	0,0698	0,3427
f_{H90}	0,2868	0,1397	0,4387
f_{c90}	0,0909	0,3597	0,2303
W	0,3112	0,3279	0,4280
E_{c0}	0,1331	0,1329	0,1145
E_{t0}	0,4521	0,3516	<u>0,0045</u>
E_M	0,1993	0,2874	0,3236
E_{c90}	0,4219	0,2224	0,2755

Fonte: Próprio Autor (2019)

Os resultados da Análise de Variância disposto na Tabela 4.5 mostraram que as regiões de Mucajaí e Sul de Rondônia continuam apresentando elevado índice de equivalência, mantendo 94% para a região de Mucajaí e 89% para a região Sul de Rondônia. A região de Vera continuou mantendo plena equivalência com os resultados conjuntos das propriedades do Cambará das três regiões de extração. Pode-se observar que a técnica de reamostragem inclusive agravou a taxa de equivalência da região Sul de Rondônia, reduzindo de 94% na ANOVA de Kruskal-Wallis para 89% na ANOVA com extrapolação de resultados com a técnica de reamostragem.

A Figura 4.5 ilustra os resultados dos p-valores equivalentes obtidos na ANOVA de Kruskal-Wallis e pela técnica de reamostragem.

Figura 4.5 - Comparativo entre o índice de equivalência das três regiões.



Fonte: Próprio Autor (2019)

Considerando os resultados dispostos, tem-se que as regiões de extração objeto desta pesquisa não exerceram influência nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cambará. Isto corrobora com a não consideração por parte da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) de eventuais influências nas propriedades devido às regiões de extração.

Assim, considerando os dados da presente pesquisa, pode-se considerar os dados para as propriedades da madeira de Cambará de forma homogênea, não havendo a

necessidade de caracterização por lotes de madeira, podendo adotar os valores dispostos na Norma Brasileira NBR 7190 para fins de projeto com uso estrutural caso não haja caracterização de determinado lote.

Lahr et al (2016a) também obtiveram resultados semelhante na avaliação das regiões de influência para a madeira de Jatobá extraída de três locais distintos. Porém, Silva et al (2018) encontraram resultados distintos para a avaliação da influência das regiões de extração na madeira de Cupiúba, havendo influência nas propriedades físicas e mecânicas devido à região de extração.

A Tabela 4.6 mostra os melhores ajustes obtidos por propriedade levando em conta 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 , o coeficiente de determinação (mede a qualidade do ajuste) e o p-valor sendo a probabilidade P que permite julgar a representatividade (P-valor<0,05) ou a não representatividade (P-valor>0,05) dos modelos testados. Vale ressaltar que os modelos ajustados foram estimados pela densidade aparente, cujo intervalo de valores é 0,47 a 0,67 g/cm³.

Tabela 4.6 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão.

Prop.	Modelo	P-valor	a	b	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	Exponencial	<u>0,0000</u>	0,39	4,05	$\varepsilon_{r,2} = a \cdot e^{b \cdot \rho_{12}}$	46,96
$\varepsilon_{r,3}$	Linear	<u>0,0007</u>	-1,53	15,51	$\varepsilon_{r,3} = a + b \cdot \rho_{12}$	28,72
f_{c0}	Linear	<u>0,0012</u>	-2,62	78,75	$f_{c0} = a + b \cdot \rho_{12}$	26,70
f_{t0}	Linear	0,1868	13,61	84,71	$f_{t0} = a + b \cdot \rho_{12}$	5,07
f_{t90}	Logarítmico	0,1567	4,18	2,40	$f_{t90} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	5,82
f_{v0}	Linear	0,3389	12,44	-6,36	$f_{v0} = a + b \cdot \rho_{12}$	2,69
f_{s0}	Logarítmico	0,4407	0,67	0,26	$f_{v0} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	1,76
f_M	Geométrico	0,1279	128,64	0,67	$f_M = a \cdot \rho_{12}^b$	6,68
f_{H0}	Logarítmico	0,5931	47,30	-12,48	$f_{H0} = a + b \cdot \ln(\rho_{12})$	0,85
f_{H90}	Geométrico	0,0794	58,92	0,837	$f_{H90} = a \cdot \rho_{12}^b$	8,77
f_{c90}	Linear	<u>0,0018</u>	-1,09	13,50	$f_{c90} = a + b \cdot \rho_{12}$	25,10

W	Exponencial	0,1255	0,20	1,63	$W = a \cdot e^{b \cdot \rho_{12}}$	6,76
E_{c0}	Linear	<u>0,0007</u>	-5775	28713	$E_{c0} = a + b \cdot \rho_{12}$	28,83
E_{t0}	Linear	0,2028	3347	12807	$E_{t0} = a + b \cdot \rho_{12}$	4,73
E_M	Linear	0,0963	2887	12898	$E_M = a + b \cdot \rho_{12}$	7,92
E_{c90}	Geométrico	0,3124	596	0,29	$E_{c90} = a + b \cdot Ln(\rho_{12})$	3,00

Fonte: Próprio Autor (2019)

Apenas cinco modelos de regressão foram considerados significativos pela ANOVA (p-valor < 0,05), todos apresentando coeficiente de determinação (R^2) inferior a 50%, indicando a má qualidade no ajuste feito (MONTGOMERY,2005). Desta forma, assim como no estudo de Lahr et al. (2016c), não há a possibilidade de estimar propriedades físicas e mecânicas do Cambará em função da densidade aparente.

Vale ressaltar que Christoforo et al. (2017a) avaliaram a relação entre a densidade aparente e as propriedades físicas e mecânicas da espécie de madeira *Calycophyllum multiflorum* e encontraram relações com boa qualidade no ajuste ($R^2 > 70\%$), assim como Lahr et al (2016b) para a espécie de madeira *Vatairea sp.*. Porém, Aquino et al (2018) não encontraram relações entre densidade aparente e propriedades físicas e mecânicas da *Copaifera sp.*, bem como Christoforo et al. (2017b) para a espécie de madeira *Anadenanthera colubrina*.

A variabilidade do comportamento da densidade aparente estimar propriedades é mostrada pelo estudo efetuado por Almeida et al (2016b) e Almeida et al. (2017), onde não foi possível efetuar esta estimativa e no estudo de Christoforo et al (2014), onde foi possível estimar a tenacidade em função da densidade aparente.

5. CONCLUSÕES

As propriedades físicas e mecânicas das amostras da espécie de madeira Cambará foram determinadas experimentalmente com base na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Na presente pesquisa, algumas propriedades apresentaram poucas divergências, com a região de extração não tendo influência nas propriedades físicas e mecânicas. As madeiras de Cambará de cada região de extração foram classificadas nas classes C20, C30 e C40 de resistência. Estas classificações foram superiores ao valor de referência disposto na norma ABNT NBR 7190 (1997) e também os valores médios para a resistência à compressão foram superiores ao valor disposto no Anexo E da Norma, com exceção o lote proveniente da região de Mucajaí.

Considerando os dados da presente pesquisa, corrobora-se com a consideração disposta na Norma Brasileira da não consideração do fator local de extração na caracterização da espécie Cambará. Desta forma, os lotes extraídos de locais distintos não apresentaram diferenças entre propriedades, com estas podendo ser consideradas homogêneas. Desta forma, não há a necessidade de caracterização da madeira de Cambará por lotes, podendo ser utilizados os dados dispostos no Anexo E da NBR 7190 para fins de projeto estrutural.

A análise de variância (ANOVA) apresentou plena equivalência para a madeira de Cambará extraída da região de Vera quando comparada ao conjunto de resultados. As regiões de Mucajaí e Sul de Rondônia apresentaram índice de equivalência igual a 94%. Com o uso da técnica de reamostragem, houve redução do índice de equivalência da região Sul de Rondônia para 89%. Para as regiões de Vera e Mucajaí, houve manutenção dos índices de equivalência obtidos nas ANOVA.

A maioria dos modelos de regressão utilizados para estimativa das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cambará em função da densidade aparente não foi significativo pela ANOVA e os modelos que foram significativos apresentaram coeficiente de determinação (R^2) inferior a 50%. Isto implica na impossibilidade de estimar propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. H et al. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais, **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1175-1181, 2013.
- ALMEIDA, D. H. et al. Tenacidade da Madeira como Função da Densidade Aparente. **Revista Árvore**, Viçosa (MG), v. 38, n. 1, p. 203-207, 2014.
- ALMEIDA, D. H. et al. Determinação da rigidez de *Pinus elliotti* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba (SP), v. 44, n. 110, p.303-309, jun. 2016a.
- ALMEIDA, T. H. et al. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 67-71, 2016b.
- ALMEIDA, D. H. et al. Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. **BioResources**. v. 12, p. 6579-6590, 2017.
- AQUINO, V. B. M. et al. Physical and Mechanical Characterization of *Copaifera sp.* Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, p. 55-58, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. **Estudo Setorial 2009 Ano Base 2008**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/2009.pdf>>. Acesso em 21 mai. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.
- AYRES, M. et al. **BioEstat 5.0**: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Belém: MCT; IDSM; CNPq, 2007. 364 p. il. Acompanha CD-ROM.
- BEECH, E. et al.. GlobalTreeSearch - the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**. DOI:10.1080/10549811.2017.1310049
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro. **Cedrinho**. Disponível em: <<http://sistemas.florestal.gov.br/madeirasdobrasil/caracteristicas.php?ID=98&caracteristica=80>>. Acesso em 24 mai. 2018.
- CAVALHEIRO, R. S. et al. Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 107-112, 2016.
- CHRISTOFORO, A. L. et al. 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. et al. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 23-27, 2016.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Full Characterization of *Calycophyllum Multiflorum* wood specie. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, Jaboticabal-SP, v.37, n.4, p. 637-643, jul/ago, 2017a.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Full Characterization of *Anadenanthera colubrina* wood specie. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, Jaboticabal-SP, v.37, n.4, p. 367-384, jul/ago, 2017b.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R.; Estimativa de Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira Através da Densidade Aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 102-113, jun. 2004.

FINK, G. et al. Application of European design principles to cross laminated timber. **Engineering Structures**. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.081>

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.

HOWARD, J. L.; JONES, K. C. **U.S. Timber Production, Trade, Consumption and Price Statistics, 1965-2013**. Madison, WI: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 91 p. 2016.

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. et al. Influence of Specimen Orientation on Determination of Elasticity in Static Bending. **Maderas. Ciencia y Tecnología** (Impresa), v. 17, p. 229-238, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARZATION - ISO - ISO 3131. **Wood – determination of density for physical and mechanical tests**. 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARZATION - ISO - ISO 3133. **Wood – determination of ultimate strength in static bending**. 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARZATION - ISO - ISO 3787. **Wood – determination of ultimate stress in compression parallel to grain**. 1976.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS - IPT. **Informações sobre madeiras - Cedrinho**. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=9 >. Acesso em 25 mai. 2018.

LAHR, F. A. R. et al. 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, 2016a.

LAHR, F. A. R. et al. Full Characterization of *Vatairea sp.* Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 92-96, 2016b

LAHR, F. A. R. et al. Full Characterization of *Erisma uncinatum Warm.* Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 147-150, 2016c.

LOGSDON, N.B. Estudo comparativo sobre a maneira de obter a densidade aparente a 12% de umidade. **Anais do Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 4. USP, EESC, SET, LaMEM, v.4, P.31-42, São Carlos, 1992.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. Vol. 2. 2ª ed. Nova Odessa-SP: Editora Plantarum, 1998.

MACHADO, J. S. et al. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia menaloxylon* R. Br.) **Materials and Design**, v. 56, p. 975-980, 2014.

MEIRELLES, C. R. M. et al. **Evolução das Coberturas em Madeira no Brasil**. Equador, CLEFA: 2005.

MELO, J. E. et al. Classes de densidade de madeira para a Amazônia brasileira. In: **Anais do Congresso Florestal brasileiro** 6:695-699. São Paulo, SP, Brasil, 1992.

MINAS GERAIS. Fundação João Pinheiro. **Déficit Habitacional no Brasil 2015**. Belo Horizonte, 2018. 78 p. Disponível em: < <http://fjp.mg.gov.br/index.php/docman/direi-2018/estatistica-e-informacoes/797-6-serie-estatistica-e-informacoes-deficit-habitacional-no-brasil-2015> >. Acesso em 21 mai. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis in experiments**. Arizona: John Wiley & Sons, 2012, 730p.

MÜLLER, B. V. et al. Avaliação das Principais Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Floresta e Ambiente**, 21(4), p. 535-542 out./dez, 2014.

NAZAR, N. **Fôrmas e escoramentos para edifícios: Critérios para dimensionamento e escolha do sistema**. São Paulo: Pini, 2007

O'BORN, R. Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study from the world's longest timber bridge design in Norway. **Transportation Research Part D**. v. 59, p. 301-312, 2018.

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.

QASASS, R. et al. Timber framing factors in Toronto residential house construction. **Architectural Science Review**, v. 57, n. 3, p. 159-168, 2014.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Avaliação de Vigas de Madeira Laminada Colada de Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.) **Revista Cerne**. Lavras (MG), v. 19, p. 441-449, jul/set, 2013.

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.

SILVA, C. E. G. et al. Influence of the Procurement Site on Physical and Mechanical Properties of Cupiúba Wood Species. **BioResources**. v. 13, p. 4118-4131, 2018.