

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

**RELAÇÃO ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DE PEÇAS
ESTRUTURAIS E DE CORPOS DE PROVA DE MADEIRAS
TROPICAIS**

Tamiris Luiza Soares Lanini

São Carlos
2018

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

**RELAÇÃO ENTRE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DE PEÇAS
ESTRUTURAIS E DE CORPOS DE PROVA DE MADEIRAS
TROPICAIS**

Tamiris Luiza Soares Lanini

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: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos
2018



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 da candidata Tamiris Luiza Soares Lanini, realizada em 07/03/2018:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
USP

Prof. Dr. Luciano Donizeti Varanda
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem ele nada seria possível.

À minha família, Marlene Adelaide Soares, Núbia Taísa Soares Lanini, João Felipe Alves da Cruz, João Pedro Lanini da Cruz e Otavio Lanini, por todo apoio e pela oportunidade que me proporcionaram de seguir meus estudos na área em que escolhi.

Agradeço também aos meus amigos, essencialmente a Gabriela Maria Lucera, que me ajudaram em todas as dificuldades que encontrei nesta nova fase da minha vida longe de tudo e todos.

Ao meu Orientador Prof. Dr. André Luis Christoforo, e aos educadores Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr e Prof. Dr. Roberto Vasconcelos Pinheiro, que não mediram esforços para me auxiliar nesta conquista.

Sem vocês nada seria.

RESUMO

LANINI, T. L. S. **Relação entre módulos de elasticidade de peças estruturais e de corpos de prova de madeiras tropicais.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

Em termos de sustentabilidade e construção civil, a madeira, material natural, renovável e de fácil obtenção, apresenta, entre os demais materiais de construção civil, boa relação entre resistência e densidade, e devido a sua versatilidade é uma excelente alternativa de emprego. Para tanto, a normativa brasileira que regulamenta projetos de estruturas de madeira estabelece premissas e métodos de cálculo para o dimensionamento de estruturas, bem como os métodos de ensaio para obtenção das propriedades físicas e mecânicas do material. Ressalta-se que, a determinação das propriedades de resistência e rigidez se baseia em corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos que podem diferir das peças estruturais e afetar diretamente o desempenho de estruturas projetadas, como evidenciam estudos aplicados às madeiras de florestas plantadas (*Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp.). Assim, o objetivo deste estudo foi investigar, com o auxílio dos ensaios de flexão estática e vibração transversal e da análise de variância, a equivalência entre o módulo de elasticidade obtido a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e de peças de dimensões estruturais, considerando-se cinco espécies de madeiras tropicais: Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* spp.), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm.), Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.) e Peroba Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.), distribuídas nas classes de resistência do grupo das folhosas. Ao nível de significância de 5%, constatou-se: confiabilidade ao método da vibração transversal para obtenção do módulo de elasticidade (p-valor 0,647); equivalência das médias entre módulos de elasticidade na flexão estática e na compressão paralela às fibras de peças estruturais e de corpos de prova (p-valor de 0,767 e 0,308, respectivamente). Portanto, os módulos de elasticidade obtidos por meio dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em corpos de prova podem ser considerados como propriedades de peças estruturais.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira. Rigidez. Madeiras de Florestas Nativas. Vibração Transversal.

ABSTRACT

LANINI, Tamiris Luiza Soares. **Relação entre módulos de elasticidade de peças estruturais e de corpos de prova de madeiras tropicais.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

*In terms of sustainability and civil construction, wood, a natural, renewable and easily obtainable material, has a good relation between resistance and density, and due to its versatility, it is an excellent alternative for employment. Therefore, the Brazilian legislation regulating wood structures projects establishes assumptions and calculation methods for the design of structures, as well as the test methods for obtaining the physical and mechanical properties of the material. It should be noted that the determination of strength and stiffness properties is based on test specimens of small dimensions and free of defects that may differ from structural parts and directly affect the performance of projected structures, as evidenced by studies applied to planted forest woods (*Pinus sp.* And *Eucalyptus sp.*). Thus, the objective of this study was to investigate the equivalence between the modulus of elasticity obtained from test specimens of small dimensions and free of defects and of parts with the aid of the tests of static flexion and transverse vibration and analysis of variance. (*Caryocar villosum* Aubl.) and *Peroba Mica* (*Aspidosperma polyneuron* Müll.), were studied in the study of five tropical wood species: *Caixeta* (*Simarouba amara* Aubl.), *Tuari* (*Couratari spp.*), *Cambará* (*Erisma uncinatum* Warm. Arg.), Distributed in the resistance classes of the hardwood group. At the significance level of 5%, it was verified: reliability to the transverse vibration method to obtain the modulus of elasticity (p -value 0.647); equivalence of the means between modulus of elasticity in the static flexion and in the compression parallel to the fibers of structural parts and specimens (p -value of 0.767 and 0.308, respectively). Therefore, the moduli of elasticity obtained through the tests of static bending and parallel compression to the fibers in specimens can be considered as properties of structural parts.*

Key-words: Structures of wood. Rigidity. Woods of Native Forests. Transverse Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de Vibração Transversal.	45
Figura 2: Ensaio de Flexão Estática em Corpos de Prova normatizados.	46
Figura 3: Ensaio de Flexão Estática em Peças Estruturais.	47
Figura 4: Ensaio de Compressão Paralela às fibras em Corpos de Prova normatizados.	48
Figura 5: Ensaio de Compressão Paralela às fibras em Peças Estruturais.	50
Figura 6: Resultados obtidos dos módulos de elasticidade: vibração transversal (a), flexão estática em peças estruturais (b), flexão estática em corpos de prova (c).	54
Figura 7: Resultados obtidos dos módulos de elasticidade dos corpos de prova (a) e das peças de dimensões estruturais (b).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas da Caixeta.....	17
Tabela 2: Propriedades mecânicas da Caixeta.....	18
Tabela 3: Propriedades físicas do Tauari.	20
Tabela 4: Propriedades mecânicas do Tauari.	21
Tabela 5: Propriedades físicas do Cambará.	23
Tabela 6: Propriedades mecânicas do Cambará.	23
Tabela 7: Propriedades do Cambará conforme a NBR 7190:1997.....	24
Tabela 8: Caracterização da espécie <i>Erisma uncinatum</i> Warm.	25
Tabela 9: Propriedades mecânicas do Cambará por Arruda, Menezzi e Andrade.	26
Tabela 10: Propriedades físicas do Piquiá.....	27
Tabela 11: Propriedades mecânicas do Piquiá.	28
Tabela 12: Caracterização da espécie de Piquiá (<i>Caryocar villosum</i> Aubl.).	28
Tabela 13: Propriedades físicas da Peroba Mica.	30
Tabela 14: Propriedades mecânicas da Peroba Mica.	30
Tabela 15: Caracterização da espécie Peroba-Mica (<i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll. Arg.).	31
Tabela 16: Classificação mecânica da Cupiúba por Carreira e Candian.	40
Tabela 17: Análise estatística Carreira e Candian.	41
Tabela 18: Análise das relações entre técnicas não destrutivas e destrutivas.	42
Tabela 19: Valores de $\rho_{ap,12m\u00e9dia}$ e $f_{c0,k}$ das espécies estudadas.	52
Tabela 20: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade das peças estruturais (Est ×VT).	55
Tabela 21: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade das peças estruturais (Est x CP).....	55
Tabela 22: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras entre amostras e as peças de dimensões estruturais (CP×Est).	58

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Características das Espécies de Madeiras Tropicais Avaliadas.....	16
2.1.1 Madeira de Caixeta (Simarouba amara Aubl.).....	16
2.1.2 Madeira de Tauari (Couratari spp.)	19
2.1.3 Madeira de Cambará (Erismia uncinatum Warm.).....	22
2.1.4 Madeira de Piquiá (Caryocar villosum Aubl.)	26
2.1.5 Madeira de Peroba Mica (Aspidosperma polyneuron Müll. Arg.).....	29
2.2 Estimativa de Propriedades da Madeira	31
2.3 Diferenças de Propriedades entre Amostras e Peças de Dimensões Estruturais	36
2.4 Obtenção de Propriedades da Madeira pelo Método de Vibração Transversal	38
2.5 Conclusões da Revisão	42
3. MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 Propriedades Mecânicas e Física das Madeiras.....	44
3.1.1 Densidade Aparente.....	44
3.1.2 Vibração Transversal	45
3.1.3 Ensaio de Flexão Estática	45
3.1.4 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras.....	48
3.2 Análise Estatística.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Ensaio de Flexão Estática e Vibração Transversal.....	53
4.2 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras.....	57
5. CONCLUSÕES.....	60
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Renovável, natural e de fácil obtenção, a madeira é um material que, em comparação aos demais materiais de construção civil (como concreto e aço, por exemplo), apresenta boa relação entre resistência e densidade e, devido sua versatilidade e maleabilidade, é utilizada como material de construção desde as civilizações remotas até hoje (CHRISTOFORO *et al.*, 2016; LAHR *et al.*, 2016).

Em inúmeros países, este material é amplamente aplicado na construção de habitações tanto em estruturas como em função decorativa. Contudo, essa realidade não se aplica ao Brasil, ainda que este apresente grande potencial para exploração do material. Tal fato se justifica pelas restrições de natureza histórico-social, escassez de mão de obra qualificada e desconhecimento das espécies e suas propriedades (PEDRESCHI *et al.*, 2005).

A escassez de estudos científicos sobre as características da madeira associada à exploração tradicional tornou o mercado madeireiro restrito a poucas espécies, potencializando o risco de extinção das madeiras comumente utilizadas. Para Sobral *et al.* (2002), a exploração madeireira da Amazônia é paradoxal pois, quando predatória, ocasiona severos danos e a longo prazo empobrece a economia da região, a contrapartida de que, manejada, promove a geração de renda e empregos, bem como a manutenção da floresta.

Assim, destaca-se a importância do incentivo à estudos quanto a caracterização de espécies de madeiras comercialmente desconhecidas, de modo a promover a inserção destas no mercado e, conseqüentemente, reduzir a intensa exploração existente sobre as espécies de madeiras tradicionalmente utilizadas (GONZAGA, 2006).

No Brasil, a norma ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, estabelece premissas e métodos de cálculo para o dimensionamento de estruturas de madeira, bem como os métodos de ensaios para obtenção das propriedades físicas e mecânicas para caracterização deste material. Nesta, as classificações das madeiras em classes de resistência têm como referência o ensaio de compressão paralela às fibras.

Considerando efeitos de rigidez, o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica da madeira que, correlacionada a outras propriedades mecânicas (como a resistência à compressão paralela, por exemplo), corrobora para classificação das madeiras para fins estruturais. A obtenção do módulo de elasticidade da madeira é feita, no Brasil, com

base nos ensaios de compressão paralela às fibras e flexão estática padronizados pelo documento normativo ABNT NBR 7190:1997.

Ressalta-se que, por recomendações normativas, os ensaios devem ser realizados em corpos de prova de pequenas dimensões isentos de defeitos, excluindo-se imperfeições naturais como nós de crescimento de galhos e desvios de fibras, por exemplo. Tal fato difere de situações reais, em que as peças estruturais apresentam imperfeições.

Para tanto, a literatura apresenta que, os valores correspondentes ao módulo de elasticidade de corpos de prova, adotados como referência pela normativa ABNT NBR 7190: 1997 para o cálculo estrutural, em algumas situações são superiores aos obtidos nas peças de maiores dimensões e, portanto, podem conduzir a um dimensionamento inseguro das estruturas de madeira (MINÁ *et al.*, 2004; ZANGIÁCOMO *et al.*, 2013).

Tais constatações, referentes às madeiras de florestas plantadas, refletem diretamente nas considerações de revisão da norma ABNT NBR 7190: 1997 ainda não em vigência. Na normativa revisada, mas ainda não divulgada, a equivalência dos resultados obtidos entre corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças de dimensões estruturais deixará de ser válida para o caso de madeiras de florestas plantadas, requerendo ensaios nas peças de dimensões estruturais.

Entretanto, a nova proposta normativa não discorre sobre a equivalência entre tais propriedades para corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças de dimensões estruturais para madeiras de florestas nativas por se acreditar na equivalência dos resultados. Para tanto, com o auxílio do ensaio de flexão estática e da análise de variância, esse estudo investigou a equivalência entre o módulo de elasticidade obtido a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças de dimensões estruturais para madeiras de florestas nativas, antes que a nova norma entre em vigor.

Como não há especificações nacionais a respeito de ensaios em peças de madeira com dimensões estruturais, a rigidez de tais elementos foi obtida pelo ensaio de flexão estática, limitando-se o valor do deslocamento máximo na condição de proporcionalidade entre tensão e deformação, e pela técnica de vibração transversal.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente estudo foi investigar, com o auxílio do ensaio de flexão estática e da análise de variância, a equivalência entre o módulo de elasticidade obtidos a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos (E_m^{cp}) e de peças de dimensões estruturais (E_m^{est}), considerando-se para tanto cinco espécies de madeira tropicais

(Caixeta, Tauari, Cambará, Piquiá, Peroba Mica) distribuídas nas classes de resistência do grupo das folhosas (madeiras duras).

Mais especificamente, tem-se:

- Realizar ensaios de vibração transversal, flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras nas peças de dimensões estruturais para as cinco espécies;
- Efetuar ensaios de flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras nos corpos de prova de pequenas dimensões para as cinco espécies;
- Investigar, com auxílio da análise de variância, a equivalência existente.

Ressalta-se que a estimativa dos valores de E_m^{est} também foi investigada pelo método de vibração transversal, pois, em termos comerciais, o equipamento de vibração transversal tem valor significativamente menor se comparado ao preço de uma máquina universal de ensaios para a obtenção do E_m^{est} .

1.2 JUSTIFICATIVAS

A normativa brasileira ABNT NBR 7190:1997 regulamenta projetos de estruturas de madeira por meio de premissas e métodos de cálculo, bem como métodos de ensaios para obtenção de propriedades deste material. Ressalta-se que, a revisão da normativa, ainda não divulgada, tem como intuito a uniformidade do dimensionamento e obtenção de propriedades do material, atendendo aos requisitos de segurança.

Todavia, a segurança é atestada com base no conhecimento do material utilizado. Assim, os resultados e conclusões comprovadas pela literatura recente contribuem de maneira efetiva para o avanço do dimensionamento de estruturas de madeira.

Neste contexto, a consideração de possível equivalência entre propriedades obtidas de corpos de prova e de peças estruturais para madeiras de florestas tropicais não foi devidamente avaliada para nova redação da norma brasileira, que supõe equivalência para tal relação.

Entretanto, devido a inexistência de estudos que atestem esta equivalência, há possibilidade de diferenças significativas nos valores das propriedades. Tal fato pode comprometer o projeto de estruturas de madeira, requerendo assim, de maneira emergencial, estudos que venham a contribuir nesse sentido.

Ainda, a técnica não destrutiva de vibração transversal se apresenta como uma ferramenta aliada aos resultados dos ensaios mecânicos e de modelos de regressão para estimativa das propriedades da madeira, uma vez que o equipamento utilizado tem custo significativamente inferior ao custo de máquinas universais de ensaio utilizadas na determinação das propriedades de resistência e de rigidez da madeira.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido apresenta, ao total, seis capítulos.

O capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica, no qual são apresentadas pesquisas relacionadas às espécies de madeira estudadas, estimativas das propriedades da madeira, diferenças entre propriedades mecânicas de amostras e peças estruturais e obtenção de tais propriedades pelo método da vibração transversal. As pesquisas expostas e dados apresentados dão embasamento ao estudo e propriedades para posterior discussão.

O capítulo 3 revela os materiais e métodos empregados nesta pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões pertinentes ao estudo, embasados na literatura científica.

O capítulo 5 evidencia as conclusões sobre o presente estudo.

E por fim, expõem-se as referências utilizadas como base deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção discorre sobre pesquisas a respeito das espécies de madeira utilizadas no presente estudo (origem, características e propriedades), e apresenta trabalhos em que foram investigadas as diferenças nas propriedades mecânicas obtidas a partir de corpos de prova e peças de dimensões estruturais. A busca dos trabalhos componentes da revisão de literatura foi realizada em bases de dados como Web of Science, Portal Capes Periódicos, Scopus, Engineering Village, Google Scholar e ainda, em várias páginas de revistas associadas à madeira e a estruturas de madeira.

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES DE MADEIRAS TROPICAIS AVALIADAS

As espécies de madeiras tropicais empregadas neste estudo são a Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* spp.), Cambará (*Erisma uncinatum* Warm.), Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.) e Peroba Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.). Tais madeiras estão distribuídas nas classes de resistência do grupo das folhosas.

A exposição da literatura nas seções 2.1.1 a 2.1.5 se baseia em estudos recentes das espécies analisadas, considerando a apresentação de dados quanto às propriedades físicas e mecânicas relevantes para cada espécie.

2.1.1 MADEIRA DE CAIXETA (*Simarouba amara* Aubl.)

A madeira popularmente conhecida por Caixeta, Caxeta, Marupá, dentre outros, cientificamente denominada *Simarouba amara* Aubl. é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural em alguns estados brasileiros como Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Como características gerais, apresenta cerne e alburno indistintos pela cor, esbranquiçado a levemente amarelado e brilho moderado, com parênquima axial, raios e vasos visíveis a olho nu. Ainda, a Caixeta possui densidade baixa, grã direita, textura média a grossa e superfície lustrosa (IPT, 2017).

É uma espécie suscetível à ação de fungos manchadores, com baixa durabilidade a fungos apodrecedores e ataque de cupins, mas facilmente preservável por meio de processos

sob pressão com o uso de creosoto (retenção de preservativo oleossolúvel acima de 300 kg/m³) e CCA (hidrossolúvel). A penetração é dita como total e uniforme (IPT, 2017).

O processo de secagem desta madeira pode ocorrer ao ar livre, desde que haja correto empilhamento em área coberta de modo a evitar rachaduras e empenamentos. O procedimento pode ser rápido, sem a ocorrência de defeitos, ou muito rápido, com pequenos efeitos de torcimento médio. Ainda, este processo realizado em secadores convencionais também não exibe defeitos. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da espécie (IPT, 2017; JANKOWSKY, 1990).

Tabela 1: Propriedades físicas da Caixeta.

Propriedades físicas	
Densidade (kg/m ³)	
$\rho_{ap,12}$	440
ρ_v	1.120
$\rho_{básica}$	370
Contração (%)	
Radial	4,8
Tangencial	6,8
Volumétrica	11,8

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_v = densidade acima do ponto de saturação das fibras; $\rho_{básica}$ = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 2: Propriedades mecânicas da Caixeta.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	33	19,5
f_{c90} (MPa)	4,4	2,8
f_M (MPa)	64	43,6
E_M (MPa)	7.257	6.570
f_{v0} (MPa)	7	6
f_{H0} (N/cm ²)	2.707	1343
f_{H90} (N/cm ²)	1.402	1.206
f_{t90} (MPa)	-	3,6

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{H90} = dureza Janka normal às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Devido às características apresentadas, a Caixeta pode ser utilizada na construção civil em aplicações leves internas, como cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris. Ainda, esta espécie é empregada no setor mobiliário, como móveis padrão, ou para usos gerais, como chapas compensadas (IPT, 2017).

Freitas, González e Menezzi (2016) avaliaram a influência do tratamento termomecânico quanto às propriedades colorimétricas e módulo de elasticidade da madeira da espécie *Simarouba amara* Aubl., com finalidade de aplicação ao segmento de pisos. Verificou-se mudanças significativas sob efeitos da temperatura na cor e propriedade de elasticidade, apontando de modo geral uma melhora no módulo de elasticidade dinâmico com variação da velocidade de acordo com cada tratamento apresentado (valores mais baixos para tratamentos com pressões maiores). Após os tratamentos, as cores da espécie analisada juntamente à propriedade de elasticidade potencializam seu uso na indústria de pisos.

Teles (2014) analisou o estado de sanidade de três espécies de madeiras tropicais Amazônicas, Caixeta (*Simarouba amara*), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipteryx odorata*), nas hipóteses tratadas e não tratadas quimicamente com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) e submetidas a ensaios de intemperismo acelerado em laboratório. Constatou-se que, considerando seis diferentes tempos de exposição (variando de zero a 1200 horas), a densidade aparente da Caixeta se manteve na ordem de 0,4 g/cm³.

Cassiano *et al.* (2013) avaliaram as variações e estimativas das umidades de equilíbrio (UE) para sete distintas espécies de madeira, dentre as quais se enquadra a popular Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), nas condições climáticas do município de Sinop, Estado de Mato Grosso, no período de 10/04/2011 e 09/04/2012, em ensaios de campo. A Caixeta, classificada no grupo de baixa massa específica (densidade média de 0,34 g/cm³), apresentou, comparada às demais, os maiores valores de UE alcançando 28,37%. Para esta espécie, os modelos de estimativa de Simpson (1971) e Hailwood e Harrobin (equações de um e de dois hidratos) apresentam em agrupamentos mensais valores semelhantes de UE, com erro padrão da estimativa (SEE) e raiz quadrada do erro quadrático (RMSE) de 5,09 e 4,98%, respectivamente, com ajustamentos superiores a 98%.

Stangerlin *et al.* (2013) investigaram o uso do ensaio de dureza Rockwell na caracterização da biodeterioração da madeira submetida ao ataque dos fungos apodrecedores *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda). Constatou-se que, comparada as madeiras de Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jequitibá (*Cariniana micrantha*), a Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.) possui baixa durabilidade ao ataque de tais fungos, com maior susceptibilidade ao ataque de fungos de podridão branca.

2.1.2 MADEIRA DE TAUARI (*Couratari* spp.)

Tradicionalmente denominada Tauari, a madeira do gênero *Couratari* spp. contempla, dentre outras, as espécies *Couratari guianensis* Aubl. *C. oblongifolia* Ducke et R. Knuth e *C. stellata* A. C. Sm. tratadas em conjunto devido à semelhança quanto a densidade e características anatômicas e de cor. Este gênero contempla espécies tropicais da Amazônia, com ocorrência natural nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará e Rondônia (IPT, 2017).

O Tauari apresenta como características gerais cerne e alburno indistintos pela cor, branco-amarelado a bege-amarelado-claro e brilho moderado. O cheiro varia de pouco perceptível a perceptível (desagradável), gosto levemente amargo, densidade média, grã direita e textura média. Ainda, possui parênquima axial e raios pouco visíveis a olho nu, e vasos médios visíveis a olho nu (IPT, 2017).

Quanto à durabilidade natural, as espécies que contemplam tal gênero possuem baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos e tendência ao desenvolvimento de manchas, o que condiciona seu uso seco. Submetido a ensaios de laboratório sob pressão, este material se mostrou permeável às soluções preservantes e, portanto, é facilmente tratado com creosoto (oleossolúvel) e CCA-A. As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Tauari (IPT, 2017).

Tabela 3: Propriedades físicas do Tauari.

Propriedades físicas	
Densidade (kg/m ³)	
$\rho_{ap,12}$	610
ρ_v	1.100
$\rho_{básica}$	500
Contração (%)	
Radial	4,2
Tangencial	6,6
Volumétrica	10,9

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_v = densidade acima do ponto de saturação das fibras; $\rho_{básica}$ = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 4: Propriedades mecânicas do Tauari.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	46,8	27,2
f_{c90} (MPa)	6,1	4,5
f_M (MPa)	88,8	57,8
E_M (MPa)	10.591	9.316
f_{v0} (MPa)	8,5	6,8
f_{H0} (N/cm ²)	5.315	3.727
f_{t90} (MPa)	3,6	3,2

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Em termos de construção civil, o Tauari é usualmente empregado em esquadrias ou aplicações leves internas como ripas, partes secundárias de estruturas, cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris. Ainda, este material também atua como matéria prima do setor mobiliário e uso geral, como a fabricação de chapas compensadas, por exemplo (IPT, 2017).

Okino *et al.* (2015) analisaram a durabilidade natural de três espécies de Tauari (*Couratari guianensis* Aublet, *Couratari oblongifolia* Ducke & Knuth R. e *Couratari stellata* A.C.Smith), por meio dos parâmetros colorimétricos baseados no sistema CIE L*a*b* 1976 e da aparência da amostra de madeira antes e após o ataque dos fungos utilizados. A madeira de Tauari foi classificada como “moderadamente resistente” a “resistente” quando exposta aos fungos utilizados e o conteúdo de extrativos das amostras atacadas comparadas ao controle diminuíram (exceto *Couratari stellata* expostos a *Ganoderma applanatum*). Todas as amostras sujeita a ataques e as serragens tornaram-se mais escuros, exceto a serragem de *Couratari stellata* exposto ao fungo *Trametes versicolor*. Ao final, o ΔE^* médio das amostras e serragem sujeitas a ataques atingiram 29,5 e 14,3, respectivamente.

Referindo-se a Teles (2014) e sua análise citada anteriormente, tem-se que, submetido a ensaios de intemperismo acelerado em laboratório, considerando-se seis diferentes tempos de exposição (variando de zero a 1200 horas), nas hipóteses tratadas e não tratadas quimicamente com CCA (arseniato de cobre cromatado), a densidade aparente do Tauari se manteve na ordem de 0,6 g/cm³.

Barreto e Pastore (2009) examinaram o efeito dos extrativos na variação da cor e processo de fotodecomposição de superfícies com base nas espécies de Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Tauari (*Couratari stellata*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Marupá (*Simarouba amara*). Constatou-se que a madeira de Tauari possui resistência anormal a cor não vinculada aos extrativos. Ainda, verificou-se que o Tauari foi a espécie mais resistente à variação de cor dentre as demais do grupo estudado, seguido pela Garapeira, Marupá e Itaúba todas com extrativos.

2.1.3 MADEIRA DE CAMBARÁ (*Erisma uncinatum* Warm.)

A madeira da espécie *Erisma uncinatum* Warm, popularmente conhecida como Cambará, Cambará-rosa, Cedrilho, Jaboti, dentre outros, é uma madeira tropical da Amazônia com ocorrência natural nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Como características gerais, apresenta cerne e alborno distintos pela cor, com cerne castanho avermelhado e sem brilho. Possui cheiro e gostos imperceptíveis, densidade baixa, grã direita a reversa e textura média a grossa. Ainda, contém parênquima axial e vasos visíveis a olho nu enquanto os raios são visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial (IPT, 2017).

Em quesitos de durabilidade, o Cambará apresenta baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos. Entretanto, seu cerne e alborno são preservados de maneira relativamente fácil em meio a processos sob pressão. O processo de secagem ao ar deste material é simples e sem a ocorrência de defeitos relevantes ainda que, a secagem em estufa, também rápida, pode ocasionar empenamentos, rachaduras e endurecimento superficial em condições drásticas. As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cambará (IPT, 2017; JANKOWSKY, 1990)

Tabela 5: Propriedades físicas do Cambará.

Propriedades físicas	
Densidade (kg/m ³)	
$\rho_{ap,15}$	590
ρ_v	1.110
$\rho_{básica}$	480
Contração (%)	
Radial	3,3
Tangencial	7,7
Volumétrica	12,5

$\rho_{ap,15}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 15%; ρ_v = densidade acima do ponto de saturação das fibras; $\rho_{básica}$ = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 6: Propriedades mecânicas do Cambará.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	42,2*	33,7
f_M (MPa)	80,2*	72,5
E_M (MPa)	10.395	9.365
f_{v0} (MPa)	-	7,4
f_{H0} (N/cm ²)	-	3.844
f_{t90} (MPa)	-	4,2

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado; * = propriedade determinada com densidade aparente da madeira a 15%.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Neste contexto, a ABNT NBR 7190:1997 contempla, a caráter informativo, o Anexo E “Valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de florestamento”, que apresenta os valores médios de determinadas propriedades de resistência e rigidez de algumas espécies de madeiras nativas e de florestamento, considerando-se umidade a 12%. Este, contempla tais características da espécie *Erismia uncinatum* Warm., listadas na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades do Cambará conforme a NBR 7190:1997.

Propriedades	
$\rho_{ap(12\%)}(\text{kg/m}^3)$	544
f_{c0} (MPa)	37,8
f_{t0} (MPa)	58,1
f_{t90} (MPa)	2,6
f_{v0} (MPa)	5,8
E_{c0} (MPa)	9.067

$\rho_{ap(12\%)}$ = massa específica aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

Tratando-se da construção civil, a madeira de Cambará é usualmente empregada em elementos de uso temporário como andaimes, fôrmas para concreto e pontaletes. Ainda, também é aplicada ao uso leve interno, como lambris, molduras, guarnições, forros, ripas, além de esquadrias e usos gerais como chapas compensadas, por exemplo (IPT, 2017).

Ribeiro *et al.* (2016) estimaram os módulos de elasticidade dinâmico (MOE_d), estático (MOE) e de ruptura (MOR) das espécies *Qualea brevipedicellata* Stafleu e *Erismia uncinatum* Warm. através de ensaios destrutivos (norma COPANT) e não destrutivos com ultrassom e Stress Wave. Para tanto, foram confeccionados 20 corpos de prova por espécie, totalizando 40 corpos de prova nas dimensões 2x2x30 cm. Constatou-se que os métodos de ondas de tensão e ultrassom são eficientes para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira e que os coeficientes de variação possuem valores relativamente inferiores para o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) em relação ao estático (MOE).

Lahr *et al.* (2016) realizaram, em conformidade à ABNT NBR 7190:1997, a caracterização completa de um lote da espécie *Erismia uncinatum* Warm. Verificou-se, a 12% de umidade, que este material apresenta densidade aparente de 680 kg/m³, retratibilidade radial total (RTT) de 5,83% e retratibilidade tangencial total (RTT) equivalente a 10,55%. Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas no estudo são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Caracterização da espécie *Erismia uncinatum* Warm.

Propriedades Mecânicas	
f_{c0} (MPa)	34
f_{c90} (MPa)	7,0
E_{c0} (MPa)	12.967
E_{c90} (MPa)	7.095
f_{t0} (MPa)	45
f_{t90} (MPa)	4,9
E_{t0} (MPa)	12.764
f_{v0} (MPa)	14
f_{s0} (MPa)	0,8
f_M (MPa)	63
E_M (MPa)	12.376
f_{H0} (MPa)	51
f_{H90} (MPa)	67
T (N.m)	33,39

E_{c0} = módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras; E_{c90} = módulo de elasticidade na compressão normal às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade em esforços de tração paralela às fibras; T = tenacidade da madeira.

Fonte: Adaptado de LAHR *et al.* (2016).

Arruda, Menezzi e Andrade (2015) analisaram a madeira da espécie *Erismia uncinatum* sujeita a tratamento termomecânico com intuito de aplicação à construção civil como piso. O material foi ensaiado à flexão estática, dureza normal às fibras e compressão paralela às fibras e comparado aos dados disponibilizados pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB) para a espécie. Constatou-se que todas as propriedades obtidas a partir da madeira termomecanicamente avaliada foram inferiores às determinadas pelo SFB, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Propriedades mecânicas do Cambará por Arruda, Menezzi e Andrade.

Propriedades Mecânicas	Arruda, Menezzi e Andrade (2015) *	SFB**
E_M (MPa)	10.483	10795
f_M (MPa)	62,24	87,54
f_{H90} (N)	2.613	3864
f_{c0} (MPa)	44,91	49,75

*Resultados para madeira termomecanicamente tratada; ** Valores de referência, sem tratamento térmico.

Fonte: Adaptado de Arruda, Menezzi e Andrade (2015).

Morales e Lahr (2002) analisaram, com enfoque na obtenção do módulo de elasticidade da madeira, o número de ciclos de carregamentos sugeridos pela normativa ABNT NBR 7190:1997 para determinação das propriedades de resistência e rigidez, considerando-se entre as seis espécies analisadas, o Cambará Rosa (*Erismia* sp.) com densidade 0,67 g/cm³ inserido na classe de resistência C20 das dicotiledôneas. Para as quatro solicitações analisadas, os valores médios obtidos foram: 891 MPa em compressão normal às fibras; 12.708 MPa para compressão paralela às fibras; 11.406 MPa na flexão estática e 12.509 MPa em solicitações de tração paralela às fibras. Conclui-se que o terceiro ciclo de carregamento é desnecessário uma vez que os valores dos módulos de elasticidade se mantiveram equivalentes no segundo e terceiro ciclos de carregamento.

2.1.4 MADEIRA DE PIQUIÁ (*Caryocar villosum* Aubl.)

Cientificamente denominado *Caryocar villosum* Aubl., o Piquiá, também conhecido como Pequi, Pequi-roxo, Pequiá, Piqui, dentre outros, é uma espécie de madeira tropical Amazônica de ocorrência natural nos estados do Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato

Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. Em relação às características gerais, o Piquiá apresenta cerne esbranquiçado, levemente rosado, tornando-se amarelo-claro ou pardo-claro-amarelado. Possui cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta, grã revessa, textura grossa, com parênquima axial e raios visíveis somente sob lentes e vasos visíveis a olho nu (IPT, 2017).

Esta espécie, em ensaios laboratoriais, demonstrou alta resistência ao ataque de organismos xilófagos e baixa permeabilidade às soluções preservativas quando submetida à impregnação sob pressão. É uma madeira de difícil trabalho tanto com ferramentas manuais como mecânicas. As Tabelas 10 e 11 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Piquiá (IPT, 2017).

Tabela 10: Propriedades físicas do Piquiá.

Propriedades físicas	
Densidade (kg/m ³)	
$\rho_{ap,15}$	930
Contração (%)	
Radial	5,5
Tangencial	9,2
Volumétrica	16,7

$\rho_{ap,15}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;
 Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 11: Propriedades mecânicas do Piquiá.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,15}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	86,5	55,2
f_M (MPa)	145,7	113,6
E_M (MPa)	-	14.111
f_{v0} (MPa)	-	12,9
f_{H0} (N/cm ²)	-	5.864
f_{t90} (MPa)	-	10,1

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Aplicado à construção civil, o Piquiá é usual em condições pesadas, como dormentes ferroviários, cruzetas, postes, defensas e mourões. Tratando-se de áreas internas, esta espécie é utilizada em vigas e caibros, e, considerando-se usos gerais, embarcações, tanoaria e embalagens (IPT, 2017).

Jesus, Logsdon e Finger (2015) realizaram, em conformidade à ABNT NBR 7190:1997, a caracterização de 26 espécies nativas do Mato Grosso, dentre as quais está o Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.). As propriedades físico-mecânicas obtidas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Caracterização da espécie de Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.).

Espécie	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{ap,12}$ (kg/m ³)
Piquiá	47,22	65,31	11,73	12.488	16.848	839

$f_{c0,k}$ = resistência à compressão paralela às fibras; $f_{t0,k}$ = resistência à tração paralela às fibras; $f_{v0,k}$ = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,k}$ = módulo de elasticidade longitudinal característico; $E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade longitudinal médio; $\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%.

Fonte: Adaptado de Jesus, Logsdon e Finger (2015).

Andrade Junior *et al.* (2012) analisaram, por meio de vistorias *in loco*, a integridade de um telhado construído com madeira da espécie Piquiarana (*Caryocar glabrum*), nativa brasileira, bem como estimar as propriedades mecânicas deste material em uso há 10 anos. Por meio de um medidor eletrônico, o teor de umidade da madeira foi estimado em 12%, e através dos ensaios realizados, tem-se como valores médios: resistência a compressão paralela às fibras de 50 MPa; resistência ao cisalhamento paralelo às fibras equivalente a 18 MPa; e, por fim, densidade aparente a 12% de umidade igual a 786 kg/m³.

2.1.5 MADEIRA DE PEROBA MICA (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.)

A última espécie apresentada, cientificamente denominada por *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. e tradicionalmente conhecida por Peroba Mica, Amargoso, Peroba Açú, dentre outros, é uma espécie de madeira tropical característica da Mata Atlântica de ocorrência natural nos estados da Bahia, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo (IPT, 2017).

Tratando-se de suas características gerais, a Peroba Mica apresenta alburno indistinto e cerne róseo a amarelo-rosado uniforme ou com veios mais escuros. Possui cheiro e brilho imperceptíveis, com gosto ligeiramente amargo, densidade média, grã direita ou reversa e textura fina. Ainda, o parênquima axial é invisível (mesmo sob lente), enquanto os raios e vasos são visíveis sob lente (IPT, 2017).

Os requisitos de durabilidade deste material apresentam literatura controversa quanto ao cerne de Peroba-rosa. Observações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) permitem considerar tal espécie com moderada resistência aos cupins e baixa a moderada resistência a fungos apodrecedores. Para tanto, dormentes dessa espécie não submetidos a tratamentos preservantes apresentam vida útil média de seis anos. As Tabelas 13 e 14 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Peroba Mica (IPT, 2017).

Tabela 13: Propriedades físicas da Peroba Mica.

Propriedades físicas	
Densidade (kg/m ³)	
$\rho_{ap,15}$	790
$\rho_{básica}$	660
Contração (%)	
Radial	4,0
Tangencial	7,8
Volumétrica	13,1

$\rho_{ap,15}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 15%; $\rho_{básica}$ = densidade básica.
 Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 14: Propriedades mecânicas da Peroba Mica.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,15}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	54,4	41,6
f_M (MPa)	103,8	88,2
E_M (MPa)	-	9.248
f_{v0} (MPa)	-	11,9
f_{H0} (N/cm ²)	-	6.776
f_{t90} (MPa)	-	8,1

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Devido às características apresentadas, esta espécie é empregada na construção civil tanto em uso pesado externo, como na composição de dormentes ferroviários e cruzetas, por exemplo, como em aplicações pesadas internas, destacando-se tesouras, vigas e caibros. Ainda, a Peroba Mica é amplamente utilizada na fabricação de esquadrias, assoalhos e mobílias (IPT, 2017).

Referindo-se a Jesus, Logsdon e Finger (2015) e seu estudo citado anteriormente, dentre as 26 espécies nativas do Mato Grosso, fez-se também a caracterização da espécie Peroba-Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.). As propriedades físico-mecânicas obtidas são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização da espécie Peroba-Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.).

Espécie	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{ap,12}$ (kg/m ³)
Peroba Mica	64,98	61,34	10,35	14.650	16.263	726

$f_{c0,k}$ = resistência à compressão paralela às fibras; $f_{t0,k}$ = resistência à tração paralela às fibras; $f_{v0,k}$ = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,k}$ = módulo de elasticidade longitudinal característico; $E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade longitudinal médio; $\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%.

Fonte: Adaptado de Jesus, Logsdon e Finger (2015).

Logsdon, Finger e Borges (2007) estudaram as características da madeira de Peroba Mica por meio de descrição dendrológica e identificação da espécie, caracterização física e caracterização mecânica em conformidade à ABNT NBR 7190:1997. A espécie *Aspidosperma populifolium* apresentou: resistência característica à compressão paralela de 64,98 MPa; módulo de elasticidade longitudinal médio equivalente a 16.263 MPa; e, densidade aparente de 0,7259 g/cm³. Para tanto, a madeira se enquadra na classe de resistência C60.

Fiorelli e Dias (2002) analisaram o uso de fibras de vidro e carbono em reforço de estruturas de madeira, considerando-se as espécies *Pinus Caribea* (*Pinus Caribea* Var. *Hondurensis*) e Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*). As análises foram caracterizadas por modelos teóricos e ensaios de tração, apresentando para a madeira de Peroba Mica não reforçada: resistência à compressão paralela às fibras média de 71 MPa; resistência à tração paralela às fibras média equivalente a 95 MPa; módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras médio de 13.105 MPa; e, módulo de elasticidade em esforços de tração paralela às fibras médio igual a 17.152 MPa. Concluiu-se que para a Peroba Rosa aliada aos materiais compósitos, o aumento de rigidez foi de 10 a 25%.

2.2 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DA MADEIRA

Projetos em estruturas de madeira, desenvolvidos de modo racional, exigem do profissional responsável o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do material a

ser empregado. No Brasil, a obtenção de tais propriedades é realizada com base na norma ABNT NBR 7190:1997 que apresenta em seu Anexo B, os métodos e ensaios para caracterização completa da madeira à condição padrão de umidade em 12%.

A caracterização completa das propriedades de resistência da madeira, segundo a ABNT NBR 7190:1997, é determinada pelos seguintes valores: resistência à compressão paralela às fibras; resistência à tração paralela às fibras; resistência à compressão normal às fibras; resistência à tração normal às fibras; resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; resistência de embutimento paralelo às fibras e resistência de embutimento normal às fibras; e, por fim, densidade básica e densidade aparente, com corpos de prova a 12% de umidade.

Ainda, a normativa brasileira em vigor estabelece, para espécies pouco conhecidas, a caracterização mínima de resistência que contempla: resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras (caso haja impossibilidade da realização do ensaio de tração uniforme, que este valor deve ser equivalente ao da resistência à tração na flexão), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, e, por fim, densidades básica e aparente.

Na impossibilidade de realização dos ensaios de caracterização, a ABNT NBR 7190:1997 permite a adoção das seguintes relações para os valores característicos das resistências (Equações 2.1 a 2.7).

$$f_{c0,k}/f_{t0,k} = 0,77 \quad (2.1)$$

$$f_{tM,k}/f_{t0,k} = 1,00 \quad (2.2)$$

$$f_{c90,k}/f_{c0,k} = 0,25 \quad (2.3)$$

$$f_{e0,k}/f_{c0,k} = 1,00 \quad (2.4)$$

$$f_{e90,k}/f_{c0,k} = 0,25 \quad (2.5)$$

$$\text{Para coníferas: } f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,15 \quad (2.6)$$

$$\text{Para dicotiledôneas: } f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,0,12 \quad (2.7)$$

Considerando as equações 2.1 a 2.7, seus termos se referem à: $f_{c0,k}$ dito por resistência característica à compressão paralela às fibras; $f_{t0,k}$ equivale a resistência característica à tração paralela às fibras; $f_{tM,k}$ é a resistência característica à tração na flexão; $f_{c90,k}$ equivale a resistência característica à compressão normal às fibras; $f_{e0,k}$ é resistência característica ao embutimento paralelo às fibras; $f_{e90,k}$ equivale resistência característica ao embutimento normal às fibras; e, por fim, $f_{v0,k}$ é resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras.

Ainda, referindo-se às propriedades de rigidez, a ABNT NBR 7190:1997 especifica para caracterização completa, a determinação do valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e do valor médio do módulo de elasticidade na compressão normal às fibras, ambos referidos à condição-padrão de umidade a 12%. Para tanto, a normativa permite a adoção das seguintes relações para os valores característicos de rigidez (Equações 2.8 a 2.11).

$$E_{c0,m} = E_{t0,m} \quad (2.8)$$

$$E_{w90} = E_{w0}/20 \quad (2.9)$$

$$E_m = 0,85 \times E_{c0} \quad (\text{para coníferas}) \quad (2.10)$$

$$E_m = 0,90 \times E_{c0} \quad (\text{para dicotiledôneas}) \quad (2.11)$$

Nas Equações 2.8 a 2.11, tem-se: $E_{c0,m}$ equivale ao módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras; $E_{t0,m}$ é o módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras.

Para tanto, considerando as dificuldades associadas a caracterização completa da madeira juntamente à possibilidade de relações entre propriedades existentes (conforme permitido pela normativa em vigor), diversos estudos quanto à estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira têm sido desenvolvidos.

Aquino *et al.* (2017) desenvolveram correlações entre 27 propriedades mecânicas, densidade, coeficientes de retratibilidade e anisotropia, teor de umidade e ponto de saturação

das fibras para madeiras das espécies *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. Considerando uma única variável, a melhor correlação obtida foi entre módulo de elasticidade em solicitações de compressão paralela às fibras e a retratibilidade tangencial, com ($R^2 = 0,494$); para tanto, o menor coeficiente de determinação ocorreu para força no limite de proporcionalidade em esforços de flexão estática e a retratibilidade tangencial (com $R^2 = 0,104$). Ao final, a melhor correlação (com $R^2 = 0,93$ e p-valor $< 0,001$) foi obtida por meio de um modelo multivariado linear de estimativa do módulo de elasticidade da madeira, a condição de umidade padrão 12%, com base nos parâmetros de densidade básica e anidra, retratibilidade tangencial e radial, teor de umidade verde e coeficiente de anisotropia.

Chen e Guo (2017) avaliaram, por meio de ensaios destrutivos (flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras) e não destrutivos, as propriedades mecânicas da espécie *Abies fabri* (Mast.). Constatou-se correlações lineares significativas entre a amplitude da resistência (F) e a densidade verde (ρ), módulo dinâmico de elasticidade (ED) e módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura (MOR) e resistência à compressão máxima (UCS). Ainda, a distribuição cumulativa de MOR e UCS prevista com base nos ensaios não destrutivos é passível de ajustes por meio de distribuição normal (teste χ_2).

Hodousek *et al.* (2017) determinaram o módulo de elasticidade das espécies *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis* por meio de dois ensaios dinâmicos, *Timber Grader* (MTG) e acelerômetro, ambas vibrações longitudinais, e de ensaios de flexão estática. Para cada espécie foram realizadas correlações lineares entre valores de MOE dinâmicos e estáticos, verificando diferenças de 1,1 a 2,4% para a amostra de *Populus x canadensis* e 12,7 a 15,5% para a amostra de *Cupressus lusitanica*. Ao final, determinou-se a dependência de correlação entre os métodos aplicados por meio do desenvolvimento de equações de regressão.

Christoforo *et al.* (2017) realizaram, em conformidade à ABNT NBR 7190:1997, a caracterização completa da espécie Angico Branco (*Anadenanthera colubrina*). Com base nos resultados obtidos, foi possível estimar correlações entre as propriedades determinadas e a densidade aparente da madeira por meio de modelos de regressão linear, exponencial, quadrático e geométrico. A melhor estimativa se deu entre densidade aparente e módulo de elasticidade na direção paralela às fibras através de correlação linear, com coeficiente de determinação de 56,32%.

Almeida e Dias (2016) analisaram a propriedade de resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras em conformidade às normas brasileira (ABNT NBR 7190:1997), americana (ASTM D5764:2007) e europeia (EN 383:2007). Para todas as espécies de madeira avaliadas, constatou-se que os maiores valores médios de resistência

da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras se deu pelo método EN 383:2007, seguidos pelos métodos ASTM D5764:2007 e ABNT NBR 7190:1997, respectivamente.

Chen e Guo (2016) avaliaram, por meio de ensaios destrutivos (flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras) e não destrutivos (módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de *stress wave*; e a amplitude de resistência à penetração da broca em análise realizada com resistógrafo, as propriedades mecânicas das espécies *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra*. Por meio de regressões lineares (com p-valor < 5%), constatou-se fortes correlações entre densidade (ρ) e a amplitude da resistência (F), o módulo estático de elasticidade (MOE) e o módulo dinâmico de elasticidade (ED), o módulo de ruptura (MOR) e ED, e a resistência à compressão máxima (UCS) e ED.

Almeida *et al.* (2016) analisaram a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade aparente a umidade padrão de 12%, para as madeiras tropicais das espécies Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.). Foram elaborados modelos de regressão lineares, exponenciais, logarítmicos e geométricos, sujeitos a análises de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. Os melhores coeficientes de determinação dos modelos de regressão foram de 48,57 e 52,84% para Canafístula e Castelo, respectivamente. Para Angelim Araroba, os modelos não foram significativos, pois apresentaram p-valores superiores a 5%. O modelo de regressão elaborado para todas as espécies tratadas em conjunto foi linear, com $R^2 = 17,88\%$ e p-valor = 0,01.

Christoforo *et al.* (2016) analisaram a estimativa da retratibilidade da madeira em função da densidade aparente considerando cinco espécies de madeira nativas brasileiras: Cedro Doce (*Cedrela* sp.); Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*). Foram considerados modelos de regressão exponencial, linear, quadrático e cúbico, e, ao final, conclui-se que a retratibilidade volumétrica e tangencial pode ser estimada pelo modelo de regressão quadrático ($R^2 > 70\%$).

Lahr *et al.* (2016) realizaram, em conformidade à ABNT NBR 7190:1997, a caracterização completa da espécie Angelim Saia (*Vatairea* sp.). Ainda, objetivou-se estimar valores de resistência e rigidez em função da densidade (propriedade de fácil obtenção) por meio de modelos de regressão linear, exponencial, geométrico e logarítmico. Ao final, apresentaram boa correlação as propriedades de resistência à compressão paralela às fibras, dureza paralela às fibras e dureza normal às fibras (coeficientes de determinação superiores a 60%).

2.3 DIFERENÇAS DE PROPRIEDADES ENTRE AMOSTRAS E PEÇAS DE DIMENSÕES ESTRUTURAIS

No Brasil, a norma NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997), estabelece premissas e métodos de cálculo para o dimensionamento de estruturas de madeira, bem como os métodos de ensaios para obtenção das propriedades físicas e mecânicas para caracterização deste material com base em corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, excluindo-se imperfeições naturais como nós de crescimento de galhos e desvios de fibras, por exemplo.

Para tanto, tratando-se da aplicação à construção civil, e, assim, de situações reais, o emprego dos resultados obtidos em tais ensaios normatizados podem conduzir o profissional a um dimensionamento estrutural inseguro uma vez que, peças em dimensões estruturais apresentam imperfeições e, portanto, podem ter comportamento diferente aos corpos de prova ensaiados.

Carreira e Dias (2006) verificaram a adequabilidade das regras de classificação visual do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) aplicadas a espécie *Pinus taeda*. Para tanto, foram selecionadas 502 peças com seção transversal de 3,5x12,5 cm distribuídas nas classes SS-D, SS-ND, N°2-D e N°2-ND e 98 em demais classes (com mesma seção transversal). As quatro classes de resistência avaliadas apresentaram diferenças significativas no MOR obtido a partir do eixo de maior inércia, atingindo 275% entre os grupos SS e N°2. Tal fato comprova a necessidade de classificação da madeira de coníferas advindas de florestas plantadas destinadas a aplicações estruturais.

Batista *et al.* (2000) realizaram um estudo comparativo entre os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio do ensaio de flexão estática para peças de dimensões estruturais de 60 x 160 x 3600 mm e corpos de prova de 50 x 50 x 1150 mm. Ao final, concluiu-se que: para *Eucalyptus* (espécie não especificada) a comparação diferiu em 0,6%, com peças estruturais apresentando valores de 12095 MPa e corpos de prova de 12.164 MPa; para o *Cambará* (*Erismia uncinatum* Warm), tal diferença equivale a 5,8%, com 14.036 MPa para peças de dimensões estruturais e 14.846 MPa para corpos de prova; e por fim, para a espécie *Cupiúba* (*Goupia glabra* Aubl.), a diferença se mostrou acentuada, em 30%, apresentando valores de 10521 MPa para peças de dimensões estruturais e 7.374 MPa para corpos de prova de pequenas dimensões.

Santos e Ballarin (2002) analisaram os resultados de módulos de elasticidade obtidos por meio do ensaio de flexão estática comparados aos de compressão paralela às fibras aplicados a corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, confeccionados a partir de árvores das espécies *Corymba citriodora*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*,

com aproximadamente 30 anos de idade. Concluiu-se que o módulo de elasticidade obtido por meio do ensaio de flexão estática foi inferior ao obtido por meio do ensaio de compressão paralela às fibras, com relação de 0,75 a 0,78 entre ambos.

Miná *et al.* (2004), compararam corpos de prova isentos de defeitos à postes de madeira da espécie *Corymbia citriodora*. Constatou-se que, os valores de módulo de elasticidade obtidos através do ensaio de flexão estática são maiores para peças estruturais (22.175 MPa) em relação aos corpos de prova (20.078 MPa). Contraditoriamente, os valores obtidos por meio do ensaio de compressão paralela às fibras foram superiores para os corpos de prova (21.075 MPa), se comparados às peças estruturais (19990 MPa).

Zangiácomo *et al.* (2013) realizaram um estudo comparativo entre os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio de ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática para corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças estruturais roliças da espécie *Pinus elliottii*. Para tanto, foram confeccionados 48 exemplares para cada teste (24 corpos de prova e 24 peças de dimensões estruturais), totalizando 96 ensaios. Constatou-se que, por meio de análises estatísticas, há diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade obtidos em corpos de prova e peças de dimensões estruturais para ambos ensaios aplicados. Os valores obtidos a partir do ensaio de flexão estática foram superiores para as peças de dimensões estruturais (9.594 MPa), se comparados aos corpos de prova (7.724 MPa). Entretanto, os valores obtidos a partir do ensaio de compressão paralela às fibras foram superiores para os corpos de prova (11.596 MPa) em relação a peças de dimensões estruturais (8.077 MPa).

Assim, considerando-se os estudos realizados para espécies de florestas plantadas, tem-se que os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio do ensaio de compressão paralela às fibras apresentados para os corpos de prova, adotados como referência pela normativa ABNT NBR 7190:1997 para o cálculo estrutural, foram superiores aos obtidos para peças com dimensões estruturais e, portanto, podem conduzir a um dimensionamento inseguro das estruturas de madeira.

Tais resultados refletem diretamente sob as considerações de revisão da ABNT NBR 7190: 1997 ainda não em vigência. O documento revisado, ainda não divulgado, invalida a equivalência entre corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças de dimensões estruturais de madeiras de florestas plantadas, requerendo ensaios nas peças de dimensões estruturais.

Tratando-se de madeiras tropicais, a escassez de estudos em tal contexto não comprovam a equivalência entre tais propriedades para corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças de dimensões estruturais.

2.4 OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES DA MADEIRA PELO MÉTODO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

A vibração transversal, como método de avaliação não-destrutivo, é baseada na relação entre a frequência natural de vibração e rigidez do elemento. Em termos de módulo de elasticidade da madeira, a técnica, dentre os demais métodos não-destrutivos, foi uma das primeiras avaliadas devido a concepção simples e grande potencial de aplicação, principalmente pela precisão do modelo matemático associado e possibilidade de emprego a peças em dimensões estruturais (BALLARIN; TARGA; PALMA, 2002; CARREIRA *et al.*, 2017).

Candian e Sales (2009) verificaram a precisão das técnicas de vibração transversal e ultrassom em relação aos valores obtidos nos ensaios de flexão estática para a espécie de *Eucalyptus citriodora*. Para tanto, foram confeccionadas 30 peças com dimensões estruturais (5x11x300 cm). A técnica de ultrassom foi realizada através do equipamento *Sylvatest* com transdutores de 22 kHz e a vibração transversal foi realizada por meio do equipamento *Transverse Vibration E-Computer*, da marca Metriguard. Os ensaios de flexão estática foram feitos com peças dispostas na posição de menor inércia, submetidas a um carregamento na região central com simultânea coleta de seis leituras de deslocamento. Ao final, os valores de coeficiente de determinação para os métodos de ultrassom ($R^2 = 0,76$) e vibração transversal ($R^2 = 0,80$) foram significativos e, portanto, podem ser considerados como importantes ferramentas para a estimativa do módulo de elasticidade da madeira.

Calil Júnior e Miná (2003) estudaram a existência da correlação entre o módulo de elasticidade estático, obtido por meio do ensaio de flexão estática, e o módulo de elasticidade dinâmico, obtido através da técnica de vibração transversal. Para tanto, foram realizados testes em 326 peças de dimensões estruturais de madeira da espécie *Southern Pine* e, ao final, constatou-se coeficiente de correlação linear (R) entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico equivalente a 0,98, o que evidencia forte correlação linear entre as duas grandezas.

Ballarin e Palma (2009) avaliaram a confiabilidade do método de vibração transversal em relação ao ensaio destrutivo de flexão estática para determinação do módulo de elasticidade. Assim, foram confeccionados 202 corpos de prova a 12% de umidade com 2x2x 46 cm, sendo: 48 da espécie *Pinus taeda* L., 57 de *E. grandis*, 28 de *E. saligna* e 69 de *C. citriodora*. A vibração transversal foi realizada pelo sistema BING – *Beam Identification by Non-destructive Grading* e o ensaio de flexão estática seguiu, de maneira geral, as especificações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

Green *et al.* (2006) estudaram uma proposta técnica para classificação mecânica de 225 amostras de madeiras roliças das espécies *Abies lasiocarpa* e *Pinus contorta*, com diâmetros de 228 mm. Para tanto, estas foram analisadas pelo método de vibração transversal, e os resultados comparados aos obtidos pelo ensaio de flexão estática aplicado em conformidade à ASTM D 198:1994. Obtiveram-se boas correlações entre resistência à flexão estática e módulo de elasticidade (MOE) e propriedades de flexão e MOE dinâmico determinado pela vibração transversal. Também houve relação entre resistência à compressão paralela, força de flexão e MOE dinâmico.

Carreira, Dias e Segundinho (2017) avaliaram a eficácia do método de vibração transversal para determinação do módulo de elasticidade a troncos da espécie *Corymbia citriodora*. Foram confeccionadas 38 amostras com diâmetros de 13,6 a 20 cm e comprimento de 4 a 4,4 metros, testados à vibração transversal e ensaio de flexão estática. Houve forte correlação entre os resultados obtidos ($R^2 = 0,92$), indicando que o método da vibração transversal livre fornece dados confiáveis quanto ao módulo de elasticidade à flexão de troncos desta espécie.

Almeida *et al.* (2016b) determinaram a rigidez de peças estruturais (2,5x15x250 cm) da espécie *Pinus elliottii*, através dos métodos de vibração transversal e flexão estática, pela determinação do módulo de elasticidade da madeira a diferentes teores de umidade. Concluiu-se que, os valores de módulo de elasticidade (MOE) não diferiram entre os dois métodos considerando amostras a 12 % de umidade, o que não aconteceu com amostras a 54% de umidade.

Sales, Candian e Cardin (2009) analisaram os coeficientes de modificação, especificamente $k_{mod,3}$ (considera a madeira de primeira ou segunda qualidade), por meio de procedimentos experimentais utilizando membros estruturais das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus* sp. As amostras foram avaliadas por técnicas de ultrassom e vibração transversal para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d), classificadas visualmente, e solicitadas à flexão para determinação do módulo de elasticidade estático (MOE). Os resultados apresentados indicam que a técnica da vibração transversal obtém valores mais próximos aos determinados por flexão estática do que obtidos pelo ultrassom, com valores de $k_{mod,3}$ maiores.

Carreira e Candian (2008) investigaram a classificação mecânica de peças de madeira bom como os resultados do teste de calibração do sistema de classificação por vibração transversal fabricado no Brasil. Foram analisadas 30 vigas da espécie Cupiúba (*Goupia glabra*), com dimensões de 5x10x300 cm, por meio do método de vibração transversal e de flexão estática. Para vibração transversal, utilizando-se os equipamentos nacional e

Metriguard, as peças foram testadas com vão livre de 290 cm, submetidas a um leve golpe no centro do vão. O teste de flexão estática foi realizado pela aplicação de uma força concentrada no centro do vão das peças e sequente medição dos deslocamentos verticais em cinco níveis de carga: 70,6, 141,2, 211,8, 282,4 e 353 N. A força foi aplicada por um cilindro hidráulico com capacidade para 250 kN e uma bomba manual da marca *Yellow Power*, e medida por um anel dinamométrico de capacidade máxima equivalente a 4,70 kN. O deslocamento vertical no meio do vão foi medido por um relógio comparador de resolução centesimal. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Classificação mecânica da Cupiúba por Carreira e Candian.

Estatística descritiva	Tratamentos		
	A MOE estático	B MOE Carreira	C MOE Metriguard
Média (MPa)	16.410	14.890	13.562
Desvio padrão (MPa)	3.612	3.039	2.557
Variância da amostra (MPa)	13.053.631	9.238.844	6.538.895
Coefficiente de variação (%)	22%	20,4%	18,9%
Mínimo (MPa)	11.322	10.979	9.563
Máximo (MPa)	24.160	23.888	19.226
Contagem	30	30	30

MOE = módulo de elasticidade.

Fonte: Adaptado de Carreira e Candian (2008).

Assim, tem-se que o MOE médio obtido na vibração transversal com o equipamento nacional é aproximadamente 10% maior do que o MOE medido com o equipamento da *Metriguard*. Para verificar se os resultados de ambos equipamentos apresentam diferença estatisticamente significativa em relação ao módulo estático, aplicou-se o método de Dunnett com $k = 2$, $s^2 = 9610365$, $s = 3100,06$, $u = 8$, $\alpha = 0,05$, $t_{2,87,0,025} = 2,25$ (*critical value*), e diferença mais significativa (d.m.s.) equivalente a 1.800,97. A Tabela 17 apresenta os resultados da ANOVA para MOE estático e dinâmico.

Tabela 17: Análise estatística Carreira e Candian.

Fonte de variação	SQ	G.L.	QM	Fcal	Valor-p
Regressão	339148483	1	339148483	241,03	0,000
Erro	39398277	28	1407081		
Total	378546760	29			

SQ=Soma dos Quadrados; G.L.=Graus de Liberdade; QM=Quadrado Médio; Fcal=F calculado; Valor-P=Valor de comparação com o nível de significância α .

Fonte: Adaptado de Carreira e Candian (2008).

Como $F_{cal} = 241,0300 > F_{0,05;1,28} = 4,20$, há um nível de significância $\alpha = 0,05$ e, portanto, conclui-se evidência estática com coeficiente de determinação (R^2) de 0,896.

Medeiros Neto, Paes e Segundinho (2016) avaliaram o uso de técnicas não destrutivas, considerando frequências de vibração longitudinal e transversal e *stress wave*, relacionadas aos resultados obtidos no ensaio de flexão estática para as espécies de Eucalipto (*Corymbia citriodora*), Louro Preto (*Cordia alliodora*), Massaranduba (*Manilkara* sp.) e Pau Brasil (*Caesalpinia echinata*). Para tanto, foram confeccionadas 20 amostras com dimensões nominais 2x2x30 cm (relação vão livre por altura inferior a recomendada devido às dimensões do material disponível) a 12% de umidade. A vibração transversal foi realizada por meio de corpos de prova sustentados sobre fios de elastômero, conectados a duas hastes de madeira apoiadas em pontos nodais (0,224 vezes o comprimento da amostra). Os impactos gerados pela batida do martelo foram captados por microfone e transformados em frequências pelo programa *Fast Fourier Vibration Analyzer* – FFT. Por método destrutivo, os módulos de elasticidade e de ruptura à flexão (MOE e MOR, respectivamente) foram obtidos através de máquina universal de ensaios com capacidade de 100 kN e sistema automático de aquisição de dados.

Os valores considerados significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$) tiveram médias comparadas pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$). A análise das relações entre técnicas não destrutivas e destrutivas foi realizada por análise de regressão linear simples, teste de Pearson. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Análise das relações entre técnicas não destrutivas e destrutivas.

Espécies	MEA (g cm ⁻³)	Técnica Destrutiva		Técnicas não Destrutivas		
		MOR (MPa)	MOEst (MPa)	MOEdvl (MPa)	MOEdvt (MPa)	MOEdsw (MPa)
Eucalipto	1,05 a	205,07 a	20214,21 Ca	34525,21 Aa	29396,56 Ba	27918,54 Ba
Louro preto	0,85 c	132,04 c	12121,87 Bc	16383,55 Ac	15142,42 Ac	14604,79 ABd
Paraju	1,06 a	186,31 b	16389,37 Cb	23813,70 Ab	21465,83 Bb	19912,07 Bb
Pau Brasil	0,97 b	170,87 b	15883,23 Cb	21411,79 Ab	19483,56 ABb	17583,27 BCc

MEA = massa específica aparente, MOE_{st} = Módulo de elasticidade estático, MOR = Módulo de ruptura, MOE_{dvt}, MOE_{dvl}, e MOE_{dsw} = Módulos de elasticidade pelos ensaios dinâmicos de vibração longitudinal, transversal e *stress wave*. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na horizontal e minúscula, na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de *Tukey* ($p > 0,05$).

Fonte: Adaptado de Medeiros Neto, Paes e Segundinho (2016).

Como apresentado, tem-se que o módulo de elasticidade obtido pelo método da vibração longitudinal apresenta maiores valores para madeiras de Eucalipto e Paraju, ou seja, de maior massa específica.

2.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO

A literatura citada apresenta que, as cinco espécies de madeiras selecionadas para desenvolvimento do trabalho se enquadram nas mais diversas aplicações à construção civil, com significativa diferença entre propriedades tais como densidade, resistência e módulo de elasticidade para distribuição no grupo das folhosas.

Tem-se ainda que, na impossibilidade de realização dos ensaios de caracterização da madeira, a normativa ABNT NBR 7190:1997 permite a adoção de correlações para estimativa de propriedades física e mecânicas da madeira. Assim, apresentou-se diversas pesquisas em relação à estimativa de propriedades mecânicas da madeira que comprovam a viabilidade de aplicação de novas técnicas para obtenção de tais propriedades.

Devido ao objetivo do estudo em questão, este capítulo ainda apresentou a literatura existente quanto a diferenças de propriedades entre amostras e peças de dimensões estruturais. Tem-se as poucas pesquisas existentes neste contexto estão associadas a

madeiras de florestas plantadas, em que se constata diferença significativa nos valores de módulo de elasticidade obtidos entre peças de dimensões estruturais e amostras normatizadas. Quanto a madeiras de florestas nativas, tem-se apenas um único estudo realizado por Batista *et al.* (2000) para a espécie de Cupiúba, em que as peças de dimensões estruturais apresentaram módulo de elasticidade na flexão superiores em 30% em relação a mostras normatizadas, evidenciando a necessidade de mais estudos neste sentido.

Por fim, apresentaram-se diversos estudos relacionados a obtenção de propriedades da madeira pelo método de vibração transversal, objetivo secundário do presente trabalho. Todos os diversos estudos expostos evidenciam confiabilidade ao método não destrutivo para obtenção de tais propriedades, tornando-se alternativa para a estimativa de propriedades de peças de dimensões estruturais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida com base em cinco lotes de madeiras de diferentes espécies tropicais brasileiras: Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* spp.), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.) e Peroba Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.). Tais espécies, com teor de umidade na condição padrão à ABNT NBR 7190:1997 de 12%, foram devidamente estocadas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), da Universidade de São Paulo (USP).

Em cumprimento à ABNT NBR 7190:1997, foram consideradas inicialmente seis amostras com dimensões estruturais (vigas de 5x11x200 cm a 6x12x200 cm) para cada espécie estudada. Posteriormente, em conformidade ao Anexo B da normativa em questão, de cada elemento estrutural foram retirados: um corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras, um corpo de prova com dimensões estruturais para ensaio de compressão paralela às fibras e um corpo de prova para o ensaio de flexão estática. Assim, foram obtidos 30 corpos de prova por ensaio realizado (seis corpos de prova por espécie). Todas as amostras foram devidamente medidas, por meio de paquímetro (precisão de 0,1 mm) e trena, e pesadas em uma balança analítica (precisão de 0,01 g).

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICA DAS MADEIRAS

Esta seção apresenta os materiais e métodos empregados na análise da equivalência entre os módulos de elasticidade (E_m) estático (E_m^{est}) e dinâmico (E_m^{vib}), para peças de dimensões estruturais, e o módulo de elasticidade obtido a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos (E_m^{cp}). Ainda, contempla tais particularidades utilizadas para análise da equivalência entre os valores de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) obtidas das amostras (f_{c0}^{cp}) e das peças de dimensões estruturais (f_{c0}^{est}), além da densidade aparente na condição padrão de umidade a 12%.

3.1.1 DENSIDADE APARENTE

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, a densidade aparente (ρ_{ap}) é uma massa específica convencional, dada pela razão entre a massa (m_{12}) e o volume (v_{12}) de corpos de prova de madeira a com teor de umidade na condição padrão de 12%, conforme a Equação 3.1.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{v_{12}} \quad (3.1)$$

A densidade aparente da madeira foi estimada a partir das peças com dimensões estruturais.

3.1.2 VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

A análise das peças em dimensões estruturais pelo método da vibração transversal foi realizada por meio do equipamento *Transverse Vibration E-Computer*, modelo 340 da *Metriguard*. Inicialmente, o equipamento foi calibrado, com o uso de uma barra de alumínio cujo módulo de elasticidade é conhecido, para posterior locação das peças, que mantiveram vão livre em torno de 1,90 m. A Figura 1 evidencia a aplicação do método.

Figura 1: Ensaio de Vibração Transversal.



Fonte: próprio autor.

O programa solicita, como dados de entrada, as medidas de base, altura e comprimento da peça, bem como a medida externa aos apoios (10 cm neste caso). Então, é aplicada uma força externa, com o uso de um martelo, no meio do vão, que provoca a vibração do elemento. Um dos apoios que contém uma célula de carga estima o peso do elemento bem como a frequência de vibração, e envia os dados ao computador. Assim, o programa computacional realiza os cálculos e armazena os dados e resultados prontos em arquivo texto.

3.1.3 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Os ensaios de flexão estática, primordiais para determinação dos módulos de elasticidade estáticos (E_m) das espécies estudadas, foram realizados em conformidade à

ABNT NBR 7190:1997. Para tanto, foram confeccionados seis corpos de prova por espécie, de 5x5x115 cm, de maneira a apresentar vão livre de 105 cm quando vinculados a dois apoios (atendendo a especificação do vão livre equivaler a 21 vezes a largura do corpo de prova).

Tais ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da marca AMSLER, que possui capacidade de carga de 25 toneladas e está instalada no LaMEM. O carregamento foi aplicado de maneira crescente, concentrado no meio do vão (através de um cutelo acoplado ao atuador), de forma monotônica à taxa de 10 MPa/min. Ainda, instalou-se um defletômetro digital no centro do vão para medir as deformações. A Figura 2 retrata o ensaio.

Figura 2: Ensaio de Flexão Estática em Corpos de Prova normatizados.



Fonte: próprio autor.

Devido a inexistência de um sétimo corpo de prova gêmeo, optou-se pela determinação da força (F) que provoca os deslocamentos equivalentes a $L/1000$ e $L/200$ (em que L é o vão livre entre apoios), contidos no regime elástico, para cada primeiro corpo de prova de cada uma das cinco espécies. Posteriormente, tais amostras foram solicitadas à ruptura.

Foram realizados, de acordo com as especificações do Anexo B, três ciclos de carregamento: dois ciclos até 50% da força de ruptura, com pausas de 30 segundos em 10 e 50% da força de ruptura; e um terceiro ciclo, em que para as forças correspondentes a 10 e 50% da força de ruptura foram determinados seus respectivos deslocamentos no centro vão ($v_{10\%}$ e $v_{50\%}$).

Assim, o módulo de elasticidade de cada espécie submetida ao ensaio de flexão foi determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento (Equação 3.2).

$$E_m = \frac{(F_{m,50\%} - F_{m,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3} \quad (3.2)$$

Em que L é o vão livre entre apoios, e b e h correspondem, respectivamente, a largura e a altura da seção transversal do corpo de prova, em metros.

Tratando-se das peças com dimensões estruturais, não contempladas pela normativa brasileira, os módulos de elasticidade foram obtidos com base no princípio carga x deslocamento do ensaio aplicado aos corpos de prova. A força foi aplicada por um cilindro hidráulico com capacidade para 250 kN e uma bomba manual da marca *Yellow Power*, e medida por um anel dinamométrico de capacidade máxima igual a 4,70 kN. O deslocamento no centro do vão foi medido por um defletômetro digital. A Figura 3 retrata o ensaio.

Figura 3: Ensaio de Flexão Estática em Peças Estruturais.



Fonte: próprio autor.

Inicialmente, foi realizado um carregamento máximo até L/200 para eventuais acomodações das fibras. Posteriormente, considerando a distribuição de forças e facilidade às leituras feitas pelo técnico do laboratório, foram feitas 10 leituras de força e deslocamento: 10 leituras a cada 10 kgf considerando anel de constante $k = 4,659$ para a espécie Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.); 10 leituras a cada 15 kgf considerando anel de constante $k = 4,659$ para Tauari (*Couratari* spp.) e Cambará (*Erismia uncinatum* Warm); e 10 leituras a cada 20 kgf

considerando anel de constante $k = 4,659$ para Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.) e Peroba Mica (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.).

Assim, o módulo de elasticidade (E_m^{est}) da madeira submetida ao ensaio de flexão foi estimado considerando a variação da força (ΔF) e do deslocamento (Δu), bem como o vão livre entre apoios (L) e a inércia do elemento (I), como mostra a Equação 3.3.

$$E_m^{est} = \frac{(\Delta F)L^3 g}{(\Delta v)48I} \quad (3.3)$$

Considerou-se deslocamento máximo limitado a $L/200$ para atestar um módulo de elasticidade determinado pelo trecho linear do diagrama carga x deslocamento.

3.1.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Os ensaios de compressão paralela às fibras, aplicados às espécies estudadas, foram realizados em conformidade à ABNT NBR 7190:1997. Para tanto, foram confeccionados seis corpos de prova por espécie, de 5x5x15 cm, totalizando 30 amostras.

De maneira similar à flexão estática, tais ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da marca AMSLER. O carregamento foi aplicado de maneira crescente monotônica, à taxa de 10 MPa/min. Os deslocamentos foram determinados por meio do uso de dois relógios comparadores acoplados à amostra. A Figura 4 retrata o ensaio.

Figura 4: Ensaio de Compressão Paralela às fibras em Corpos de Prova normatizados.



Fonte: próprio autor.

Devido a inexistência de um sétimo corpo de prova gêmeo, optou-se, para cada primeiro corpo de prova de cada uma das cinco espécies, pela realização de 10 leituras de força e deslocamentos (em ambos relógios) a cada 1.000 kgf. Posteriormente, tais amostras foram solicitadas à ruptura.

Foram realizados, de acordo com as especificações do Anexo B, três ciclos de carregamento: dois ciclos até 50% da força de ruptura, com pausas de 30 segundos em 10 e 50% da força de ruptura; e um terceiro ciclo, em que para as forças correspondentes a 10 e 50% da força de ruptura foram determinados seus respectivos deslocamentos no centro vão

Com base nos dados obtidos nos ensaios, a resistência da madeira à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima força de compressão que pode atuar na direção paralela às fibras de um corpo de prova com seção transversal quadrada (A), como mostra a Equação 3.4.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (3.4)$$

É de grande importância salientar que a determinação da resistência característica da madeira se dá com base na resistência à compressão paralela às fibras. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras $f_{c0,k}$ deve ser determinado pela Equação 3.5, em que após, a determinação da resistência para n corpos analisados, os resultados devem ser realocados em ordem crescente ($f_1 < f_2 < f_3 < f_n$).

$$f_{wk} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (3.5)$$

No caso de espécies pouco conhecidas, conforme o item 6.3.2 na normativa brasileira em vigência, para determinação da resistência a quaisquer solicitações de um lote de madeira devem ser retirados, no mínimo, 12 corpos de prova. De acordo com a ABNT NBR 7190:1997 (Anexo F “Esclarecimentos sobre a calibração desta Norma”; Item F.7 “Resistências características da madeira”), a resistência característica não pode ser inferior a f_1 e a 70% do valor médio. Para espécies usuais, a normativa permite a caracterização simplificada da resistência com base apenas nos ensaios de compressão paralela às fibras.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras é dada por seu módulo de elasticidade, obtidos por meio do trecho linear do diagrama tensão x deformação. Assim, o módulo de elasticidade, dado pela inclinação da reta secante ao trecho, é definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \varepsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \varepsilon_{50\%})$, correspondentes respectivamente a 10 e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, como mostra a Equação 3.6.

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

Para efeitos comparativos, foram confeccionadas peças em dimensões estruturais, as quais mantiveram as seções transversais das vigas utilizadas nos ensaios de vibração transversal e flexão estática, com comprimento de três vezes a menor dimensão. Assim de uma viga de 5x11x200 cm foi retirada uma amostra de 5x11x15 cm, por exemplo. Os módulos de elasticidade foram obtidos com base no princípio carga x deslocamento do ensaio aplicado aos corpos de prova. A Figura 5 retrata o ensaio.

Figura 5: Ensaio de Compressão Paralela às fibras em Peças Estruturais.



Fonte: próprio autor.

Ao total, foram ensaiadas à compressão paralela às fibras 30 amostras (seis amostras por espécie estudada).

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) não paramétrica de *Kruskal-Wallis*, ao nível de 5% de significância (α), foi utilizada para investigar a influência dos métodos de obtenção (flexão estática [Est], vibração transversal [VT]) do módulo de elasticidade (E) em peças de dimensões estruturais assim como de avaliar as possíveis diferenças entre os módulos de elasticidade obtidos mecanicamente nas peças estruturais e em corpos de prova isentos de defeitos, considerando-se para tanto as espécies tropicais de madeira de Caixeta (Cx), Tauari (Ta), Cambará (Ca), Piquiá (Piq) e Peroba Mica (Pe).

Cabe destacar que de cada espécie foram confeccionadas seis peças estruturais para a obtenção dos módulos de elasticidade pelo ensaio de vibração transversal e também pelo ensaio de flexão estática (não destrutivo), e seis corpos de prova para os ensaios de flexão, resultando em 90 determinações.

Ainda, a análise de variância (ANOVA) não paramétrica de *Kruskal-Wallis*, ao nível de 5% de significância (α), foi utilizada para investigar a influência das dimensões dos corpos de prova (amostras com pequenas dimensões e isentos de defeitos (CP) e corpos de prova com dimensões estruturais (Est) nos valores do módulo de elasticidade (E_{c0}) na compressão paralela às fibras das espécies de madeiras tropicais de Caixeta (Cx), Tauari (Ta), Cambará (Ca), Piquiá (Piq) e Peroba Mica (Pe). Por espécie de madeira foram confeccionados 6 corpos de prova de dimensões reduzidas e 6 de dimensões estruturais, resultando em 30 determinações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a relevância da distribuição das espécies estudadas nas classes de resistência do grupo das folhosas, tem-se na Tabela 19, com base nos ensaios de densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras preconizados pela ABNT NBR 7190:1997, os resultados de densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{ap,12}$) e resistência característica da madeira à compressão ($f_{c0,k}$), com suas respectivas classificações normatizadas.

Tabela 19: Valores de $\rho_{ap,12}$ média e $f_{c0,k}$ das espécies estudadas.

Espécie	$\rho_{ap,12}$ média (g/cm ³)	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classificação
Caixeta	0,470	37	C30
Tauari	0,763	62	C60
Cambará	0,724	55	C40
Piquiá	0,758	67	C60
Peroba Mica	0,751	69	C60

Para a madeira de Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), os valores apresentados são satisfatórios se comparados aos expostos na seção 2.1.1 do trabalho. A densidade aparente à 12% de umidade se manteve na faixa de 0,3 a 0,5 g/cm³, e a resistência à compressão paralela às fibras entre 30 a 40 MPa, como cita a literatura. Assim, esta espécie se enquadra na classe de resistência C30 preconizada pela normativa ABNT NBR 7190:1997.

O Tauari (*Couratari* ssp) apresentou valores superiores aos expostos pela literatura e apresentados na seção 2.1.2. A densidade aparente à 12% de umidade, de 0,763 g/cm³ é superior à média de 0,6 g/cm³, bem como a resistência à compressão paralela às fibras de 62 MPa é superior à média de 50 MPa esperada. Tais considerações ressaltam questões de variabilidade da madeira, enquanto a espécie analisada na classe C60 de resistência.

A madeira de Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), de maneira análoga aos resultados do Tauari, apresentou valores superiores aos dispostos na seção 2.1.3. A densidade aparente à 12% de umidade de 0,724 g/cm³ é aceitável, pouco superior aos valores encontrados por Lahr *et al.* (2016) e Morales e Lahr (2002), próximos a 0,7 g/cm³. Contudo, a resistência característica à compressão paralela às fibras, de 55 MPa (classe de resistência C40 da ABNT

NBR 7190:1997), é superior aos resultados apresentados na seção 2.1.3, considerando a espécie nas classes de resistência C20 e C30. Da seção, somente Arruda *et al.* enquadram tal espécie na classe C40.

O Piquiá (*Caryocar villosum* Aubl.) apresentou densidade aparente média a 12% de umidade de 0,758 g/cm³, condizente ao proposto por Andrade Júnior *et al.* (2012), porém inferior ao obtido por Jesus, Logsdon e Finger (2015) de 0,839 g/cm³. A resistência a compressão paralela às fibras de 67 MPa (classe de resistência C60 da ABNT NBR 7190:1997) foi superior a todos os estudos apresentados na seção 2.1.4, que se mantiveram na ordem de 50 MPa, evidenciando novamente questões de variabilidade da madeira.

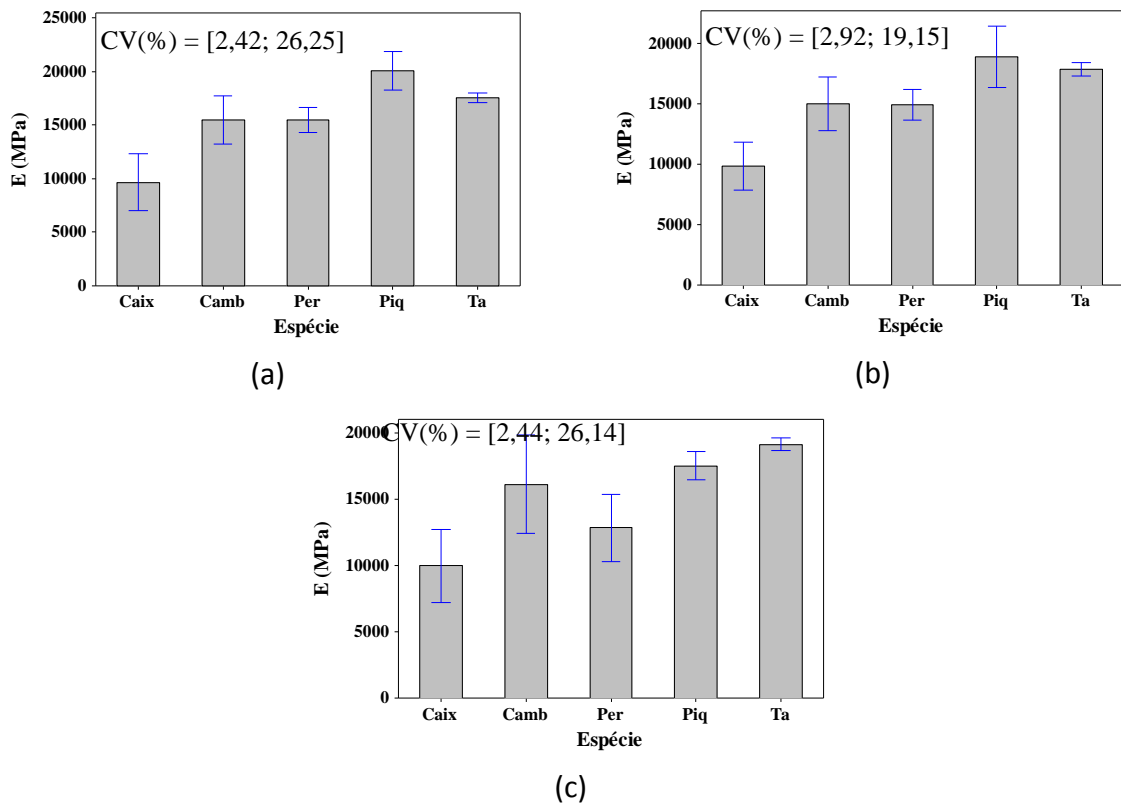
Por fim, a Peroba Mica (*Aspidosperma polyneuron* Mull Arg.), com densidade aparente a 12% de umidade de 0,751 g/cm³, se relaciona aos valores expostos em 2.1.5. A resistência a compressão paralela às fibras de 69 MPa, classificando-a na classe de resistência C60, também se relaciona aos valores encontrados por Jesus Logsdon e Finger (2015), Logsdon, Finger e Borges (2007) e Fiorelli e Dias (2002) na seção 2.1.5, com resistência a compressão paralela às fibras na ordem de 70 MPa.

Assim, as espécies analisadas contemplam três das quatro classes de resistência do grupo das folhosas conforme a ABNT NBR 7190:1997.

4.1 ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Na Figura 6 são ilustrados os valores médios dos módulos de elasticidade, os intervalos de confiança da média (um nível de 95% de confiabilidade) e os intervalos de variabilidade dos coeficientes de variação (CV) considerando as cinco espécies de madeira.

Figura 6: Resultados obtidos dos módulos de elasticidade: vibração transversal (a), flexão estática em peças estruturais (b), flexão estática em corpos de prova (c).



Fonte: próprio autor.

Por meio do exposto, tem-se que, as três situações apresentadas possuem resultados condizentes e satisfatórios. A madeira de Caixeta (Caix) mostrou valores de módulo de elasticidade na ordem de 7.000 a 13.000 MPa em todas as situações, apresentando o maior coeficiente de variação (26,25%) para o método da vibração transversal. A faixa de valores enquadra o resultado disponibilizado pelo IPT (2017), de 7.257 MPa para espécie ao teor de umidade padrão. Dentre as demais espécies analisadas, a Caixeta apresentou ao teor de 12% de umidade os menores valores de densidade aparente, resistência a compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade na flexão.

O Tauari (Ta) apresentou valores de módulo de elasticidade na ordem de 16.000 a 20.000 MPa, com o menor coeficiente de variação nas três situações apresentadas. O maior valor médio de módulo de elasticidade obtido para a espécie foi por meio do ensaio de flexão estática em corpos de prova normatizados, na ordem de 19.000 MPa. Tal resultado diverge do disponibilizado pelo IPT (2017), de 10.591 MPa, evidenciando a variabilidade da madeira para cada lote analisado.

A madeira de Cambará (Camb) revelou valores de módulo de elasticidade variando de 12.000 a 20.000 MPa, com o maior coeficiente de variação para a situação em que o módulo

foi obtido a partir de corpos de prova normatizados, enfatizando questões de variabilidade das propriedades desta espécie de madeira. Ao teor de 12% de umidade, os valores obtidos são condizentes ao encontrado por Lahr *et al.* (2016), de 12.376 MPa, e Batista *et al.* (2000), com valores na ordem de 14.000 MPa, e pouco superiores aos verificados pelo IPT (2017), Arruda *et al.* (2015) para madeira termomecanicamente tratada e Morales e Lahr (2002), variando de 10.000 a 11.000 MPa.

O Piquiá (Piq) apresentou valores de módulo de elasticidade na ordem de 16.000 a 20.000 MPa ao teor de umidade de 12%, em concordância ao resultado obtido por Jesus, Logsdon e Finger (2015). Por fim, a madeira de Peroba Mica (Per) revelou valores de módulo de elasticidade variando de 13.000 a 17.000 MPa ao teor de 12% de umidade, condizente ao resultado médio obtido por Jesus, Logsdon e Finger (2015) e Logsdon, Finger e Borges (2007), de 16.263 MPa.

As Tabelas 20 e 21 apresentam os resultados da ANOVA não paramétrica de *Kruskal-Wallis* (5% de significância) referente à comparação dos módulos de elasticidade obtidos do ensaio de flexão estática (Est) e de vibração transversal (VT) (peças estruturais) e dos módulos de elasticidade na flexão estática obtidos dos corpos de prova (CP) e das peças estruturais, respectivamente.

Tabela 20: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade das peças estruturais (Est xVT).

Tratamento	N	M	MP	z
Est	30	16070	29,5	-0,46
VT	30	16460	31,5	0,46
Total	60		30,5	
H = 0,21	GL = 1	P-valor = 0,647		

N: número de determinações, M: média; MP: média do ponto, z: estatística z, H: estatística H, GL: graus de liberdade.

Tabela 21: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade das peças estruturais (Est x CP).

Tratamento	N	M	MP	z
GN	30	15748	31,2	0,30
SG	30	16070	29,8	-0,30
Total	60		30,5	
H = 0,09	GL = 1	P-valor = 0,767		

N: número de determinações, M: média; MP: média do ponto, z: estatística z, H: estatística H, GL: graus de liberdade.

Da Tabela 20, que relaciona os valores de módulo de elasticidade obtidos pelo método da vibração transversal aos de flexão estática de peças estruturais, tem-se p-valor superior ao nível de significância (5%), o que implica que o método de ensaio não foi significativo na obtenção dos módulos de elasticidade.

Tal fato, evidencia a literatura exposta na seção 2.4, que mostra o método de ensaio não destrutivo de vibração transversal como alternativa eficiente para determinação do módulo de elasticidade da madeira, com coeficientes de determinação iguais ou superiores a 0,80. Contudo, é importante salientar que a maioria dos estudos apresentados se baseou em madeiras de florestas plantadas e não nativas.

Assim, é essencial comparar o resultado obtido ao exposto pelo estudo de Carreia e Candian (2008) para madeira de floresta nativa, a Cupiúba (*Goupia glabra*). Em tal estudo, o método para obtenção do módulo de elasticidade na flexão de peças estruturais foi realizado do modo similar a pesquisa em questão, e o ensaio de vibração transversal foi realizado através do mesmo equipamento *Metriguard*. Atestou-se evidência estatística com coeficiente de determinação R^2 de 0,896.

Assim, é possível atestar não só a confiabilidade do método de vibração transversal, como a do equipamento da *Metriguard*.

Da Tabela 21, que relaciona os valores de módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio de flexão estática em peças estruturais aos de corpos de prova, tem-se p-valor superior ao nível de significância, constatando equivalência das médias nas condições avaliadas, o que revela que os tamanhos das peças não foram significativos na obtenção dos módulos de elasticidade.

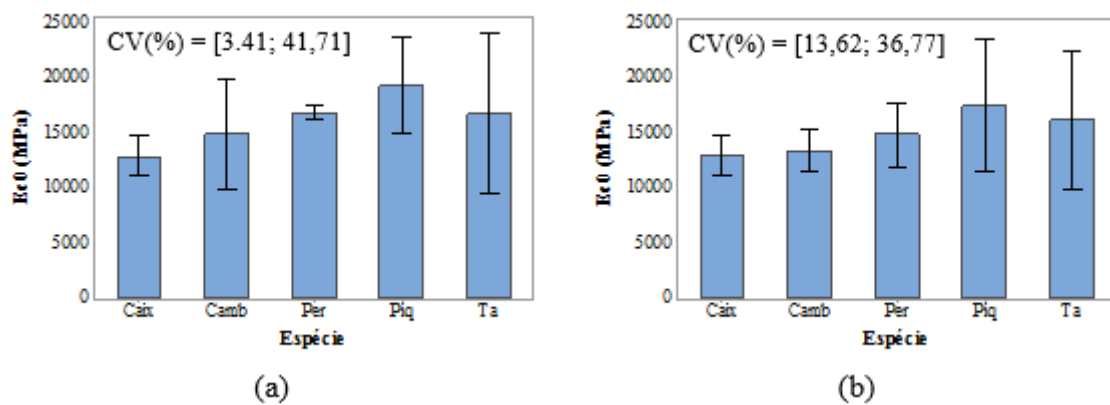
Comparando-se à literatura (madeiras de florestas nativas) os resultados condizem aos encontrados por Batista *et al.* (2000), em que o Cambará (*Erismia uninatum* Warm.) não apresentou diferença significativa entre módulos de elasticidade obtidos a partir de peças estruturais e corpos de prova normatizados, como exposto no presente estudo. Ainda, a análise feita por Batista *et al.* (2000) apresentou diferença significativa entre tais módulos, de 30%, para a espécie de Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.). Ressalta-se que esta diferença se relaciona a maiores valores para peças de dimensões estruturais e, portanto, a segurança das estruturas com cálculos feitos com base nos resultados obtidos a partir de corpos de prova é mantida.

Assim, tem-se evidências de que o módulo de elasticidade obtido por meio do ensaio de flexão estática em corpos de prova pode ser considerado como propriedade das peças estruturais para madeiras de florestas tropicais.

4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Na Figura 7 são ilustrados os valores médios dos módulos de elasticidade (E_{c0}) para ambas as dimensões dos corpos de prova, os intervalos de confiança da média (ao nível de 95% de confiabilidade) e os intervalos de variação dos coeficientes de variação (CV) considerando as cinco espécies de madeira.

Figura 7: Resultados obtidos dos módulos de elasticidade dos corpos de prova (a) e das peças de dimensões estruturais (b).



Fonte: próprio autor.

Como exposto, ambas situações mostram resultados condizentes e satisfatórios. A madeira de Caixeta (Caix) apresentou valores de módulo de elasticidade variando de 10.000 a 15.000 MPa, em conformidade aos valores de módulo de elasticidade estimados na seção 4.1 para flexão estática. A literatura exposta em 2.1.1 não apresenta valores de módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras.

O Tauari (Tau) revelou módulos de elasticidade na ordem de 15.000 a 25.000 MPa, se relacionando aos valores obtidos na seção 4.1 para flexão estática. A literatura exposta em 2.1.2 não apresenta valores de módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras.

A madeira de Cambará (Camb) apresentou módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras variando de 11.000 a 19.000 MPa, em conformidade ao valor encontrado por Lahr *et al.* (2016), de 12967 MPa. Ainda, houve correlação aos valores de módulo de elasticidade estimados na seção 4.1 para flexão estática.

O Piquiá (Piq) revelou valores de módulos de elasticidade na ordem de 13.000 a 22.000 MPa, se relacionando aos valores obtidos na seção 4.1 para flexão estática. A literatura exposta em 2.1.2 não apresenta valores de módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras.

A madeira de Peroba Mica apresentou módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras variando entre 13.000 a 18.000 MPa, condizente ao valor encontrado por Fiorelli e Dias (2002), de 13.105 MPa. Ainda, houve correlação aos valores de módulo de elasticidade estimados na seção 4.1 para flexão estática.

Destaca-se que, os módulos obtidos a partir do ensaio de compressão paralela às fibras possuem grandes coeficientes de variação, atribuídos a: distinções entre cerne e alburno e variabilidade da madeira, uma vez que este ensaio não considera a anisotropia e heterogeneidade do material.

Na Tabela 22 são apresentados os resultados da ANOVA não paramétrica de *Kruskal-Wallis* (5% de significância) referente à comparação dos módulos de elasticidade entre amostra e peças de dimensões estruturais (CP×Est).

Tabela 22: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras entre amostras e as peças de dimensões estruturais (CP×Est).

Dimensão	N	M	MP	z
CP	30	16519,4	32,8	1,02
Est	30	14377,9	28,2	-1,02
Geral	60		30,5	
H = 1,04	GL = 1	P-valor = 0,308		

N: número de determinações, M: média; MP: média do ponto, z: estatística z, H: estatística H, GL: graus de liberdade.

Da Tabela 22, que relaciona os valores de módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras obtidos a partir de peças estruturais e corpos de prova normatizados, tem-se p-valor superior ao nível de significância (5%), constatando equivalência das médias nas duas condições avaliadas, o que implica que as dimensões das amostras não influenciam de forma significativa na obtenção dos valores de rigidez na compressão paralela das madeiras.

Quanto às madeiras de florestas nativas, não há estudos comparativos entre tais propriedades para que seja feito maior análise dos resultados. Contudo, o resultado atesta a discussão da seção 4.1.

Ainda, a relação calculada entre valores médios dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras se manteve na faixa encontrada por Santos e Ballarin (2002) entre 0,75 e 0,78.

Por fim, tem-se evidências de que o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras em corpos de prova pode ser considerado como propriedade das peças estruturais para madeiras de florestas tropicais.

5. CONCLUSÕES

Dentre as técnicas alternativas, menos restritivas e onerosas para o mercado da construção, tem-se o ensaio de vibração transversal aliado ao contexto. Por meio do presente estudo e demais expostos, concluiu-se que para a estimativa de valores de módulo de elasticidade para peças estruturais, este método apresenta confiabilidade (p-valor de 0,647).

Tal fato contribui para melhor classificação das madeiras comerciais, uma vez que os equipamentos utilizados são de custos significativamente inferiores aos de máquinas de ensaio universais utilizadas na determinação das propriedades de resistência e rigidez da madeira. Ainda, este método é considerado relativamente simples e, portanto, é realizado em um curto intervalo de tempo.

Em relação à segurança, considerando a diferença entre o comportamento de peças estruturais e de corpos de prova normatizados, constatou-se que, por serem os p-valores superiores ao nível de significância (5%), há equivalência das médias nas duas condições avaliadas, o que implica que os métodos de ensaio e os tamanhos das peças não foram significativos na obtenção dos módulos de elasticidade.

Portanto, os módulos de elasticidade obtidos por meio dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos normatizados pela ABNT NBR 7190:1997, podem ser considerados como propriedades das peças estruturais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como verificado, o emprego de técnicas não destrutivas, destacando-se o método da vibração transversal, contribui de modo positivo para classificação de espécies de madeiras. Devido a facilidade de aplicação do método, sugere-se novas pesquisas no intuito de obter demais propriedades mecânicas da madeira com base nos resultados obtidos pelo método.

Quanto às questões de equivalência entre módulos de elasticidade obtidos a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos e peças estruturais, aqui constatada, propõe-se a extensão do número de espécies analisadas de modo a contribuir para os resultados atestados pelo presente estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. H.; DIAS, A. A. Comparison between test methods to determine wood embedment strength parallel to the grain. *Revista Árvore*, v.40, n.4, p. 741-748, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000400018

ALMEIDA, D. H., et al. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. *Scientia Florestalis*, v. 40, n. 110, p. 303-309, 2016b.

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, n.3, p. 67-71, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.01

ALMEIDA, D. H. et al. Estimativa de Propriedades de Resistência e Rigidez na Flexão Estática Através de Parâmetros Colorimétricos da Madeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, Florianópolis, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2244**. Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Propriedades da Madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* Estimadas por Colorimetria. *Cerne*, v. 19, n. 3, p. 461-466, 2013.

ANDRADE JUNIOR, J. R. et al. Avaliação das condições estruturais de telhados construídos com madeira brasileira nativa. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v.13, n. 32, 2012.

AQUINO, F. R. et al. (2017). Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, p. 1-9, 2017. DOI: 10.1007/s00107-017-1168-9

ARRUDA, L. M.; MENEZZI, C. H. S. D., ANDRADE, A. Utilization of a thermomechanical process to enhance properties of hardwood used for flooring. *Brazilian Journal of Wood Science*, v. 6, n. 3, p. 223-231, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 10, n. 25, 2009.

BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao Intemperismo Artificial de Quatro Madeiras Tropicais: o Efeito dos Extrativos. *Ciência Florestal*, v. 19, n. 1, p. 23-30 2009.

BATISTA, A. M.; ROSSI, N.; MASCIA, N. T.; FURLANI, J. E. Estudo da flexão estática: relação entre peças de madeira com dimensões estruturais e dimensões reduzidas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. São Carlos, 2000.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 4, p. 83-98, 2009.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para Classificação Visual de Peças Estruturais de *Pinus* sp. *Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos*, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CARREIRA, M. C.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. *Semina: Ciências Exatas e da Terra*, v. 29, n. 1, p. 3-14, 2008.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; SEGUNDINHO, P. G. A. Nondestructive Evaluation of *Corymbia citriodora* Logs by Means of the Free Transverse Vibration Test. *Journal of Nondestruct Evaluation*, v. 36, n. 26, 2017.

CASSIANO, C. et al. Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. *Scientia Florestalis*, v. 41, n.100, p. 457-468, 2013.

CHAUHAN, S.; SETHY, A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, v.18, n. 2, p. 373-382, 2016.

CHEN, Y.; GUO, W. Mechanical Properties Evaluation of Two Wood Species of Ancient Timber Structure with Nondestructive Testing Methods. *BioResources*, v. 11, n. 3, p. 6600-6612, 2016.

CHEN, Y.; GUO, W. Nondestructive Evaluation and Reliability Analysis for Determining the Mechanical Properties of Old Wood of Ancient Timber Structure. *BioResources*, v. 12, n. 2, p. 2310-2325, 2017.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n. 2, p. 23-27, 2016.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Physico-Mechanical Characterization of the *Anadenanthera colubrina* Wood Specie. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, v. 37, n. 2, p. 376-384, 2017.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia Florestalis*, v. 65, p. 102-113, 2004.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Vigas de madeira de baixa e média densidade reforçadas com FRP – avaliação teórica e experimental. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 3, n. 8, 2002.

FREITAS, A. S.; GONÇALEZ, J. C.; MENEZZI, C. H. D. Tratamento Termomecânico e seus Efeitos nas Propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.). *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 4, p. 565-572, 2016.

GONZAGA, A. L. Madeira: Uso e Conservação. *Cadernos Técnicos*, Brasília: IPHAN/MONUMENTA, n. 6, 2006.

GREEN, D. W. et al. Mechanical Grading of Round Timber Beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2006.

HODOUSEK, M. et al. Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x Canadensis*. *BioResources*, v. 12, n. 1, p. 270-282, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras. IPT, 2017. Disponível em: <http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira>. Data de acesso: 20. jun. 2017.

JANKOWSKY, I. P. et al. Madeiras Brasileiras. *Spectrum*, Caxias do Sul, v. 1, 1990.

JESUS, J. M. H.; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Classes de Resistência de Algumas Madeiras de Mato Grosso S. *Engineering and Science*, v. 3, n. 1, 2015.

KERBER, P. R. et al. Colorimetry and surface roughness of three amazon woods submitted to natural weathering. *Nativa*, v. 4, n. 5, p. 303-307, 2016.

LAHR, F. A. R. et al. Full Characterization of *Erisma uncinatum* Warm Wood Specie. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n.5, p. 147-150, 2016.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de Peroba-Mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (APOCYNACEAE). *Floresta*, v. 38, n. 1, 2008.

MEDEIROS NETO, P. N.; PAES, J. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutivas e destrutiva. *Scientia Florestalis*, v. 44, n. 111, p. 683-690, 2016.

MICHOT, S. Classification subjective des parquets de chêne: rapport de stage. Epinal: Université de Nancy I, 1994.

MINÁ, A. J. S.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C. Avaliação da rigidez e da resistência de postes de madeira para uso como estacas para fundações. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. Cuiabá, 2004.

MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira: análise do número de ciclos de carregamento. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 3, n. 8, 2002.

OKINO, E. Y. A. et al. Ensaio acelerado de laboratório de três espécies de madeiras da Amazônia chamadas de Tauari, expostas aos fungos de podridão-branca e parda e resposta colorimétrica de acordo com o sistema cie l* a* b*. *Ciência Florestal*, v. 25, n. 3, p. 581-593, 2015.

PEDRESCHI R.; GOMES F. C.; MENDES L. M. Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. *Cerne*, Lavras, v. 11, n. 3, p. 283-293, 2005.

RIBEIRO, E. S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. *Nativa*, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.

SALES, A.; CANDIAN, M.; CARDIN, V. S. Nondestructive evaluation of timber: the new Brazilian code for the design of timber structures. *Materials and Structures*, v. 43, p. 213-221, 2010.

SANTOS, E. S.; BALLARIN, A. W. Correlações entre módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras e à flexão para algumas espécies de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. Uberlândia, 2002.

SILVA, D. A. L. et al. Influence of testing methods to determine the bending modulus of elasticity of wood. *Vértices*, v. 17, p. 127-137, 2016.

SOBRAL, L. et al. Acertando o Alvo 2: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no estado de São Paulo. Belém: Imazon, 2002. 72p.

STANGERLIN, D. M. et al. Dureza Rockwell da madeira de três espécies amazônicas submetidas a ensaios de apodrecimento acelerado. *Ciência Rural*, v. 43, n. 4, p. 623-630, 2013.

TELES, R. F. (2014). Ensaaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Forest Products Laboratory .Madison: USDA, 2010. 509p. (General Technical Report, FPL-GTR-190)

WIEDENHOEFT, A. Structure and function of wood. Wood Handbook: wood as an engineering material, Centennial Edition, Forest Products Laboratory (FPL) (ed.), PL/USDA, Madison, 2010.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Avaliação do módulo de elasticidade de peças estruturais roliças e de corpos-de-prova de *Pinus elliotti*. *Scientia Florestalis*, v. 41, p. 283-291, 2013.