UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

BÁRBARA BRANQUINHO DUARTE

**Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da
madeira**

São Carlos
2017

BÁRBARA BRANQUINHO DUARTE

**Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da
madeira**

Versão Corrigida

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

**São Carlos
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimentos
ao Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP.

B812i Branquinho Duarte, Bárbara
Influência de componentes químicos em propriedades
mecânicas da madeira / Bárbara Branquinho Duarte;
orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São Carlos,
2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais e Área de
Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e
Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Propriedades físico-mecânicas. 2. Porosidade. 3.
Celulose. 4. Hemicelulose. 5. Lignina. 6. Extrativos.
7. Cinzas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: **BÁRBARA BRANQUINHO DUARTE**

Título da tese: "Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira"

Data da defesa: 20.07.2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Eduardo Chahud**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Profª. Drª. **Marília da Silva Bertolini**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/Unesp - Itapeva)

Aprovado

Prof. Dr. **José Sílvio Govone**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/Unesp - Rio Claro)

Aprovado

Dr. **Ronaldo Soares Teixeira**
(Pós-doutorando/CNPq)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais:

Prof. Associado **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais,
Simone e César por todo amor, carinho e apoio incondicional.
Minha irmã Victória, minha avó Ignês e meu noivo pelo amor e carinho.
Ao meu mestre Francisco Antonio Rocco Lahr, pela confiança,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

Aos meus pais Simone e Cesar, que são minha base e estrutura, que me apoiam incondicionalmente com muito amor e carinho.

À minha querida avó Maria Ignês e minha irmã Victória, por me apoiarem sempre e pelo amor e carinho.

Ao meu noivo, João Paulo, ao apoio incondicional em todos os momentos que sempre incentivou sempre com muito carinho, amor e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, minha gratidão pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de alguém que transpõe sabedoria e pelo apoio durante todo o processo de definição e orientação da tese.

Minha sincera gratidão ao Prof. Dr. Antonio Aprício da Silva Curvelo, que desde meu ingresso na pesquisa, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao Prof. Dr. André Luis Christoforo, pelo apoio com os conhecimentos em estatística e escrita científica, além da paciência e amizade.

À Escola de Engenharia de São Carlos, em especial ao seu Departamento de Engenharia de Materiais pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao Departamento de Estruturas, e principalmente ao LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras por propiciar o desenvolvimento de diversas atividades deste trabalho.

Ao Instituto de Química de São Carlos - IQSC, especificamente ao laboratório de Físico-Química Orgânica, pela oportunidade de realização das análises químicas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos os amigos, colegas e técnicos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos na realização desde trabalho e na participação desta etapa da minha vida.

Enfim, Muito obrigada a todos!

Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.

Chico Xavier

RESUMO

DUARTE, B. B. Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira. 119p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A madeira é muito empregada em diferentes campos, dentre os principais tem-se a construção civil, visto que a relação entre resistência mecânica e densidade, para a madeira, é das mais altas no caso dos materiais empregados na construção civil. Neste sentido, o Brasil se encontra em posição favorável, pois já dispõe diversas áreas certificadas para extração de madeiras, no âmbito da Floresta Amazônica. A fim de obter as melhores respostas na utilização desse material, necessita-se de sua completa caracterização. Entretanto, com a anisotropia e a heterogeneidade da madeira, muitas propriedades devem ser determinadas, o que exige equipamentos específicos, técnicos especializados e, por conseguinte, o tempo despendido é considerável. Neste contexto, é urgente a definição de procedimentos que tornem mais expedita e igualmente confiável a caracterização. No presente estudo foi avaliada, de forma inédita, a possibilidade de propriedades físico-mecânicas da madeira se relacionar com parâmetros como porosidade, densidade aparente e componentes químicos (celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas). Foram caracterizadas dez espécies tropicais de madeira, por meio dos ensaios descritos no Anexo B da Norma ABNT NBR 7190/1997. Os componentes químicos foram determinados pelo método Klason modificado, a partir da norma TAPPI T-222 om-02, e a porosidade pela intrusão de mercúrio. A partir dos resultados, foram aplicados modelos de regressão multivariadas, dos quais se obtiveram equações para estimar cada propriedade a partir das diversas variáveis fixas (densidade aparente, porosidade e componentes químicos). Nas relações encontradas verificaram-se ótimos resultados como, por exemplo, a equação que estima a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) levou a R^2 99,69%. Deste modo, a hipótese inicial se confirmou, o que possibilita a estimativa confiável das propriedades estudadas com os parâmetros citados.

Palavras-chave: Propriedades físico-mecânicas, Porosidade, Celulose, Hemicelulose, Lignina, Extrativos, Cinzas.

ABSTRACT

DUARTE, B. B. **Influence of chemical components on mechanical properties of wood**. 2017. 119 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Wood is a very used material in different fields, among them civil construction can be highlighted, since the relation between mechanical strength and density for wood is the highest in the case of building materials. In this sense, Brazil is in a favorable position, as it already has several areas certified for timber extraction, within the Amazon Forest. In order to obtain the best responses in the use of this material, its complete characterization is required. However, due to wood anisotropy and heterogeneity, many properties must be determined, which requires specific equipment sets, technical expertise and therefore time spent is considerable. In this context, it is urgent to devise procedures that make more expeditious and equally reliable the wood characterization. In the present study, it was considered the possibility of wood physical-mechanical properties can be estimated in an unprecedented way, based on parameters such as porosity, chemical components (cellulose, hemicellulose, lignin, extractives and ash) and density. Ten tropical wood species were characterized by tests described in Annex B of ABNT NBR 7190/1997. Chemical components were determined by the modified Klason method, from TAPPI standard T-222 om-02 and the porosity by the intrusion of mercury. To the results, multivariate regression models were applied and equations were obtained to estimate each property from the several fixed variables (apparent density, porosity and chemical components). Very great results were reached from these relationships, for example, the equation that estimates strength in compression parallel to the grain (f_{c0}) led to R^2 99.69%. Thus, the initial hypothesis was confirmed, which allows the reliable estimation of the studied properties with the mentioned parameters.

Keywords: Physical-mechanical properties, Porosity, Cellulose, Hemicellulose, Lignin, Extractives, Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amostra de madeira de Tatajuba	30
Figura 2. Amostra de madeira de Roxinho	32
Figura 3. Amostra de madeira de Cambará	34
Figura 4. Amostra de madeira de Cedroarana	35
Figura 5. Amostra de madeira de Cumaru	37
Figura 6. Amostra de madeira de Cupiúba.....	38
Figura 7. Amostra de madeira de Caixeta	40
Figura 8. Amostra de madeira de Cedro	42
Figura 9. Amostra de madeira de Sucupira	44
Figura 10. Amostra de madeira de Cajueiro.....	45
Figura 11. Representação da molécula de celulose.....	47
Figura 12. Açúcares componentes das hemiceluloses	48
Figura 13. Modelo estrutural de lignina de folhosa (<i>Fagus sylvatica</i>) proposto por Nimz.	49
Figura 14. Corpos-de-prova para ensaio de estabilidade dimensional da madeira...	62
Figura 15. Corpo de prova para ensaio de compressão paralela.....	63
Figura 16. Máquina de ensaio de compressão paralela com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.	64
Figura 17. Corpo de prova para ensaio para tração paralela	65
Figura 18. Máquina de ensaio universal utilizado para tração paralela com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.	66
Figura 19. Corpo de prova antes do ensaio de compressão normal.....	67
Figura 20. Máquina de ensaio de compressão normal com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.	68
Figura 21. Detalhe esquemático da geometria do corpo-de-prova para o ensaio de tração normal às fibras.....	69
Figura 22. Corpo de prova para ensaio para tração normal.....	70
Figura 23. Máquina de ensaio universal utilizado para tração normal com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.	70
Figura 24. Detalhe esquemático da geometria do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.	71

Figura 25. Corpo de prova para ensaio de cisalhamento	71
Figura 26. Máquina de ensaio universal utilizado para cisalhamento com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.....	72
Figura 27. Detalhe esquemático da geometria do corpo de prova para ensaio de fendilhamento.	73
Figura 28. Corpo de prova para ensaio de fendilhamento	73
Figura 29. Máquina de ensaio universal utilizado para fendilhamento com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.	74
Figura 30. Corpo de prova para ensaio de flexão	75
Figura 31. Máquina de ensaio utilizada para flexão com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.	76
Figura 32. Corpo de prova para ensaio de tenacidade	77
Figura 33. Máquina de ensaio utilizada para tenacidade com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.	77
Figura 34. Corpo de prova para ensaio de dureza	79
Figura 35. Máquina de ensaio utilizada para dureza com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.	79
Figura 36. Moinho de facas utilizado na moagem do material.....	80
Figura 37. Extrator tipo Soxhlet sendo utilizado para extração.....	81
Figura 38. Balança analítica utilizada em todo processo de análise química com a massa de uma das amostras colocadas no tubo borossilicato autoclavável	82
Figura 39. Tubos borossilicados com material momento anterior à adição do ácido sulfúrico e à agitação	82
Figura 40. Tubo borossilicado com lignina após ser autoclavado e resfriado.....	83
Figura 41. Processo de filtração	84
Figura 42. Cromatógrafo utilizado na análise química	86
Figura 43. Valores médios das propriedades Por, pap, RRT e RTT.....	90
Figura 44. Valores médios da f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} e da f_{v0} para as espécies de madeira.....	91
Figura 45. Valores médios da f_{s0} , f_M , f_{c90} , f_{H0} e f_{H90} para as espécies de madeira.....	92
Figura 46. Valores médios do E_{c0} , E_{c90} , E_{t0} e E_M para as espécies de madeira.	93
Figura 47. Valores médios dos constituintes da madeira para todas as espécies....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Tatajuba.....	31
Tabela 2. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Roxinho.....	33
Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedroarana.....	36
Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cumaru	38
Tabela 5. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cupiúba	39
Tabela 6. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Caixeta (S. versicolor).....	41
Tabela 7. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro (C. fissilis)	43
Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Sucupira.....	44
Tabela 9. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cajueiro	46
Tabela 10. Composição química de espécies domésticas europeias	50
Tabela 11. Teor de cinzas de cinco espécies tropicais	52
Tabela 12. Teor de cinzas de seis espécies tropicais	52
Tabela 13. Resultados de algumas propriedades da madeira adaptados da norma Brasileira ABNT NBR 7190/97	54
Tabela 14. Resultados de algumas propriedades da madeira adaptados do Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil	54
Tabela 15. Comparativo dos teores de componentes químicos Tatajuba Cumaru e Sucupira, obtidos pelo estudo e por Santana e Okino (2007).	96
Tabela 16. Resultados dos modelos de regressão multivariadas considerando as 10 espécies de madeira.	98
Tabela 17. Intervalos dos valores das variáveis independentes utilizadas nos modelos de regressão envolvendo as 10 espécies de madeira.	99
Tabela 18. Resultados dos efeitos (+ ou –) das variáveis independentes na estimativa das propriedades da madeira considerando as 10 espécies.	101

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCMC	- Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos
Cel	- Celulose
Ci	- Cinzas
COPANT	- Comisión Panamericana de Normalización Tecnológica
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
EUA	- Estados Unidos da América
Ext	- Extrativos
FCM	- Departamento de Física e Ciência dos Materiais
Hem	- Hemicelulose
HMF	- Hidroximetilfurfural
IFSC	- Instituto de Física de São Carlos
LaMEM	- Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
LA	- Lignina A - Lignina Insolúvel
LB	- Lignina B - Lignina Solúvel
NBR	- Norma Brasileira
NIR	- Near-infrared
NREL	- National Renewable Energy Laboratory
SiNAT	- Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais
SNIF	- Sistema Nacional de Informações Florestais
USP	- Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. Objetivos	27
1.2. Justificativa.....	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1. Espécies de Madeira.....	29
2.1.1. Tatajuba.....	29
2.1.2. Roxinho (Pau-Roxo)	31
2.1.3. Cambará.....	33
2.1.4. Cedroarana.....	34
2.1.5. Cumaru.....	36
2.1.6. Cupiúba	38
2.1.7. Caixeta	40
2.1.8. Cedro.....	41
2.1.9. Sucupira	43
2.1.10. Cajueiro.....	45
2.2. Constituintes Químicos da Madeira.....	46
2.2.1. Celulose.....	46
2.2.2. Hemicelulose	48
2.2.3. Lignina	48
2.2.4. Extrativos.....	50
2.2.5. Cinzas.....	51
2.3. Análise de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	52
2.4. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira.....	53
2.5. Estimativa de Propriedades da Madeira.....	55

2.6.	Considerações finais a respeito da revisão bibliográfica	57
3.	MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1.	Caracterização físico-mecânica da madeira	59
3.1.1.	Umidade.....	59
3.1.2.	Densidade aparente	60
3.1.3.	Estabilidade dimensional da madeira.....	60
3.1.4.	Compressão paralela às fibras.....	62
3.1.5.	Tração paralela às fibras.....	64
3.1.6.	Compressão normal às fibras	66
3.1.7.	Tração normal às fibras.....	68
3.1.8.	Cisalhamento	70
3.1.9.	Fendilhamento	72
3.1.10.	Flexão	74
3.1.11.	Resistência ao impacto na flexão e Tenacidade.....	76
3.1.12.	Dureza	78
3.2.	Análise química da madeira	80
3.2.1.	Teor de extrativos	80
3.2.2.	Teor de lignina	81
3.2.3.	Teor de celulose e poliose	85
3.2.4.	Teor de cinzas.....	87
3.3.	Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	87
3.4.	Análise Estatística	88
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1.	Propriedades físicas e mecânicas	89
4.2.	Composição Química	93
4.3.	Análise estatística.....	96

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DO TRABALHO..	103
6. REFERÊNCIAS.....	105
Apêndice - Tabelas com resultados dos ensaios preconizados pelo Anexo B da NBR 7190/97, componentes químicos e porosidade para cada madeira.....	115

1. INTRODUÇÃO

Presente no cotidiano principalmente da construção civil, rural e de habitação, na indústria de papel, de móveis, de embalagens e de instrumentos musicais, entre outros setores, a madeira é o material de procedência biológica mais conhecido e empregado, que, além de ser utilizado na íntegra, consiste de grande quantidade de substâncias que são aproveitadas como matérias primas em quase todos os campos da tecnologia (DIAS, 2000; KLOCK, 2005).

Destaca-se que a madeira é excelente alternativa para aplicações estruturais por apresentar uma alta relação entre a resistência e a densidade. (CALIL JR et. al., 2011; ALMEIDA et. al., 2014; ALMEIDA et. al., 2015; CHRISTOFORO et. al., 2016; ALMEIDA et. al., 2016).

Conforme Gerald Howard, presidente da Associação Nacional de Construtores dos EUA, “a madeira não só está presente em quase todas as casas de família recém-construídas nos Estados Unidos, como é inconcebível construir uma casa sem a madeira. Mesmo as casas com paredes de tijolos ou pedras têm elementos estruturais de madeira” (CELULOSE ONLINE, 2017).

As construções familiares e comerciais, nos EUA e no Canadá, por exemplo, sempre foram importantes para o mercado de produtos à base de madeira, sendo aproximadamente um terço dos produtos de madeira dos EUA consumido na construção das moradias (APA, 2012).

No mercado europeu, a utilização da madeira na construção e em outras áreas tem sido ampliada nos últimos anos, com a disponibilidade crescente de conhecimentos na área e um conjunto de políticas públicas que apoiam o uso de materiais à base de madeira. O resultado é o menor consumo de energia e a minoração das emissões de CO₂ em comparação com outros materiais, como concreto, tijolo ou aço (ERIKSSON et al. 2011).

No Brasil, a madeira é um dos materiais mais tradicionais empregados na construção civil, com destaque para os componentes da edificação, como as estruturas de cobertura, os pisos, as esquadrias, além de estar presente nas fôrmas e cimbramentos, nas pontes e passarelas (ROCCO LAHR et al., 2016b; CHRISTOFORO et al, 2017c). Conforme o SNIF (Sistema Nacional de Informações Florestais), em 2014 a produção total de madeira serrada no Brasil foi de

aproximadamente 11 milhões de m³, sendo este segmento um dos principais do país.

O consumo de madeira e de produtos derivados da madeira tem crescido gradativamente nos últimos anos. Cabe destacar que isto ganha mais importância, depois da aprovação, pela Caixa Econômica Federal, de processos construtivos envolvendo os mencionados produtos. Por exemplo, o sistema construtivo Wood Frame, um dos métodos mais modernos utilizados em todo globo e regulado em nosso território pela Diretriz SiNAT N005/2011 do Ministério das Cidades (ARAÚJO et al, 2016; STAMADE, 2017).

A Norma ABNT NBR 7190/1997 é o principal instrumento norteador de projetos e estudos de madeira em nosso país, fruto do trabalho de docentes da Universidade de São Paulo, especificamente da Escola Politécnica e da Escola de Engenharia de São Carlos. Seu objetivo é fixar as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbramentos. O anexo E desta norma apresenta seis das principais propriedades requeridas para o dimensionamento de elementos estruturais, divulgadas para 43 espécies de madeiras dicotiledôneas e coníferas.

Estima-se que, na Floresta Amazônica, ocorram mais de 10 mil espécies, muitas em fase de introdução no mercado, sendo que apenas cerca de 600 estão devidamente caracterizadas, restringindo sobremaneira seu potencial de aplicação. Nesse sentido, é de suma importância a caracterização de novas espécies (HUBBELL et al., 2008).

As madeiras extraídas no Brasil apresentam possibilidade de emprego em vários setores, porém muitas vezes elas têm sido comercializadas com nomes genéricos e, assim, sem qualquer caracterização, o que pode influenciar negativamente em seu desempenho em serviço (ALMEIDA, 2015).

Apesar de ser importante o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira, elas são obtidas por meio de uma longa série de ensaios e de diversos equipamentos, nem sempre disponíveis nos centros de pesquisa no Brasil, o que dificulta sua determinação (STOLF et al, 2015). Conforme ter Steege et al (2016), para catalogar e caracterizar todas as espécies de árvores da Amazônia levaria pelo menos 300 anos.

Nesse sentido, a norma brasileira e alguns poucos estudos apresentam relações para a estimativa da resistência e da rigidez a partir de outras propriedades das madeiras, entretanto não há equações que associem também com os componentes químicos constituintes da madeira (ROCCO LAHR et al, 2010; ALMEIDA et al, 2015).

Por exemplo, Dias e Lahr (2004), consideraram os resultados obtidos para quarenta espécies de madeiras tropicais do Brasil e sugeriram equações com homogeneidade da variância e baixo desvio padrão, das quais pode-se admitir dependência entre densidade (12%) e propriedades de resistência e rigidez.

Todavia, os resultados dos modelos de regressão na estimativa das propriedades não forneceram bons ajustes, visto que os valores para R^2 foram, em sua maioria, abaixo de 0,80, por ter apenas a densidade parâmetro independente. Nas conclusões os autores já recomendavam a inserção de novos parâmetros para aperfeiçoar as estimativas das propriedades mecânicas.

Nesse sentido, o foco deste estudo inédito foi estimar propriedades de resistência e de rigidez da madeira pela consideração dos componentes químicos e os parâmetros físicos da densidade aparente e porosidade por intermédio de modelos de regressão que sejam seguros.

1.1. Objetivos

O objetivo desse estudo foi aplicar modelos de regressão multivariadas, a fim de demonstrar a viabilidade de se estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira a partir dos resultados da:

- Composição química da madeira:
  - % de Lignina Solúvel;
  - % de Lignina Insolúvel;
  - % de Hemicelulose;
  - % de Celulose.
  - % de Extrativos
  - % de Cinzas.
- Densidade aparente.
- Porosidade.

Com isso, se espera reduzir o tempo para se estimar as propriedades físicas, de resistência e de rigidez a seguir elencados:

- Retração radial total (R_{radT})
- Retração tangencial total (R_{tgT})
- Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})
- Resistência à tração paralela às fibras (f_{t0})
- Resistência à tração normal às fibras (f_{t90})
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})
- Resistência ao fendilhamento (f_{s0})
- Resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_m)
- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0})
- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (E_{t0})
- Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática (E_m)
- Dureza paralela às fibras (f_{h0})
- Dureza normal às fibras (f_{h90})
- Tenacidade (W)
- Resistência à compressão normal às fibras (f_{c90})
- Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras (E_{c90})

1.2. Justificativa

Para se proceder à caracterização completa de uma espécie necessita-se de um longo trabalho em laboratório (640 determinações, obtidas em ensaios de cerca de 200 corpos de prova). É fácil inferir o tempo demandado para se alcançar a caracterização de um número significativo de espécies, mantidos os procedimentos atualmente adotados. Assim, é imprescindível estabelecer alternativas experimentais que permitam se estimarem mais rapidamente as propriedades das espécies tropicais para viabilizar sua adequada inserção no mercado nacional e internacional, do qual o Brasil participa com milhões de m³ de madeira, anualmente.

Portanto este trabalho vem, de maneira inédita, utilizar-se de modelos de regressão multivariadas para estimar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função das componentes de composição química, densidade aparente e porosidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme mencionado anteriormente, o número de espécies de madeiras existentes é muito maior que a quantidade destas espécies já caracterizadas completamente.

Neste estudo são caracterizadas espécies que, até então, não tinham uma caracterização completa da madeira, como detalha o Anexo B da NBR 7190/1997. Ressalta-se que existem algumas propriedades destas madeiras e de outras já estudadas e divulgadas que serão apresentadas a seguir, mas que foram fundamentadas principalmente em ensaios do antigo Método Brasileiro (MB26, em seguida NBR 6230). Ressalta-se que para garantir que o trabalho tivesse plena representatividade, foram escolhidas espécies que são agrupadas nas cinco classes de resistência preconizadas pela NBR 7190 para as dicotiledôneas (duas espécies para cada classe), ou seja, cobre uma ampla faixa de densidades.

2.1. Espécies de Madeira

No presente trabalho foram estudadas 10 espécies exóticas de madeiras. A seguir são destacadas informações destas espécies conforme o portal REMADE. Este portal, atualizado desde 2001, é especializado no fornecimento de informações do setor de base florestal – silvicultura, madeira, móveis, painéis, papel e celulose, biomassa e meio ambiente.

2.1.1. Tatajuba

A Tatajuba, também conhecida por Bagaceira, Amarelo, Amarelão, Amapá-rana ou Garrote nos locais de ocorrência, tem nome científico *Bagasse guianensis*. Alguns países também a conhecem como Bagasse ou Cow-Wood. A Figura 1 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 1. Amostra de madeira de Tatajuba

Esta árvore é encontrada, principalmente, nos estados da região norte do Brasil, chegando a alturas entre 15 a 25m e expele látex, caso tenha a casca ferida.

A madeira é caracterizada por ter cheiro e sabor indistintos, textura média, grã variando de regular a entrecruzada e alto brilho nas superfícies longitudinais. Nela percebe-se que o cerne e o alburno são diferenciados, sendo que o primeiro é amarelo logo após o corte, algumas vezes com faixas mais escuras, mas com a exposição á luz torna-se pardo-queimado.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físico-mecânicas da madeira de Tatajuba. Verifica-se que ela é densa, com alta resistência mecânica e baixa retratibilidade volumétrica.

Tabela 1. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Tatajuba

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,75	750
Básica		0,62	620
Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	5,2	6,6	10,2
Índice tangencial/radial			1,27
Resistência Mecânica (kgf/cm²)		Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial		555	813
Flexão estática		1.020	1.410
Tração normal		74	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/246/madeiras-brasileiras-e-exoticas/tatajuba>.

De acordo com as propriedades, a Tatajuba é relativamente fácil de ser trabalhada com auxílio de ferramentas tanto manuais quanto mecânicas, mas não aceita pregos com facilidade e é dura. Sendo assim, é indicada para:

- Partes internas em construção civil (vigas, caibros, ripas, marcos ou batentes de portas e janelas, esquadrias, forros, lambris, rodapés e similares).
- Estruturas externas (postes, moirões, estacas, dormentes, cruzetas, defensas; móveis comuns, tacos e tábuas de assoalho, etc.).
- Canoas escavadas em troncos inteiros.

2.1.2. Roxinho (Pau-Roxo)

O nome científico do Roxinho é *Peltogyne recifensis*, mas comumente chamado também de Pau-Roxo, Barabu e Guarabu. Esta espécie ocorre principalmente nas matas pluviais de terras altas da região costeira de Pernambuco,

mas outras espécies do gênero *Peltogyne* são encontradas em matas altas de países das Américas do Sul, Central e Norte (México). A Figura 2 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 2. Amostra de madeira de Roxinho

Com tronco reto e limpo por 15m ou mais a árvore do roxinho pode ter tamanhos variados entre 38 e 45m com diâmetros de mais de 1,2m. Sua madeira tem grã irregular, cheiro e gosto imperceptíveis. Além disto, a superfície é lisa ao tato e tem de brilho atenuado. O cerne é de coloração roxa, que escurece quando exposto ao ar, já o alburno difere-se pela cor branco-amarelada.

Na Tabela 2 são mostradas as propriedades físico-mecânicas da madeira do Roxinho, sendo que esta é densa e com alta resistência mecânica, como a Tatajuba, mas possui média retratibilidade.

Tabela 2. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Roxinho

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		1,13	1.130
Básica		0,87	870

Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	4,4	7,9	14,4

Índice tangencial/radial			1,79

Resistência Mecânica (kgf/cm²)	Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial	828	1.025
Flexão estática	1.508	1.841
Tração normal	97	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/221/madeiras-brasileiras-e-exoticas/pau-roxo>.

A madeira do Roxinho é indicada para construções externas, postes, dormentes, viga, caibros, esteios, tacos para assoalho, construção naval, carroceria, torneados, tacos de bilhar, mobiliário. Estas aplicações se dão ao fato da fácil colagem e de bom acabamento, mas ela apresenta dificuldades ao trabalhar manualmente ou com máquinas, pois quando recebe aumento de temperatura ela exsuda uma resina gomífera.

2.1.3. Cambará

O Cambará, *Erisma uncinatum*, tem porte menor em comparação com outras duas apresentadas, sendo que a árvore adulta chega a 15m de altura e 0,6m de diâmetro. Na maioria das ocorrências, tem tronco e ramificações irregulares, copa baixa e arredondada, folhas verde-claras e casca externar acastanhada, mas interna oliva e fibrosa. A Figura 3 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 3. Amostra de madeira de Cambará

Em relação à madeira, esta espécie tem textura fina, grã direita para irregular, superfície lisa ao tato e brilho pouco acentuado, não se percebe cheiro e gosto. Quanto mais idade, tende a ter mais cerne que alburno, sendo que este é branco-cinza e destaca daquele, cuja coloração é bege-claro com manchas amareladas ou amarelo-claro quando polido recentemente.

Ressalta-se que o Cambará é de um gênero pantropical, com 66 espécies e varias subespécies e variedades. As principais subespécies são subsp. *Ceanothifolia* e subsp. *Floccosa* (CABRERA & KLEIN, 1973). Diversas destas espécies são encontradas tanto no Brasil, principalmente entre o Rio Grande do Sul a Bahia, quanto na faixa que tem início nas Antilhas percorre até a Argentina, além das distintas altitudes (entre 20m a 1.650m acima do nível do mar).

Esta madeira produz lenha e carvão de boa qualidade, mas é inadequada para celulose e papel. É utilizada na construção civil, esteios, esquadrias, caibros, estacas, forro, tacos, peças torneadas e na construção naval.

2.1.4. Cedroarana

Outra árvore de grande porte, a Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis*), Cedro-agono, Cedro-branco ou Taperibá-açu no norte do Brasil ou Tornulo, Paricá e Yacayacá em outros países onde ocorre (Peru e Colômbia), tem altura entre 30 a 48m, copa rala e casca rugosa, semelhante à árvore de Cedro, como detalhado posteriormente no trabalho. A Figura 4 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 4. Amostra de madeira de Cedroarana

Pela facilidade de trabalho tanto com ferramenta manual, quanto com máquinas e o bom acabamento, a madeira de Cedroarana é recomendada para móveis comuns, partes internas em construção civil (molduras, esquadrias, rodapés, guarnições e similares), cabos de vassouras, brinquedos, embalagens, etc.

Além disso, esta madeira é caracterizada por apresentar cerne róseo-avermelhado a bege-rosado ou esverdeado; alburno mais claro e lustroso. Grã direita e irregular; lisa ao tato; cheiro e gosto imperceptíveis.

A Tabela 3 aponta as propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedroarana, sendo que esta tem massa específica média e baixas retratibilidade e resistência mecânica.

Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedroarana

Massa específica	g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)	0,64	640
Básica	0,53	530

Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	-	-	11,8

Resistência Mecânica (kgf/cm²)	Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial	254	-
Flexão estática	534	-
Tração normal	-	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/362/madeiras-brasileiras-e-exoticas/Cedroarana>.

2.1.5. Cumaru

Cumaru-de-folha-grande, Cumbaru-roxo ou apenas Cumaru é o nome conhecido para a *Dipteryx odorata*. Ela é uma árvore grande, geralmente encontrada com mais de 50 m de altura e por 1,20 m de diâmetro, cujo tronco tem formato cilíndrico, com fuste de 18 a 24 m de comprimento. A Figura 5 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 5. Amostra de madeira de Cumaru

Esta árvore, muito encontrada em solos com boa drenagem como da região Amazônica e áreas da Colômbia, Guianas e Venezuela, tem as particularidades de fornecer madeira de odor semelhante ao da baunilha e aparência cerosa, sem gosto perceptível. Sua superfície é medianamente lustrosa, cerne com coloração marrom-claro ou marrom-amarelado e alburno é marrom-amarelado, mas distinto.

O Cumaru é muito usado na construção civil, lâminas faqueadas decorativas, cabos de ferramentas, implementos agrícolas, dormentes e cruzetas, forros, tábuas de assoalho. Sua trabalhabilidade é definida por:

- Aceitar polimento, pintura, verniz, lustre e emassamento;
- Obter uma superfície lisa se não estiver presente a grã reversa;
- Ter difícil perfuração

Na Tabela 4 são expostas algumas propriedades da madeira de Cumaru, que pode ser classificada como de alto peso específico, baixa retratibilidade e alta resistência mecânica.

Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cumaru

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,95	950
Básica		0,82	820

Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	5,0	7,6	12,0

Índice tangencial/radial			1,52

Resistência Mecânica (kgf/cm²)	Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial	671	951
Flexão estática	1.324	1.720
Tração normal	62	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/145/madeiras-brasileiras-e-exoticas/>.

2.1.6. Cupiúba

A árvore de nome específico *Goupia glaba* também é conhecida por Cupiúba, Peroba-do-norte ou Cachaceiro. Tem grande porte, atingindo normalmente de 25 a 30 metros de altura e de 0,80 a 1,20 m de diâmetro com casca fibrosa de superfície escamosa. A Figura 6 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 6. Amostra de madeira de Cupiúba

Uma madeira que apresenta cheiro característico e desagradável, quando verde, e gosto indistinto. Possui cerne bege-rosado a acastanhado, uniforme, ou às vezes com veios mais escuros, pardo-rosado e alburno não muito diferenciado, além de grã direita a irregular, textura média, superfície com pouco brilho.

Algumas propriedades físico-mecânicas desta madeira são conhecidas e estão identificadas na Tabela 5. Verifica-se que é uma madeira densa, de médias retratibilidade volumétrica e resistência mecânica, mas boa resistência ao apodrecimento.

Tabela 5. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cupiúba

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,87	870
Básica		0,71	710
Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	4,8	9,1	16,1
Índice tangencial/radial			1,90
Resistência Mecânica (kgf/cm²)		Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial		518	685
Flexão estática		986	1.245
Tração normal		69	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/159/madeiras-brasileiras-e-exoticas/cupiuba>.

Ocorre em matas de terra firme em toda a região Amazônica, tanto em terrenos arenosos como argilosos e é fácil de serrar, aplinar, tornear, colar e parafusar, mas para esta última ação, recomenda-se furação prévia para evitar rachaduras. Além disso, recebe bom acabamento.

Por causa destas especificidades, é empregada em construções externas como estruturas, postes, moirões, dormentes, cruzetas; em construções internas como vigas, caibros, ripas, tacos e tabuas de assoalho, marcos ou batentes de portas e janelas; mobiliário de madeira sólida, torneados, carrocerias, etc.

2.1.7. Caixeta

Existem duas espécies do gênero *Simarouba*, comumente conhecidas por Caixeta, *S. amara* e *S. versicolor*, ambas tem árvores que chegam a 25m de altura e 0,8m de diâmetro. Porém, neste estudo foi utilizada a *S. versicolor*, encontrada em matas pluviais da faixa que vai do Pará e até o Rio de Janeiro. A Figura 7 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 7. Amostra de madeira de Caixeta

A madeira da Caixeta tem cerne e alburno da mesma coloração, branco-palha, quase amarelado e textura grosseira. Além disso, tem superfície lustrosa e lisa, grã direita e gosto amargo.

A Caixeta em questão tem madeira leve, de resistência mecânica e retratibilidade volumétrica baixas, como se pode observar na Tabela 6. Destaca-se também que ela possui pequena resistência natural ao ataque de fungos e insetos.

Tabela 6. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Caixeta (*S. versicolor*)

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,48	480
Básica		0,40	400

Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	3,1	6,7	10,7

Índice tangencial/radial			2,16

Resistência Mecânica (kgf/cm²)	Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial	235	373
Flexão estática	519	752
Tração normal	42	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: [http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/133/madeiras-brasileiras-e-exoticas/caixeta-\(s--versicolor\)](http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/133/madeiras-brasileiras-e-exoticas/caixeta-(s--versicolor)).

Portanto é madeira leve e não muito resistente, e produz um bom acabamento. Macia ao corte e fácil de trabalhar, é indicada para tábuas de forro, embalagens e caixotaria, brinquedos, compensados, cabos de vassoura e instrumentos musicais. Não apresenta problemas de colagem e produz bom acabamento.

2.1.8. Cedro

Existem 3 espécies no Brasil conhecidas como Cedro: *C. odorata*, *C. angustifolia* e *C. fissilis* com árvores semelhantes que tem a peculiaridade de ter casca de cor castanho-grisácea com grandes fissuras longitudinais e profundas. Os tamanhos são variados de pequenas (10m de altura por 0,4 a 0,5m de diâmetro) até grandes, com 30m de altura e 1,3m de diâmetro, além de tronco cilíndrico, longo e pouco tortuoso. Assim como a Caixeta, foi estudada apenas uma delas, a *C. fissilis* (*Cedrela fissilis*). A Figura 8 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 8. Amostra de madeira de Cedro

A madeira tem cheiro característico agradável, gosto ligeiramente amargo. A coloração do cerne varia do bege-rosado-escuro até o castanho-avermelhado e alburno branco e rosado. A textura é grosseira, grã direita ou pouco ondulada e superfície lustrosa, com reflexos dourados.

A Tabela 7 retrata algumas propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro que possui retratibilidade linear e volumétrica baixa, propriedades mecânicas entre baixa e média e classificação entre as madeiras médias quanto à densidade. Todavia a resistência natural contra fungos e insetos é pequena.

Tabela 7. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro (*C. fissilis*)

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,53	530
Básica		0,44	440
Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	4,0	6,2	11,6
Índice tangencial/radial			1,55
Resistência Mecânica (kgf/cm²)		Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial		286	399
Flexão estática		640	828
Tração normal		52	-

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/155/madeiras-brasileiras-e-exoticas/cedro>.

A madeira desta árvore, bastante encontrada em solos úmidos, fundos de vale, baixadas e ao longo dos rios, é utilizada em moveis finos, folhas faqueadas decorativas, molduras para quadros, artigos de escritório, instrumentos musicais etc., além da construção interna (venezianas, rodapés, guarnições, forros, lambris, etc.) e casco de embarcações leves. Estas aplicações se devem ao fato da boa retenção de pregos e parafusos, como também excelente absorção de pigmentos e polimento e da fácil trabalhabilidade, tanto com instrumentos manuais e mecânicos e o aplainamento produz uma superfície lisa e uniforme.

2.1.9. Sucupira

A Sucupira, *Diploptropis purpúrea* ou *Bowdichia nitida*, é uma árvore com ocorrências frequentes nos Estados do Pará, Rondônia, Roraima, Mato Grosso, Maranhão, Amazonas e Amapá, atingindo também as Guianas. A Figura 9 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 9. Amostra de madeira de Sucupira

A sucupira é madeira durável, resistente a fungos e cupins, mas de baixa resistência às brocas marinhas. É caracterizada por ser densa, de cor castanha avermelhada (*Diplotropis*) e de cor castanha (*Bowdichia*), textura grosseira, aspecto fibroso acentuado e grã reversa, com gosto e cheiro indistintos. A Tabela 8 expressa algumas Propriedades físico-mecânicas da madeira de Sucupira

Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Sucupira

Massa específica		g/cm ³	kg/m ³
Aparente (15% de umidade)		0,78	780
Básica		-	-
Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	4,6	7,0	-
Índice tangencial/radial			1,55
Resistência Mecânica (kgf/cm ²)	Madeira Verde	A 15% de umidade	
Compressão axial	-	850	
Flexão estática	-	1439	
Tração normal	52	-	

Fonte: REMADE (2017), disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/445/madeiras-brasileiras-e-exoticas/sucupira>.

Por apresentar propriedades físico-mecânicas entre altas e médias, pode ser usada na construção civil interna e externa, e na leve interna decorativa e interna estrutural, como assoalhos domésticos, mobiliário de alta qualidade, laminas e compensados, decoração e adorno.

Apesar de apresentar defeitos como rachaduras e empenamentos ao secar e ser de difícil aplainamento e secagem, a madeira é fácil de ser torneada, tem ótima aceitação de pregos e parafusos, e bom acabamento.

2.1.10. Cajueiro

De acordo com Freitas et al. (2017), o Cajueiro (*Anacardium sp.*) tem madeira de media densidade, semelhante ao *Pinus sp.*, muito utilizado na indústria moveleira e para estruturas de madeira. Ele é encontrado na região centro-oeste do Brasil, especificamente na faixa do estado do Mato Grosso ao do Tocantins. A Figura 10 apresenta uma amostra da madeira desta espécie.

Figura 10. Amostra de madeira de Cajueiro

A árvore do cajueiro atinge 20 a 45 m de altura e 0,90 a 1,60 m de diâmetro. Já a madeira possui cerne cuja coloração é castanho avermelhado a amarelo quanto é exposição ao ar e o alburno é nitidamente demarcado do cerne, mais claro, com tonalidade rósea variável.

Outras características marcantes desta madeira são o alto brilho e os desenhos formados pelos veios. A textura média para grosseira, grã inter cruzada, odor e gosto imperceptíveis.

Por fim, esta espécie de madeira é vulnerável ao ataque de fungos e insetos, leve, possuindo propriedades mecânicas baixas e retratibilidade também baixa, conforme a indica a Tabela 9.

Tabela 9. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Cajueiro

Massa específica		g/cm³	kg/m³
Aparente (15% de umidade)		0,48	480
Básica		0,41	410
Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	2,8	5,2	8,4
Índice tangencial/radial			1,86
Resistência Mecânica (kgf/cm²)		Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial		173	318
Flexão estática		374	560
Tração normal		-	-

Fonte: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/148/madeiras-brasileiras-e-exoticas/caju>

2.2. Constituintes Químicos da Madeira

2.2.1. Celulose

Conforme Silva (2012), a celulose é o composto orgânico em maior abundância na natureza e destaca-se como principal componente da parede celular dos vegetais, mais especificamente, encontrado na parede secundária na forma de fibras. Miller (1999) e Sjostrom (1981) indicam que o teor de celulose na madeira pode variar de 40% a 50%, justificando sua importância na composição dos tecidos vegetais.

Com a crescente demanda por produtos renováveis e ambientalmente sustentáveis, a celulose é considerada uma fonte inesgotável e o polímero natural

mais abundante no planeta, representando em torno de 95% no algodão e 50% na madeira (em base seca). (FREITAS, 2015; BETTELHEIM; MARCH, 1998).

Um dos principais constituintes das paredes celulares é a celulose (Figura 11), cujas moléculas de glicose são unidas por meio de ligações glicosídicas do tipo β (1 $\rightarrow$ 4) resultam em um polímero de elevada massa molecular com fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$ (MARABEZI, 2009).

Figura 11. Representação da molécula de celulose

Fonte: FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: W. de Gruyter, 1984. (Adaptado).

Segundo FENGEL e WEGENER (1984), os grupos OH presentes nas moléculas de celulose podem formar dois tipos de ligações de hidrogênio:

- As ligações de hidrogênio intermoleculares envolvem grupos OH de moléculas vizinhas, permitindo a formação de estrutura tridimensional.
- As ligações de hidrogênio intramoleculares ocorrem entre grupos OH de uma mesma cadeia e tornam a molécula de celulose mais rígida.

Ainda conforme FENGEL e WEGENER (1984), existe a possibilidade de degradar as fibras e estruturas fibrilares por meio de reações com ácidos concentrados produzindo glicose e derivados de glicose.

2.2.2. Hemicelulose

As hemiceluloses ou polioses são polissacarídeos de menor massa molecular (quando comparados à celulose), apresentam ramificações e são constituídos de vários monômeros diferentes, destacando-se pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e desoxihexoses, além de grupos acetila e ácidos urônicos (Figura 12). As proporções destes açúcares variam nas diferentes espécies de plantas. (FREITAS, 2015).

Figura 12. Açúcares componentes das hemiceluloses

Fonte: FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.

Berlin: W. de Gruyter, 1984. (Adaptado)

FENGEL e WEGENER (1984) destacam que as hemiceluloses contribuem para a rigidez da parede celular em tecidos lignificados, ao apresentarem relação direta com a celulose e a lignina e constituírem cerca de 20% a 30% da massa seca do xilema.

2.2.3. Lignina

De acordo com MARABEZI (2009), a lignina apresenta estrutura aromática complexa e representa de 10 a 36% da massa seca de diversas espécies vegetais. A lignina é uma macromolécula amorfa formada pela polimerização desidrogenativa

dos álcoois p-cumarílico (unidade p-hidroxifenila), coniferílico (unidade guaiacila) e sinapílico (unidade siringila). A participação de diferentes unidades precursoras e o elevado número de combinações possíveis entre estes precursores leva a estrutura à complexidade observada.

Durante o crescimento celular, a lignina é o último componente incorporado à parede celular, a fim de promover rigidez, proteção dos ataques por microrganismos e sustentabilidade para as fibras e para os vasos (ou tecidos vegetais) que transportam água, nutrientes e metabólitos (FENGEL e WEGENER, 1984).

A Figura 13 ilustra o modelo estrutural da lignina proposto por Nimz para as (Angiospermas).

Figura 13. Modelo estrutural de lignina de folhosa (*Fagus sylvatica*) proposto por Nimz.

Fonte: Adaptado de Fengel e Wegener (1984). Presente em Freitas (2015)

A maioria das plantas tem lignina em sua composição, entretanto as estruturas básicas da lignina nas madeiras de fibras longas (coníferas), fibras curtas (folhosas) e gramíneas apresentam significativas diferenças (SILVA, 2012).

Além disso, o componente mais hidrofóbico da madeira é a lignina, que tem ação de material cimentante ou adesivo entre as fibras, conferindo dureza e rigidez à parede celular, e juntamente com os extrativos, previne a degradação, atuando como meio de defesa contra patógenos, insetos e herbívoros (MARCELO, 2007).

Kolin e Janezic (1996) observaram o efeito da temperatura, densidade e composição química no limite de higroscopicidade da madeira, para tanto utilizaram cinco espécies de madeira domésticas europeias. Sendo assim, observaram, na literatura, a composição química destas madeiras que estão expressas na Tabela 10.

Tabela 10. Composição química de espécies domésticas europeias

Nome Científico	Nome Comum	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	
				Insolúvel	Solúvel
<i>Quercus robur</i>	Carvalho-alvarinho, Carvalho-roble ou Carvalho-vermelho.	38,06	26,59	26,59	-
<i>Fagus sylvatica</i>	Faia-europeia ou Faia	45,35	24,76	20,49	4,09
<i>Populus euramericana</i>	Álamo	50,00	29,37	23,16	2,91
<i>Abies alba</i>	Abeto-prateado ou Abeto-branco	49,25	-	29,4	-
<i>Picea abies</i>	Abeto	52,87	-	28,31	-

Fonte: Adaptado de Kolin e Janezic (1996)

O Cedro-australiano (*Toona ciliata*) foi objeto de estudo de Gao et. al. (2011) e constatou-se que esta espécie tem 48,35% de celulose, 24,92% de lignina insolúvel e 28,1% de hemicelulose.

2.2.4. Extrativos

O metabolismo das plantas produzem substâncias orgânicas de baixa massa molar de diferentes classes de compostos tais como compostos aromáticos

(fenólicos), terpenos, ácidos graxos saturados e insaturados, proteínas e flavonoides, constituindo os chamados extrativos (BALOGH, 1989).

Silva (2012) destacou que os extrativos têm influência em diversas propriedades da madeira, sendo elas cor, odor, sabor, densidade e resistência à demanda biológica, sendo que a qualidade da madeira pode ser afetada pela quantidade e tipo de extrativos, mesmo que contribuam com uma pequena porcentagem na composição total da madeira, entre 2 e 5 %, mas pode chegar a 15 %.

Abies alba também foi estudada por Kacík et. al. (2013), cujos valores encontrados para, extrativos, celulose, hemicelulose e lignina foram 0,88%, 40,69%, 35,19% e 29,51%, respectivamente. Foi verificado também que a ação do tempo tem influência maior na hemicelulose e celulose, sendo a primeira diminui sua parcela e a segunda aumenta, mas a lignina não tem grandes alterações com o tempo. Portanto, o valor de lignina está coerente com o apresentado na tabela anterior, e que a diferença de aproximadamente 9% em relação à celulose pode ser justificada pela diferença da exposição ao tempo.

2.2.5. Cinzas

Conforme Marabezi (2009), além dos extrativos existem outros componentes da parede celular de baixo peso molecular, de origem inorgânica, comumente denominados “cinzas”, em sua maioria sais e óxidos de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K).

Nisgoski et. al. (2014), estudaram carvão vegetal de 5 espécies de madeiras tropicais. A Tabela 11, apresenta os teores de cinzas obtidos para cada uma destas espécies.

Tabela 11. Teor de cinzas de cinco espécies tropicais

Nome Científico	Nome Comum	Cinzas (%)
<i>Byrsonima spicata</i>	Murici	1,3
<i>Calophyllum brasiliense</i>	Guanandi ou Jacareúba	0,1
<i>Cecropia sciadophylla</i>	Imbaubão	3,8
<i>Cochlospermum orinocense</i>	Paineira barriguda amarela, Algodãozinho-amarelo, Barriguda-amarela.	3,4
<i>Schefflera morototoni</i>	Mandioqueira, Morototó, Mucututu, Matataúba, Para-pará, Marupá-uba-falso ou Sambacuim.	2,0

Fonte: Adaptado de Nisgoski et. al. (2014)

Já Mitchual et. al. (2014), estudaram carvão vegetal de outras 6 espécies de madeiras tropicais com ocorrências em outros países. A Tabela 12, apresenta os teores de cinzas obtidos para cada uma destas espécies.

Tabela 12. Teor de cinzas de seis espécies tropicais

Nome Científico	Nome Comum	Cinzas (%)
<i>C. pentandra</i>	Mafumeira ou samaúma	4,72
<i>T. scleroxylon</i>	Obeche	2,01
<i>A. robusta</i>	Pinheiro da Nova Zelândia	5,04
<i>T. superba</i>	Limba	2,96
<i>P. africana</i>	Prunus africana	0,61
<i>C. mildbreadii</i>	-	3,71

Fonte: Adaptado de Mitchual et. al. (2014)

2.3. Análise de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Conforme Mata (1998), após a primeira proposta de análise de porosidade por intrusão de mercúrio em 1921, por Washburn, e os trabalhos conseguintes de Drake e Ritter em descrever a construção e operação do equipamento e apresentar grande quantidade de dados experimentais, esta técnica tem sido essencial na caracterização vários aspectos dos materiais porosos.

Ainda de acordo com Mata (1998), pode-se sintetizar esta análise pelo fechamento de uma amostra porosa num recipiente, remoção dos gases da amostra e imersão em mercúrio líquido. Por conseguinte, a pressão é elevada gradativamente e o volume de mercúrio forçado a penetrar os poros da amostra é mensurado para cada valor de pressão. As variações de volume são detectadas sob a forma de variações de condutância, feita uma calibração adequada do contentor de amostras, denominado penetrômetro. Como o mercúrio é líquido não molhante, não penetra naturalmente em pequenas aberturas ou fendas dos sólidos porosos, sendo necessário aplicar uma dada pressão para forçar sua penetração, determinada a partir dos diâmetros dos poros.

Entre os poucos resultados disponíveis na literatura a respeito deste tema, cita-se Varanda (2016) que estudou propriedades porosimétricas das madeiras de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Cumaru (*Dipterix odorata*) e Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), sendo que apresentaram os valores 22,60%, 32,40% e 34,50% respectivamente.

2.4. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

Dentre as espécies estudadas, cinco (Cedro Doce, Cumaru, Cupiúba, Sucupira e Tatajuba) têm seis propriedades divulgadas no Anexo E da NBR 7190/97 (Tabela 13):

- Densidade aparente ($\rho_{ap}(12\%)$);
- Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0});
- Resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0});
- Resistência à tração na direção normal às fibras (f_{t90});
- Resistência ao cisalhamento (f_v); e
- Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}).

Tabela 13. Resultados de algumas propriedades da madeira adaptados da norma Brasileira ABNT NBR 7190/97

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
Cedro Doce	<i>Cedrella</i> spp	500	31,5	71,4	3,0	5,6	8058
Cumarú	<i>Dipterys odorata</i>	1090	93,2	133,5	2,9	10,7	23002
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	838	54,4	62,1	3,3	10,4	13627
Sucupira	<i>Diplotropis</i> spp	1106	95,2	123,4	3,4	11,8	21724
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	940	79,5	78,8	3,9	12,2	19583

Outra literatura brasileira importante para a divulgação de propriedades da madeira, o Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil, elaborado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) em 2013, apresenta informações sobre 5 das 10 espécies estudadas (Tabela 2). As propriedades apresentadas foram determinadas de acordo com os antigos Métodos Brasileiros MB26/1940).

Tabela 14. Resultados de algumas propriedades da madeira adaptados do Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil

Nome comum	Nome científico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cedroarana	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	0,52	4,8	7,9	46,6	4,5	7,2	77,8	12847	3962	3785	3,6
Cumarú*	<i>Dipterys odorata</i>	1,09	5,3	8,2	94,2	-	-	178,3	18547	-	-	-
Cupiúba *	<i>Goupia glabra</i>	0,87	4,8	9,1	67,2	-	-	122,1	13690	-	-	-
Roxinho (Pau-Roxo)	<i>Peltogyne</i> spp	0,89	3,5	6,5	84,1	-	-	184,5	17721	-	-	-
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	0,82	5,5	7,1	79,7	0,8	-	138,2	15875	-	-	-

* amostras a 15% de umidade

- 1 – Densidade aparente (g/cm³)
- 2 – Retração radial total (%)
- 3 – Retração tangencial total (%)
- 4 – Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)
- 5 – Resistência à tração normal às fibras (MPa)
- 6 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
- 7 – Resistência convencional no ensaio de flexão estática (MPa)
- 8 – Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática (MPa)
- 9 – Dureza paralela às fibras (MPa)
- 10 – Dureza normal às fibras (MPa)
- 11 – Resistência à compressão normal às fibras (MPa)

2.5. Estimativa de Propriedades da Madeira

Fujimoto et. al. (2008) verificaram também a necessidade de estimar propriedades mecânicas sem necessidade de ensaios destrutivos. Assim estudaram a possibilidade de utilizar espectroscopia NIR para estimar propriedades mecânicas. A partir de amostras de madeira de nativas do norte do Japão (*Larix gmelinii* var. *Japonica* e *Larix kaempferi*), realizaram, seguindo a norma japonesa JIS Z 2101, ensaios mecânicos e físicos para determinar:

- Módulo de elasticidade (MOE).
- Módulo de ruptura (MOR).
- Resistência à compressão paralela ao grão (CS) em pequenos espécimes claros.
- Módulo dinâmico de elasticidade de madeira seca ao ar (Efr).
- Densidade (DEN).

O modelo estatístico utilizado foi regressão de mínimos quadrados parciais (PLS), no qual se verificaram fortes relações entre os valores obtidos em laboratório e os previstos em NIR, com coeficientes de determinação variando de 0,61 a 0,89. O estudo indicou também que existe influência da variação em componentes de madeira, tais como celulose, hemicelulose e lignina, nas propriedades mecânicas da madeira.

A densidade aparente é uma das propriedades mais simples de se conseguir de um material, não sendo diferente para a madeira. Nesse sentido, diversos autores tentam utilizá-la para estimar outras propriedades da madeira a fim de facilitar os processos de obtenção destas.

Cavalheiro et al. (2016) tentaram encontrar uma relação entre a densidade aparente e densidade básica, como estimadores de outras propriedades físicas da madeira (retração longitudinal, RL, radial, RR, tangencial, RT, volumétrico, RV e coeficiente de anisotropia). Para tanto utilizaram espécies de coníferas (*Pinus* sp. e *Pinus oocarpa*) e dicotiledôneas (Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Jatobá (*Hymenaea* sp.) e *Lyptus*®) e os modelos de regressão linear, exponencial, logarítmica e geométrica. A madeira *Lyptus*® é uma madeira totalmente extraída de florestas renováveis a partir de árvores plantadas desenvolvida com o cruzamento de espécies.

Após testes por análise de variância (ANOVA) dos modelos de regressão, considerados ao nível de confiança (α) 5%, concluiu-se que foi impossível estabelecer relações significativas para permitir a adoção da densidade como estimador de outras propriedades físicas da madeira, devido ao fato de não terem encontrado um padrão de comportamento tanto entre a densidade e as retrações, quanto à densidade e o coeficiente de anisotropia.

Por outro lado, Almeida et. al. (2016) buscaram relações entre a densidade aparente e resistência à compressão paralela ao grão (f_{c0}), visto que esta é importante base para a classificação de resistência. Utilizaram-se as espécies Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.) e também os modelos de regressão linear, exponencial, logarítmica e geométrica.

Os resultados demonstraram que também não foi possível conseguir uma relação confiável, pois os melhores R^2 para Canafístula, Angelim araroba e Castelo, foram respectivamente, 48,57%, 14,89% e 52,84%, além de juntas resultarem em 17,88%. Sendo assim, valores muito abaixo do ideal (100%).

Na mesma linha de Cavalheiro et al. (2016), Christoforo et al. (2016), se propuseram a relacionar a densidade com as propriedades física da retração e coeficiente de retração (radial, longitudinal e volumétrica), e coeficiente de anisotropia. Todavia utilizaram-se os modelos linear, quadrático, cúbico e exponencial e uma espécie de cada classe de resistência:

- C20 - Cedro Doce - *Cedrela* sp.
- C30 - Canafístula - *Cassia ferruginea*.
- C40 - Angelim Araroba - *Vataireopsis araroba*.

- C50 - Mandioqueira - *Qualea sp.*
- C60 - Angelim Vermelho - *Dinizia excelsa*.

Mesmo que necessite de mais pesquisas com mais espécies porque os coeficientes R^2 ainda ficaram abaixo de 70%, os resultados indicaram a viabilidade de estimativa de retração tangencial e volumétrica por densidade.

Enfim, todos estes estudos demonstram a provável necessidade de inserir mais variantes independentes nos modelos, para obter melhores ajustes, como a inserção dos componentes químicos da madeira e da porosidade.

2.6. Considerações finais a respeito da revisão bibliográfica

Diante dos tópicos abordados na revisão da literatura, ficam evidenciados, mais uma vez, os aspectos de originalidade do trabalho aqui desenvolvido.

Espera-se que o conhecimento gerado a partir da abordagem adotada possa contribuir para tornar mais ágeis os procedimentos de estimativa das propriedades mecânicas da madeira (necessárias para o desenvolvimento de projetos estruturais) sem qualquer redução do nível de confiabilidade de tais procedimentos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas na determinação das propriedades físicas e mecânicas e das composições químicas referentes às 10 espécies de madeiras. Assim como, a metodologia estatística utilizada para avaliar a possível estimativa de propriedades mecânicas a partir da relação da composição química da madeira, densidade aparente e porosidade.

As madeiras foram estocadas no pátio do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), localizado no Campus 1 da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, apresentando teor de umidade próximo de 12% (umidade de equilíbrio para madeiras, na região de São Carlos).

3.1. Caracterização físico-mecânica da madeira

As propriedades físicas e mecânicas foram obtidas de acordo com as premissas e métodos de cálculo presentes no anexo B da norma Brasileira ABNT NBR 7190/1997, assim como a descrição dos métodos. Ressalta-se que as medidas e os ensaios necessários foram realizados no LaMEM, cada ensaio foi realizado com 12 amostras de cada espécie e foram calculadas médias das seis primeiras amostras, das seis últimas amostras e das 12 amostras.

3.1.1. Umidade

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, dado por:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em g;

m_s é a massa da madeira seca, em g.

Para isto preparou-se um corpo-de-prova prismático de base com dimensões nominais de 2cm x 3cm e altura, ao longo das fibras, de 5cm. Cada corpo-de-prova foi pesado em balança analítica para se obter a massa inicial e logo depois foram dispostos na estufa a 100°C.

De 6 em 6 horas, mediu-se novamente as massas de cada espécie até que a massa medida no instante de tempo fosse no máximo 0,5% diferente que a massa medida há 6 horas antes. Assim, obteve-se a massa seca.

3.1.2. Densidade aparente

A densidade aparente, ρ_{ap} , é uma massa específica convencional, cujo valor é definido pela razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova, ambos na umidade de equilíbrio para madeiras (12%), conforme equação a seguir:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}}$$

Onde:

m_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, em kg;

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, em metro cúbico (m^3).

A fim de determinar a densidade aparente das 10 espécies foram preparados corpos-de-prova iguais aos descritos no item 3.1.1. Depois da confecção, as arestas foram medidas com um paquímetro para cálculo do volume (largura x comprimento x altura) e por fim a massa de cada espécie.

3.1.3. Estabilidade dimensional da madeira

A estabilidade dimensional da madeira é consiste nas propriedades de retração e de inchamento nas direções preferenciais axial, radial e tangencial, respectivamente.

As deformações específicas de retração, ϵ_r , e de inchamento, ϵ_i , são consideradas como índices de estabilidade dimensional e são determinadas, para cada uma das direções preferenciais, em função das respectivas dimensões da madeira saturada (verde) e seca, sendo dadas por:

$$\epsilon_{r,1} = \left(\frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,sat}} \right) \times 100$$

$$\epsilon_{r,2} = \left(\frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,sat}} \right) \times 100$$

$$\epsilon_{r,3} = \left(\frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,sat}} \right) \times 100$$

$$\epsilon_{i,1} = \left(\frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,seca}} \right) \times 100$$

$$\epsilon_{i,2} = \left(\frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,seca}} \right) \times 100$$

$$\epsilon_{i,3} = \left(\frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,seca}} \right) \times 100$$

A variação volumétrica é determinada em função das dimensões do corpo-de-prova nos estados saturado e seco, sendo dada por:

$$\Delta V = \frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \times 100$$

Onde:

$$V_{sat} = L_{1,sat} \times L_{2,sat} \times L_{3,sat};$$

$$V_{seca} = L_{1,seca} \times L_{2,seca} \times L_{3,seca}.$$

Nesse sentido, preparou-se os corpos-de-prova com as mesmas características para determinação da umidade e densidade aparente (Figura 14).

Figura 14. Corpos-de-prova para ensaio de estabilidade dimensional da madeira

Primeiramente foi estudado o inchamento, sendo assim, os corpos de prova foram secados com o mesmo método do item 3.1.1 e assim, obteve-se as dimensões secas. Em seguida, estes foram imersos em água para representar um meio mais saturado. Em tempos eles foram retirados para nova medição, até que a diferença entre as dimensões fossem menores ou iguais a 0,02mm. Obteve-se assim, as dimensões saturadas. Para a retratibilidade, após a estabilização em meio saturado, eles foram secados novamente e assim, obteve-se as dimensões secas.

3.1.4. Compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela relação entre a máxima tensão de compressão e a área da seção transversal, ou seja:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A}$$

Onde:

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em Newton (N);

A é a área inicial da seção transversal comprimida, em metro quadrado (m²);

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras, em MPa.

Já a rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão

deformação específica. Para isto, este módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação correspondente respectivamente a 10% e 50% da resistência a compressão paralela às fibras medida no ensaio, sendo dado por:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} , representadas pelos pontos 71 e 85 diagrama de carregamento;

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo-de-prova, correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Para cálculo destas propriedades, foram preparados corpos-de-prova prismáticos de base quadrada de 25cm² e altura, ao longo das fibras, de 15cm (Figura 15). Após eles foram devidamente posicionados em cantoneiras metálicas fixadas em faces opostas do corpo-de-prova afastadas em 2,5cm das extremidades, para que o esmagamento da madeira junto ao suporte da máquina não interfira na medição das deformações, e 10cm distantes entre as linhas alicerces ou de pregação.

Figura 15. Corpo de prova para ensaio de compressão paralela

Iniciou-se a aplicação do carregamento pela máquina de ensaio (Figura 16) a uma taxa de 10MPa/min de modo monotônico, sendo que a precisão mínima de medição necessária é de 50 µm/m.

Figura 16. Máquina de ensaio de compressão paralela com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.

3.1.5. Tração paralela às fibras

A resistência à tração paralela às fibras ($f_{wt,0}$ ou f_{t0}) é dada pela relação entre a máxima tensão de tração e a área da seção transversal, ou seja:

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A}$$

Onde:

$F_{t0,max}$ é a máxima força de tração aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em Newton (N);

A é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central do corpo-de-prova, em metro quadrado (m^2);

f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras, MPa. O valor característico da resistência à tração paralela às fibras $f_{t0,k}$ deve ser determinado pelo estimador dado na seção 3.

Por outro lado, a rigidez da madeira, na direção paralela às fibras, é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado pelo trecho linear do diagrama tensão deformação específica.

Assim como para compressão paralela, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\epsilon_{50\%}$) correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência a tração paralela às fibras medida no ensaio, sendo dado por:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{t0} , representadas pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ são as deformações específicas de tração medidas no trecho central do corpo-de-prova alongado, correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$, respectivamente.

Das duas possibilidades de confecção de corpos-de-prova propostos pelo anexo B, elaborou-se do tipo com seção transversal retangular, cuja base é 5,0cm x 2cm e altura de 15cm na direção paralela às fibras (Figura 17). Estes foram submetidos à tração paralela utilizando a máquina de ensaio universal (Figura 18) utilizada para o ensaio de tração na direção paralela às fibras, no qual aplicou-se carregamento a uma taxa de 10MPa/min. Para realizar a medição das deformações, utilizou-se relógios comparadores com exatidão de 50 μ m/m nas faces opostas do lado medindo 5cm.

Antes do
ensaio

Depois do
ensaio

Figura 17. Corpo de prova para ensaio para tração paralela

Figura 18. Máquina de ensaio universal utilizado para tração paralela com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.

3.1.6. Compressão normal às fibras

A resistência à compressão normal às fibras ($f_{wc,90}$ ou f_{c90}), consiste no valor obtido em um ensaio de compressão uniforme, no instante da deformação específica residual de 2‰, conforme convencionado.

Do outro lado, a rigidez da madeira na direção normal às fibras é obtida pelo seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica e determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\epsilon_{50\%}$) correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência convencional à compressão normal às fibras f_{c90} , sendo dado por:

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão normal correspondentes a 10% e 50% da resistência convencional f_{c90} , representadas pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medida na direção normal às fibras correspondentes a tensão $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Para os ensaios, foram produzidos corpos-de-prova iguais aos descritos no item 3.1.4 (Figura 19). Estes foram colocados na máquina de ensaio (Figura 20) e aplicou-se uma taxa de 10MPa/min de modo monotônico. A medida das deformações no corpo de prova deve ser feita em pelo menos duas de suas faces com precisão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e os registros das cargas e das deformações devem ser tomados a cada ponto do diagrama de carregamento.

Figura 19. Corpo de prova antes do ensaio de compressão normal

Figura 20. Máquina de ensaio de compressão normal com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.

Ressalta-se que a resistência a ser utilizada na determinação do módulo de elasticidade normal às fibras deve ser estimada ($f_{c90,est}$) por ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo. Sendo assim, foram aplicados dois ciclos de carga e descarga.

3.1.7. Tração normal às fibras

A resistência à tração normal às fibras da madeira ($f_{wt,90}$ ou f_{t90}) é utilizada apenas para estudos comparativos entre diferentes espécies de madeira, não sendo aplicada na avaliação da segurança das estruturas de madeira. Ela consiste na relação da máxima tensão de tração e área inicial da seção transversal tracionada do trecho alongado do corpo-de-prova:

$$f_{wt,90} = \frac{F_{t90,max}}{A_{t90}}$$

Onde:

$f_{t90,max}$ é a máxima força de tração normal aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N);

A_{t90} é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho alongado do corpo-de-prova, em metro quadrado (m²).

O corpo-de-prova é confeccionado com geometria específica e detalhada pela Figura 21.

Figura 21. Detalhe esquemático da geometria do corpo-de-prova para o ensaio de tração normal às fibras

Fonte: NBR 7190/1997.

Estes corpos-de-prova (Figura 22) foram submetidos a um carregamento aplicado na direção tangencial e a uma taxa de 2,5 MPa/min (Figura 23).

Figura 22. Corpo de prova para ensaio para tração normal

Figura 23. Máquina de ensaio universal utilizado para tração normal com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.

3.1.8. Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira ($f_{wv,0}$ ou f_{v0}) é dada pela relação da máxima tensão de cisalhamento com a área inicial da seção crítica do corpo-de-prova:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}}$$

Onde:

$F_{v0,max}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N);

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo-de-prova, num plano paralelo às fibras, em metro quadrado (m^2).

O ensaio consiste em aplicar um carregamento de taxa de 2,5 MPa/min em corpo-de-prova com dimensões, conforme Figura 24.

Figura 24. Detalhe esquemático da geometria do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.

Fonte: NBR 7190/1997.

Assim sendo preparou-se os corpos-de-prova ilustrados pela Figura 25 e ensaiados na máquina da Figura 26.

Antes do ensaio

Depois do ensaio

Figura 25. Corpo de prova para ensaio de cisalhamento

Figura 26. Máquina de ensaio universal utilizado para cisalhamento com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.

3.1.9. Fendilhamento

A resistência ao fendilhamento paralelo às fibras da madeira ($f_{ws,0}$ ou f_{s0}), assim como a tração normal às fibras, é um valor convencional e, por depender da forma e das distâncias entre os lados do corpo-de-prova, é utilizada apenas para estudo comparativo entre espécies de madeira. Esta propriedade dada pela relação da máxima tensão com a área crítica da seção transversal:

$$f_{s0} = \frac{F_{s0,max}}{A_{s0}}$$

Onde:

$F_{s0,max}$ é a máxima força aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N);

A_{s0} é a área crítica da seção transversal do corpo-de-prova, resistente ao fendilhamento, em metro quadrado (m²).

Na máquina de ensaio é aplicado um carregamento a uma taxa de 2,5 MPa/min em corpos-de-prova elaborados conforme a Figura 27.

Figura 27. Detalhe esquemático da geometria do corpo de prova para ensaio de fendilhamento.

Fonte: NBR 7190/1997.

Assim sendo preparou-se os corpos-de-prova ilustrados pela Figura 28 e ensaiados na máquina da Figura 29.

Antes do ensaio

Depois do ensaio

Figura 28. Corpo de prova para ensaio de fendilhamento

Figura 29. Máquina de ensaio universal utilizado para fendilhamento com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.

3.1.10. Flexão

A resistência da madeira à flexão (f_{WM} ou f_M) é um valor convencional, dado pela relação da máxima tensão com o módulo de resistência elástico da seção transversal, considerando a hipótese da madeira ser um material homogêneo:

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e}$$

Onde:

$M_{\max}$ é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em Nm;

W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por $bh^2/6$, em metro cúbico (m^3).

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado pela inclinação da reta secante à curva carga deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos ($F_{10\%}$; $v_{10\%}$) e ($F_{50\%}$; $v_{50\%}$) correspondentes respectivamente a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo-de-prova gêmeo, sendo dado por:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3}$$

Onde:

$F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N), representadas pelos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na figura B.21;

$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada $F_{M,est}$, em metro (m);

b e h correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em metro (m);

Para este ensaio, foram preparados corpos-de-prova prismáticos de base quadrada de 25 cm² de área e 115 cm de altura (Figura 30). O carregamento foi aplicado ao corpo de prova em dois ciclos de carga e descarga a uma taxa de 10 MPa/min no ponto médio de um corpo de prova suportado por apoios nas suas extremidades (Figura 31). O registro dos deslocamentos é efetuado até o valor de 70% da carga estimada, em seguida retirado o instrumento de medição e o carregamento aumentado até a ruptura do corpo de prova.

Figura 30. Corpo de prova para ensaio de flexão

Figura 31. Máquina de ensaio utilizada para flexão com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.

3.1.11. Resistência ao impacto na flexão e Tenacidade

A resistência ao impacto à flexão (f_{bw}) é definida pela razão entre a energia necessária à fratura do corpo-de-prova (W) e a área da seção transversal do mesmo:

$$f_{bw} = \frac{1000W}{bh}$$

Onde:

W é a energia necessária para fratura do corpo-de-prova, em Joules (J);

b e h são as dimensões da seção transversal do corpo-de-prova, na direção radial e tangencial, em milímetro (mm).

Primeiramente, realiza-se o ensaio para determinar a tenacidade (T) da madeira, que consiste na energia necessária para a fratura do corpo de prova prismático de base quadrada de 4 cm² e altura de 30 cm (Figura 32) na máquina com pêndulo Charpy (Figura 33).

Antes do Ensaio

Depois do Ensaio

Figura 32. Corpo de prova para ensaio de tenacidade

Figura 33. Máquina de ensaio utilizada para tenacidade com corpo de ensaio momento antes do início do ensaio.

Dos dados de ensaio, calcula-se a partir da equação a seguir:

$$T = m \cdot g \cdot (L - L')$$

Onde:

m é a massa do pêndulo

g é a aceleração da gravidade (9,81m/s²)

L é o comprimento do braço do pêndulo Charpy, que consiste na elevação máxima para o cálculo da energia potencial gravitacional.

L' é a altura final que o pêndulo atinge posteriormente ao impacto com o corpo de prova de madeira

A partir dos valores de tenacidade, é possível calcular f_{bw} substituindo o “W” pelos valores de tenacidade.

3.1.12. Dureza

De acordo com a Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas - COPANT 30:1-009 é recomendado o teste de dureza proposto por Janka. Este teste consiste em penetrar uma semiesfera de aço com área diametral de um centímetro quadrado (1 cm²) em uma das faces de um corpo-de-prova prismático tem-se uma tensão que determinaria a dureza da madeira (f_{wH} ou f_H) de maneira convencional, cujos valores são resultados da seguinte equação:

$$f_H = \frac{F_{\max}}{A_{\text{seção diametral}}}$$

Onde:

$F_{\max}$ é a máxima força aplicada ao corpo-de-prova necessária à penetração de uma semiesfera de seção diametral com 1 cm² de área na profundidade igual ao seu raio, em Newton (N);

A seção diametral é a área da seção diametral da esfera, igual a 1 cm², em centímetros quadrados (cm²).

Dependendo das faces ensaiadas tem-se a dureza da madeira na direção paralela às fibras (f_{H0}) ou na direção normal às fibras (f_{H90}).

Para os ensaios com o dispositivo especial para o ensaio de dureza Janka, foram preparados corpos-de-prova conforme item 3.1.4. Em cada face a ser ensaiada (Figura 34) é aplicado o carregamento monotônico crescente na máquina

(Figura 35) até que a esfera penetre a uma profundidade igual ao seu raio, num período de pelo menos 1 minuto.

Normal as fibras

Paralela as fibras

Figura 34. Corpo de prova para ensaio de dureza

Figura 35. Máquina de ensaio utilizada para dureza com corpo de ensaio momento depois do início do ensaio.

3.2. Análise química da madeira

A fim de conhecer as composições químicas de cada espécie foi realizada a análise química das madeiras de cada espécie para, assim, ter as porcentagens de celulose, poliose, lignina, extrativos e cinzas. As análises químicas foram realizadas no Laboratório do Grupo de Físico-Química Orgânica do Instituto de Química de São Carlos – IQSC/USP Campus 1.

3.2.1. Teor de extrativos

O processo de preparação das amostras seguiu os preceitos da norma TAPPI 264 CM-97 e toda a análise química foi realizada em duplicata.

Primeiramente utilizou-se um Moinho de facas tipo Willey SL-31 (Figura 36) para a moagem do material que foi peneirado em granulometria 30 mesh, obtendo-se assim 15 gramas de amostra. Após este processo foi mensurado o teor de umidade da madeira usando uma balança OHAUS modelo MB200.

Figura 36. Moinho de facas utilizado na moagem do material

Com as amostras em mãos, foram elaborados cartuchos com papel de filtro, contendo metade do material de cada amostra (7,5g) para realizar a duplicata, que foram submetidos ao processo de extração em solventes organo-solúveis em um extrator tipo Soxhlet (Figura 37). Houve duas etapas, sendo que a primeira consistiu em utilização de 1:1 (v/v) partes de ciclo-hexano/etanol, por 8 horas, com objetivo de

remover os extrativos organossolúveis e uma segunda utilizando água em ebulição pelo mesmo período.

Figura 37. Extrator tipo Soxhlet sendo utilizado para extração

Por fim, com auxílio de uma estufa de temperatura máxima de 100°C, a amostra foi seca até obter massa constante, e, por conseguinte, o teor de extrativos foi calculado segundo a expressão, em termos de massa seca:

$$\% \text{ Extrativos} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100$$

Onde:

m_i = massa inicial (g);

m_f = massa final (g).

3.2.2. Teor de lignina

Para determinar o teor de Lignina do material foi utilizado o método Klason modificado por NREL (2012). Este método é dividido em duas etapas:

- **Tratamento do material lignocelulósico com ácido sulfúrico 72% por um período de 2 horas sob agitação.** Utilizou-se uma massa seca inicial de 0,8g de material moído (Figura 38) a cerca de 42 mesh

e adicionou-se 12mL de ácido sulfúrico 72% em um tubo borossilicato autoclavável de 500mL, e deixou-se reagir sob agitação constante, por um período de 2 horas (Figura 39);

Figura 38. Balança analítica utilizada em todo processo de análise química com a massa de uma das amostras colocadas no tubo borossilicato autoclavável

Figura 39. Tubos borossilicados com material momento anterior à adição do ácido sulfúrico e à agitação

- **Hidrólise com ácido sulfúrico a 3%, em autoclave, durante 1 hora.**
Após a primeira etapa, adicionou-se 450mL de água destilada ao tubo (concentração de ácido sulfúrico 3%) e fecham-se os tubos, que são inseridos na autoclave sob temperatura de 120°C, a uma pressão de 2 bar, por um período de 1 hora. Após a despressurização da autoclave, os tubos foram resfriados utilizando-se gelo e água até temperatura ambiente (25°C) (Figura 40).

Figura 40. Tubo borossilicado com lignina após ser autoclavado e resfriado

Deste método obtém-se um sólido residual e uma solução que é posteriormente filtrada em um funil de vidro sinterizado de massa conhecida (Figura 41), sendo que se utiliza o material retido para calcular a Lignina Insolúvel e o líquido filtrado para Lignina Solúvel. A soma de ambas, Lignina Insolúvel e Lignina Solúvel é o valor total de lignina do material.

Figura 41. Processo de filtração

3.2.2.1. Lignina Insolúvel

O material retido é submetido à secagem em estufa por 24 horas e transferido para um dessecador, quando se pesa o material seco até obtenção de massa constante, sendo esta a massa de Lignina Insolúvel. Ressalta-se que é necessário considerar a presença das cinzas da lignina insolúvel, determinadas a partir da calcinação do resíduo obtido do método Klason. A calcinação consiste na exposição do material retido a 525 °C, por 4 horas, com rampa de aquecimento de 100 °C.h⁻¹.

Consequentemente a massa real de Lignina Insolúvel é dada pela subtração da massa de cinzas da massa inicial obtida da pesagem do material seco na estufa, conforme ilustra a equação a seguir:

$$\text{Lignina}_{\text{INSOLÚVEL}} = \frac{(m_L - m_C)}{m_S} \cdot 100$$

Onde:

Lignina_{INSOLÚVEL} = lignina Klason insolúvel da amostra (%);

m_L = massa lignina imiscível seca(g);

m_C = massa de cinzas (g);

m_S = massa da amostra seca (g).

3.2.2.2. Lignina Solúvel

O líquido filtrado é analisado no Espectrofotômetro de UV-Vis “Hach” DR-5000, com cela de quartzo de 10mm de caminho ótico, porque a lignina absorve fortemente a luz ultravioleta característica permitida pela sua natureza aromática. É observado na região dos comprimentos de onda de 280nm e 215nm, correspondente ao ultravioleta.

Antes de efetuar o cálculo das concentrações de lignina, é necessária a consideração à diluição da solução na qual foi registrado o espectro. Neste estudo foi utilizado fator de diluição 5, ou seja, 1 mL do filtrado foi diluído 4 vezes na solução de ácido sulfúrico nas mesmas proporções.

As concentrações de lignina são calculadas pela equação (GOLDSCHIMD, 1971; NOVO, 2012):

$$\text{Lignina solúvel (\%)} = \frac{[(4,53 \times A_{215}) - A_{280}] \times V_f \times \text{Fator Diluição}}{3 \times m \text{ biomassa}}$$

Onde:

A₂₁₅ = Absorbância em 215nm;

A₂₈₀ = Absorbância em 280nm;

V_f = Volume aferido da solução ácida da reação Klason em litros (L);

Fator Diluição = Diluição da solução no qual foi registrado o espectro;

m biomassa = massa seca da biomassa utilizada para reação Klason.

Por fim, o teor de lignina total (Lignina TOTAL) foi obtido a partir da soma da Lignina Klason insolúvel e da lignina Klason solúvel, de acordo com a equação:

$$\text{Lignina}_{\text{TOTAL}} = \text{Lignina}_{\text{INSOLÚVEL}} + \text{Lignina}_{\text{SOLÚVEL}}$$

3.2.3. Teor de celulose e poliose

Os teores de celulose e hemiceluloses foram obtidos por cromatografia líquida de alta eficiência a partir da quantificação dos açúcares (e derivados) contidos no hidrolisado resultado da determinação de Lignina Klason. Os açúcares e derivados quantificados foram: celobiose, glicose, xilose, arabinose, ácido acético, furfural e hidroximetilfurfural. A análise é realizada em duas etapas:

- I. Análise cromatográfica para determinação de Furfural e Hidroximetilfurfural

Filtra-se uma solução contendo o hidrolisado obtido no método Klason em membrana de $0,45\mu\text{m}$. A solução resultante é injetada em um cromatógrafo SHIMADZU (Figura 42), modelo CR 7A através de uma coluna RP 18 (C18) da HEWLETTPACKARD com um eluente de solução de acetonitrila/água 1:8 (v:v), contendo ácido acético 1% e um fluxo fixado em $0,8\text{ mL/min}$ à temperatura ambiente. O detector utilizado foi o UV (254nm) da SHIMADZU SPD-10A.

Figura 42. Cromatógrafo utilizado na análise química

II. Análise cromatográfica para determinação de Açúcares:

Filtra-se uma solução contendo o hidrolisado obtido no método Klason em membrana SEP PAK C18 (Waters) para a retenção da lignina solúvel e demais produtos de degradação, em seguida filtrada em membrana de $0,45\mu\text{m}$. A solução resultante é injetada em um cromatógrafo SHIMADZU, modelo CR 7A através de uma coluna Aminex HPX-87H (300 x 7,8mm BIO-RAD) com um eluente $0,005\text{ M H}_2\text{SO}_4$ e fluxo fixado em $0,6\text{ mL/min}$ e temperatura em 45°C . O detector utilizado foi o Índice de Refração SHIMADZU R10-6A.

Conforme Marabezi (2009), nessa metodologia converte-se:

- As massas de glicose, celobiose e hidroximetilfurfural (HMF) em celulose, através de retas de calibração correspondente e aplicando os respectivos fatores de conversão: 0,90, 0,95 e 1,37.

- As massas de xilose, arabinose e furfural e grupos acetila em hemiceluloses, através do mesmo procedimento, com o fator 0,88 para xilose e arabinose; 1,29 para furfural; 0,72 para conversão de ácido acético para acetila.

3.2.4. Teor de cinzas

Os teores de cinzas das espécies de madeira foram determinados pelo teor de resíduos resultantes da queima completa das amostras, ou seja, a porcentagem de material inorgânico da amostra. Conforme a norma T211 om-93 modificada, adiciona-se 1g da amostra triturada e seca em um cadinho de porcelana de massa conhecida. Depois o conjunto é submetido à temperatura de 525°C por 4h dentro de uma mufla. O teor de cinzas é determinado pelo quociente entre a massa do material residual e a massa inicial seca. Multiplica-se o resultado por 100 para obter a porcentagem, conforme a equação:

$$\%C_{\text{cinzas}} = \frac{m_r \cdot 100}{m}$$

Onde:

$\%C_{\text{cinzas}}$ = teor de cinzas (%);

m_r = massa de cinzas (g);

m = massa da amostra seca antes da queima (g).

3.3. Análise de porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram executados no Departamento de Física e Ciência dos Materiais (FCM) Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos Área 2 (CCMC), do Instituto de Física de São Carlos-IFSC, USP.

Foram analisadas as seguintes propriedades:

- ATP. área total de poros;
- DA. densidade aparente;
- DMP. diâmetro médio dos poros.

Primeiramente foram preparados os corpos-de-prova para possuírem dimensões nominais de um prisma de 2 cm de altura e base de 1 cm² de área e

depois foram dispostos em estufa com circulação de ar a 50°C por período de 24 horas para deixa-los secar.

Foi utilizado o equipamento Micromeritics Poresizer, modelo 9320, com capacidade de pressão de 200 MPa, sendo que foram adotados os seguintes parâmetros:

- Mercúrio com tensão superficial de 0,494 g/cm²;
- Densidade de 13,533 g/mL;
- Ângulo de contato do avanço e retrocesso de 130°; e
- Tempo de equilíbrio entre a baixa e alta pressão de 10 segundos.

3.4. Análise Estatística

A estimativa das propriedades físicas (RRT, RTT) e mecânicas (f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} , f_{v0} , f_{s0} , f_M , E_{c0} , E_{t0} , E_M , f_{H0} , f_{H90} , W , f_{c90} , E_{c90}) em função dos constituintes da madeira (He, Cel, LA, LB, Ci, Ext) e da porosidade (Por) e da densidade aparente (pap) para o conjunto das 10 espécies de madeira foram obtidas com o auxílio de modelos de regressão multivariadas (Equação 1), determinados por meio do software Mathcad versão 14.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot He + \alpha_2 \cdot Cel + \alpha_3 \cdot LA + \alpha_4 \cdot LB + \alpha_5 \cdot Ci + \alpha_6 \cdot Ext + \alpha_7 \cdot Por + \alpha_8 \cdot pap \quad (1)$$

Da Equação 1, Y denota as propriedades estimadas e α_i são os coeficientes ajustados pelo o método dos mínimos quadrados. A qualidade dos ajustes foi obtida em função do coeficiente de determinação R^2 .

Por espécie, cabe destacar que foi obtida uma amostra para a determinação da porosidade, duas amostras para a obtenção de cada constituinte da madeira e doze amostras para as demais propriedades avaliadas, totalizando 1930 determinações. Os modelos de regressão foram gerados considerando os valores médios de todas as propriedades juntamente com os valores amostrais da porosidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos dos ensaios físicos, mecânicos e de porosimetria por intrusão de mercúrio com corpos de prova das espécies de madeira; e da determinação da sua composição química são apresentados a seguir de forma gráfica para melhor visualização.

No Apêndice estão apresentadas as tabelas contendo todos os resultados absolutos de cada espécie.

4.1. Propriedades físicas e mecânicas

A Figura 43 ilustra as variações dos resultados da porosidade (Por), densidade aparente (pap), da retratibilidade radial total (RRT) e da retratibilidade tangencial total (RTT) para as espécies de madeira investigadas e os menores e os maiores valores do coeficiente de variação (CV) obtidos. Nas imagens as espécies de madeira estão abreviadas como:

Ara - Cedroarana

Cax - Caixeta

Caj - Cajueiro

Camb - Cambará

Ce - Cedro

Cum - Cumaru

Cup - Cupiúba

Rox - Roxinho

Suc - Sucupira

Tat - Tatajuba

Figura 43. Valores médios das propriedades Por, pap, RRT e RTT.

Verifica-se que as densidades obtidas estão em conformidade com a literatura, pois conforme esperado, Tatajuba e Roxinho apresentaram as densidade mais elevadas e, por conseguinte, são também aquelas com menor porosidade.

As espécies consideradas leves, na literatura, realmente demonstraram valores menores para densidade e maiores para porosidade, sendo elas o Cedro, a Cedroarana, a Caixeta e o Cajueiro.

Com relação à retratibilidade, tanto radial quanto tangencial, o Cedro e a Cedroarana exibiram menores valores (mais estáveis), enquanto que a madeira do Cambará, Sucupira e Caixeta se apresentaram com menor estabilidade dimensional.

A Figura 44 ilustra as variações dos resultados da resistência na compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistências à tração nas direções paralela (f_{t0}) e perpendicular (f_{t90}) e resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras (f_{v0}) para as espécies de madeira avaliadas juntamente com os menores e os maiores valores do coeficiente de variação (CV) obtidos, todos em harmonia com o comentado por Calil et al (2003); Arwade et al (2010); Ravenshorst et al (2010) e Edwin & Ozarska (2015), entre outros.

Figura 44. Valores médios da f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} e da f_{v0} para as espécies de madeira.

Primeiramente, pode-se verificar que os valores obtidos para f_{c0} , f_{t0} , f_{t90} e f_{v0} foram coerentes com os valores apresentados no Anexo E (Tabela 13) para Cedro, Cumaru, Cupiúba, Sucupira e Tatajuba. Por exemplo, o valor encontrado da compressão paralela (f_{c0}) para Tatajuba foi 85 MPa e no Anexo E da norma NBR 7190/97 consta 79,5 MPa. Pequenas variações, como as já mencionadas, são comuns quando se trata de diferentes lotes da espécie, conforme asseveraram Rocco Lahr et al (2016c) e Christoforo et al (2017a).

Ressalta-se também que a madeira de Roxinho se manteve entre as 3 espécies com maiores resistências nestas 4 propriedades. Além disso, as madeiras mais densas (Tatajuba e Cumaru), também mostraram maiores resistências, por isso considera-se a que a densidade tenha forte influência em propriedades mecânicas, conforme Burdzik et al (2002), Dias et al (2004); Logsdon et al (2007); e Icimoto et al (2016), entre outros.

A Figura 45 ilustra as variações dos resultados da resistência ao embutimento na direção paralela (f_{s0}), resistência na flexão estática (f_M), da resistência na compressão perpendicular às fibras (f_{c90}) e das durezas nas direções paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras para as espécies de madeira consideradas juntamente com os menores e os maiores valores do

coeficiente de variação (CV) obtidos, os quais se encontram na mesma ordem de grandeza dos obtidos por Almeida et al (2014) e por Christoforo et al (2017b).

Figura 45. Valores médios da f_{s0} , f_M , f_{c90} , f_{H0} e f_{H90} para as espécies de madeira.

Observa-se nos gráficos para f_{s0} , f_M , f_{c90} , f_{H0} e f_{H90} da Figura 45 que também há correlação da densidade nestas propriedades, visto que as espécies com maiores valores da resistência também foram as mais densas (LOGSDON & CALIL Jr, 2002; CAVALHEIRO et al, 2016; ROCCO LAHR et al, 2016a).

A Figura 46 ilustra as variações dos resultados dos módulos de elasticidade na compressão paralela (E_{c0}) e perpendicular (E_{c90}) às fibras, na tração paralela (E_{t0}) e na flexão estática (E_M) para as espécies de madeira

avaliadas juntamente com os menores e os maiores valores do coeficiente de variação (CV) obtidos.

Figura 46. Valores médios do E_{c0} , E_{c90} , E_{t0} e E_M para as espécies de madeira.

Analisando a Figura 46, atenta-se aos módulos de elasticidade que também se apresentaram influenciados pela densidade. Além disto, os valores para o módulo de elasticidade para a compressão paralela (E_{c0}) também se mostraram coerentes com os apresentados pelo anexo E, NBR 7190, visto que, por exemplo, no referido documento normativo consta que, para a Tatajuba, o valor é de 19583 MPa e o estudo encontrou o valor de 19761 MPa.

Tais variações também estão compatíveis com o que foi apresentado por Dias et al (2004); Amoha et al (2012) e Komariah et al (2015).

4.2. Composição Química

A Figura 47 apresenta as variações dos valores dos constituintes da madeira: Celulose (Cel); Hemicelulose (He); Lignina A (LA); Lignina B (LB); Cinzas (Ci); Extrativos (Ext); presentes nas 10 espécies e os menores e os maiores valores do coeficiente de variação (CV) obtidos.

Figura 47. Valores médios dos constituintes da madeira para todas as espécies.

Verifica-se que os valores médios encontrados estão dentro do esperado para cada componente químico conforme a literatura apresentada anteriormente. Visto que a composição é em média:

- 40% a 50% de Celulose;
- 10% a 20% de Hemicelulose;
- 30% a 40% de Lignina total;
- 5% a 15% de Extrativos;
- 0,1% a 5,0% de Cinzas.

As maiores concentrações de celulose e hemicelulose foram encontradas na madeira do cajueiro, que, conseqüentemente obteve menores

parcelas de lignina total. Este fato pode ser relacionado aos aspectos da madeira, porque a madeira do Cajueiro guarda alguma semelhança com os *Pinus* sp., no tocante à densidade, à trabalhabilidade e à susceptibilidade aos ataques de micro-organismos.

O oposto ocorre com a Sucupira, ou seja, encontram-se as maiores concentrações de lignina total e menores de celulose e hemicelulose. Como a lignina promove rigidez, proteção dos ataques por microrganismos e sustentabilidade para as fibras e para os vasos, verifica-se que a madeira tem durabilidade natural alta.

Embora alguns trabalhos apresentados na literatura da área abordem o tema dos extrativos de madeiras tropicais, como os de Lhate et al (2010), Kilic & Niemz (2012), apenas o texto de Santana & Okino (2007), permite algumas comparações com os resultados aqui obtidos.

Ressalta-se que as madeiras que apresentaram maiores porcentagens de extrativos foram Cumaru (aproximadamente 13%) e Cupiúba (aproximadamente 12%), possivelmente relacionado com o fato de serem as espécies de madeira que apresentam odores mais marcantes dentre as estudadas. Logo abaixo ficou a Sucupira, com cerca de 10%, que mesmo não tendo gosto ou odor perceptíveis ou coloração mais intensa, apresenta boa durabilidade e resistência a fungos e cupins, provavelmente pela ação das substâncias contidas nos extrativos em conjunto da maior concentração de lignina.

Zau et al. (2014) estudaram propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de Cumaru, sendo que obtiveram $18,32\% \pm 1,24$ de teor de extrativos orgânicos. Já Santana e Okino (2007) encontraram 9,7%. Ambos os teores são diferentes do encontrado neste estudo, o que evidencia a necessidade de ser considerada, nas pesquisas, a extração de todo conjunto de amostras a partir do mesmo lote de madeira, como o que foi aqui efetuado.

Com relação às cinzas, a madeira que conteve maior concentração destes componentes da parede celular de baixo peso molecular foi a madeira de Cambará. Isto demonstra a sua qualidade de produzir lenha e carvão de boa qualidade, já mencionadas anteriormente.

Utilizando a mesma norma TAPPI T211 om-02, Zau et al. (2014) encontraram teor de cinzas maior para Cumaru, $1,72\% \pm 0,15$, por outro lado

Silva et al. (2009) utilizaram da norma ASTM 1102-56 e o valor para as cinzas foi de 0,3%.

Ressalta-se que os teores de extrativos e de cinzas podem variar, em decorrência de alguns fatores, como as características do solo (ZAU et al., 2014).

Santana e Okino (2007) estudaram a composição química de 36 espécies de madeira, dentre estas estão Tatajuba, Sucupira e Cumaru. A Tabela 15 compara os valores obtidos pelo presente estudo (1) e os valores obtidos por estes dois autores (2).

Tabela 15. Comparativo dos teores de componentes químicos Tatajuba Cumaru e Sucupira, obtidos pelo estudo e por Santana e Okino (2007).

Espécies		Tatajuba	Cumaru	Sucupira
Celulose (%)	1	42,93	43,69	38,85
	2	43,4	47,4	48,4
Hemicelulose (%)	1	15,19	14,88	16,98
	2	21,5	20,9	17,8
Lignina A (%)	1	35,16	37,11	43,63
	2	34,2	30,2	32,7
Lignina B (%)	1	0,63	1,03	1,06
	2	0,9	1,4	1,1
Cinzas (%)	1	0,4	0,5	0,24
	2	0,3	0,2	0,6
Extrativos (%)	1	4,78	12,72	10,61
	2	8,4	6,9	9,7

4.3. Análise estatística

De início, deve ser registrado que várias tentativas de modelos de regressão foram efetuadas até que se chegasse aos resultados apresentados na Tabela 3, a seguir.

Foi feita a opção por registrar no texto apenas os modelos, para cada propriedade da madeira, que apresentaram os melhores resultados,

possibilitando a correlação entre os parâmetros estudados e as propriedades físicas e mecânicas das dez espécies consideradas.

Na Tabela 16 constam os modelos de regressão e os respectivos coeficientes de determinação na estimativa de propriedades da madeira, e na Tabela 17 são apresentados os intervalos numéricos das variáveis independentes dos ajustes obtidos.

Tabela 16. Resultados dos modelos de regressão multivariadas considerando as 10 espécies de madeira.

$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot He + \alpha_2 \cdot Hel + \alpha_3 \cdot LA + \alpha_4 \cdot LB + \alpha_5 \cdot Ci + \alpha_6 \cdot Ext + \alpha_7 \cdot Por + \alpha_8 \cdot \rho_{ap}$	R^2 (%)
$RRT = 1,00423 - 0,0598497 \cdot He + 0,161199 \cdot Cel + 0,211325 \cdot LA + 0,219873 \cdot LB + 0,54172 \cdot Ci + 0,0585386 \cdot Ext - 10,3552 \cdot Por - 7,89255 \cdot \rho_{ap}$	55,70
$RTT = -13,8972 - 0,17602 \cdot He + 0,573686 \cdot Hel + 0,489992 \cdot LA + 1,0962 \cdot LB + 0,434925 \cdot Ci + 0,178019 \cdot Ext - 19,693 \cdot Por - 16,0401 \cdot \rho_{ap}$	86,64
$f_{c0} = -151,933 + 1,24366 \cdot He + 1,66847 \cdot Cel + 1,42686 \cdot LA - 4,5862 \cdot LB - 3,30513 \cdot Ci - 2,15895 \cdot Ext + 25,1747 \cdot Por + 106,525 \cdot \rho_{ap}$	99,69
$f_{t0} = -120,557 + 7,80428 \cdot He + 0,653391 \cdot Cel - 3,2484 \cdot LA - 25,9725 \cdot LB + 4,64536 \cdot Ci + 2,29757 \cdot Ext + 103,628 \cdot Por + 155,129 \cdot \rho_{ap}$	91,94
$f_{t90} = 14,3938 + 0,0987351 \cdot He - 0,200044 \cdot Hel - 0,14628 \cdot LA - 0,61742 \cdot LB - 2,80478 \cdot Ci - 0,154106 \cdot Ext + 3,02166 \cdot Por + 3,68862 \cdot \rho_{ap}$	70,31
$f_{v0} = 45,0526 + 0,603093 \cdot He - 0,946233 \cdot Cel - 0,658137 \cdot LA - 1,37026 \cdot LB - 10,977 \cdot Ci - 0,398132 \cdot Ext + 21,459 \cdot Por + 30,3891 \cdot \rho_{ap}$	96,97
$f_{s0} = 0,270621 + 0,0205575 \cdot He - 0,00059906 \cdot Cel - 0,007045 \cdot LA - 0,139357 \cdot LB - 0,394968 \cdot Ci - 0,0264954 \cdot Ext + 0,200725 \cdot Por + 1,08872 \cdot \rho_{ap}$	87,99
$f_M = -674,814 + 1,34682 \cdot He + 12,2643 \cdot Cel + 6,38663 \cdot LA - 25,2675 \cdot LB + 70,657 \cdot Ci + 4,15845 \cdot Ext - 174,338 \cdot Por + 42,228 \cdot \rho_{ap}$	98,99
$E_{c0} = -45131,9 + 787,744 \cdot He + 431,099 \cdot Cel + 205,938 \cdot LA - 1500,98 \cdot LB + 6479,37 \cdot Ci - 103,257 \cdot Ext + 2396,52 \cdot Por + 26327,9 \cdot \rho_{ap}$	99,28
$E_{t0} = -29114,8 + 299,478 \cdot He + 365,822 \cdot Cel + 72,7035 \cdot LA - 1222,82 \cdot LB + 3475,32 \cdot Ci - 210,424 \cdot Ext + 5030,14 \cdot Por + 25366,9 \cdot \rho_{ap}$	99,75
$E_M = -48886,3 + 83,9516 \cdot He + 781,078 \cdot Cel + 225,201 \cdot LA - 1100,24 \cdot LB + 6694,12 \cdot Ci + 149,961 \cdot Ext - 2691,52 \cdot Por + 24469,8 \cdot \rho_{ap}$	99,52
$f_{H0} = -105,501 + 0,289965 \cdot He + 3,02692 \cdot Cel + 1,14436 \cdot LA - 8,96208 \cdot LB - 18,4164 \cdot Ci - 1,04555 \cdot Ext - 71,7444 \cdot Por + 107,66 \cdot \rho_{ap}$	95,22
$f_{H90} = -472,083 - 1,25237 \cdot He + 9,12182 \cdot Cel + 4,57334 \cdot LA - 17,4205 \cdot LB + 30,7517 \cdot Ci + 2,20399 \cdot Ext - 140,339 \cdot Por + 71,3795 \cdot \rho_{ap}$	97,85
$W = -126,674 + 4,894 \cdot He - 0,254245 \cdot Cel + 1,89813 \cdot LA - 5,37704 \cdot LB - 20,5034 \cdot Ci + 0,855499 \cdot Ext + 36,6718 \cdot Por - 10,2846 \cdot \rho_{ap}$	99,89
$f_{c90} = 4,48889 - 0,490513 \cdot He + 0,0743078 \cdot Cel - 0,172129 \cdot LA + 0,112121 \cdot LB + 2,21648 \cdot Ci + 0,0408142 \cdot Ext - 3,29173 \cdot Por + 23,712 \cdot \rho_{ap}$	97,87
$E_{c90} = -1424,82 + 14,22 \cdot He + 12,4742 \cdot Cel + 6,53891 \cdot LA - 72,6691 \cdot LB - 107,596 \cdot Ci + 10,8421 \cdot Ext + 468,118 \cdot Por + 1345,81 \cdot \rho_{ap}$	99,89

Tabela 17. Intervalos dos valores das variáveis independentes utilizadas nos modelos de regressão envolvendo as 10 espécies de madeira.

Propriedade	Intervalo
He (%)	[12,54; 18,14]
Cel (%)	[38,85; 50,82]
LA (%)	[31,63; 43,63]
LB (%)	[0,24; 1,85]
Ci (%)	[0,24; 0,86]
Ext (%)	[6,17; 13,04]
Por (%)	[0,30; 0,73]
ρ_{ap} (g/cm ³)	[0,41; 1,10]

Observa-se que as equações proporcionaram excelentes resultados de R^2 (na quase totalidade dos casos superior a 90%), com apenas três exceções, a seguir justificadas:

- *Retração radial total e retração tangencial total.* Como justificativa cabe destacar que a variabilidade das referidas propriedades está diretamente relacionada a aspectos anatômicos da madeira, como a disposição de fibras, vasos e raios medulares. Além disso, a presença de tilas nas conexões entre os elementos de vaso pode afetar as taxas de percolação de fluidos no interior da madeira, interferindo diretamente nos fenômeno da retração. Tais aspectos não são captados, na análise estatística, apenas com os parâmetros aqui tratados. Corroboram com este argumento as conclusões de autores como Almeida et al (2015); Cavalheiro et al (2016) e Christoforo et al (2016).

- *Resistência da madeira à tração normal às fibras.* Como justificativa é conveniente destacar que tal propriedade é intensamente influenciada por características anatômicas da madeira, em especial pela porcentagem de zonas amorfas em nível microfibrilar e de pequenas imperfeições localizadas que, levando a descontinuidades fragilizantes acentuam o caráter da ruptura

típica neste tipo de solicitação. De tal modo relevante se constitui a referida influência que a NBR ABNT 7190/97 estabelece, em seu artigo 7.2.3, que a segurança das peças estruturais de madeira em relação a estados limites últimos não deve depender da resistência à tração normal às fibras, pelos motivos assinalados. Ainda mais, o mencionado documento normativo determina que, quando as tensões de tração normal às fibras puderem atingir valores significativos em situações estruturais, deverão ser empregados dispositivos, em geral metálicos, que se comportem como restrição às consequências dessas tensões. É claro que esses aspectos não são captados, na análise estatística, apenas com os parâmetros aqui tratados. Corroboram com este argumento as conclusões de autores como Ardalany et al (2011), Almeida et al (2015); Cavaleiro et al (2016), Christoforo et al (2016), Kretschmann e Mascia (2016) e Widmann (2012).

Ressalta-se que 6 propriedades tiveram R^2 acima de 99% (E_{c90} , W , E_M , E_{t0} , E_{c0} e f_{c0}) colocando-as no patamar de elevada confiabilidade. Dentre estas, a resistência à compressão paralela (f_{c0}) apresenta R^2 99,69%. Isto é altamente interessante pelo fato de que tal propriedade é a de referência, segundo a NBR 7190/97, para o enquadramento de lotes de espécies pouco conhecidas nas cinco classes de resistências preconizadas em tal documento.

Por outro lado, é importante destacar que, para a obtenção dos parâmetros para estimar o conjunto de propriedades estudado neste trabalho foram necessários, em média, dois dias por espécie. Este intervalo de tempo é muito inferior aos necessários para se promover a caracterização completa das espécies por intermédio dos ensaios destrutivos preconizados pela NBR ABNT 7190/97, usualmente em torno de duas semanas por espécie, conforme assinalam Rocco Lahr (2016a) e Christoforo (2017b).

Com base na Tabela 16, na Tabela 18 são apresentados os resultados dos efeitos (+ ou –) de cada variável independente na estimativa das propriedades (Prop.) das madeiras considerando o conjunto das 10 espécies.

Tabela 18. Resultados dos efeitos (+ ou –) das variáveis independentes na estimativa das propriedades da madeira considerando as 10 espécies.

Prop.	He	Cel	LA	LB	Ci	Ext	Por	ρ_{ap}
RRT	-	+	+	+	+	+	-	-
RTT	-	+	+	+	+	+	-	-
f_{c0}	+	+	+	-	-	-	+	+
f_{c90}	-	+	-	+	+	+	-	+
f_{t0}	+	+	-	-	+	+	+	+
f_{t90}	+	-	-	-	-	-	+	+
f_{v0}	+	-	-	-	-	-	+	+
f_{s0}	+	-	-	-	-	-	+	+
f_M	+	+	+	-	+	+	-	+
f_{H0}	+	+	+	-	-	-	-	+
f_{H90}	-	+	+	-	+	+	-	+
E_{c0}	+	+	+	-	+	-	+	+
E_{c90}	+	+	+	-	-	+	+	+
E_{t0}	+	+	+	-	+	-	+	+
E_M	+	+	+	-	+	+	-	+
W	+	-	+	-	-	+	+	-

Dos componentes analisados, a densidade exerce influência na maioria das propriedades, sendo que apenas a tenacidade e retratibilidade, radial e tangencial, não são influenciados diretamente por ela. Isto foi possível ser verificado com os resultados presentes no item 4.1.

Em seguida tem-se que a celulose tem menor influência em apenas 4 propriedades, assim como hemicelulose. Este fato é plausível, uma vez que a celulose é o principal componente químico das madeiras (40 a 50%) e a hemicelulose contribui para a rigidez da parede celular em tecidos lignificados.

A lignina B (solúvel) foi a variável com menor influência nas propriedades. Relaciona-se de modo aceitável apenas com a retratibilidade (radial e tangencial), dureza (normal e paralela) e resistência à compressão paralela.

Infelizmente, dada a não disponibilidade, na literatura técnica da área, de resultados obtidos em trabalhos correlatos, fica inviabilizada a correspondente comparação.

Por outro lado, configura-se mais uma vez a originalidade da abordagem adotada no presente trabalho.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DO TRABALHO

A partir dos resultados do estudo pode-se concluir que:

- É possível estabelecer equações confiáveis, a partir das variáveis: densidade aparente, porosidade, porcentagem de celulose, de hemicelulose, de lignina A, de lignina B, de extrativos e de cinzas de espécies tropicais brasileiras de madeira, para estimar o conjunto de propriedades físicas e mecânicas estudadas neste trabalho.
- A confiabilidade das equações se evidenciou por intermédio dos elevados valores dos coeficientes de regressão (R^2) obtidos para cada equação, exceto nos três casos referidos em seção anterior.
- Obteve-se equação com R^2 99,69% para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras que é, em seu valor característico, a propriedade responsável pelo enquadramento de lotes de espécies pouco conhecidas numa das cinco classes de resistência preconizadas pela NBR ABNT 7190/97, para as dicotiledôneas.
- Os parâmetros para estimar o conjunto de propriedades estudado neste trabalho (da ordem de dois dias por espécie) podem ser obtidos em intervalos de tempo muito inferiores aos necessários para se promover a caracterização completa das espécies por intermédio dos ensaios estipulados pela NBR ABNT 7190/97 (usualmente em torno de duas semanas por espécie).

Para a continuidade da pesquisa neste tema, sugere-se:

- Expandir o número de espécies estudadas para confirmar a validade das equações obtidas.
- Desenvolver análise estatística com vistas a avaliar a possibilidade de relacionar as porcentagens de constituintes químicos da madeira com as propriedades físico-mecânicas determinadas na condição de umidade igual ou superior ao ponto de saturação das fibras.

- Avaliar a influência do tempo de autoclavagem nas porcentagens de celulose, hemicelulose, lignina A e lignina B, para eventual proposição de ajuste da norma TAPPI T-222 om-02.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H.; CHAHUD, E.; FERRO, F. S.; POLETO, S. F. S.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Physical and mechanical properties of *Dipteryx odorata* (Aublet) Willd**, Advanced Materials Research, 1025-1026 (2014) 46-49.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. **Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood**. International Journal of Materials Engineering, 6 (2016) 67-71.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; MARCOLIN, L. A.; GONCALVES, D.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. **Correlation between Dry Density and Volumetric Shrinkage Coefficient of Three Brazilian Tropical Wood Species**. International Journal of Materials Engineering, v. 5, p. 50-63, 2015.

ALMEIDA, T. H. **Estudo da Estabilidade Dimensional de Madeiras Tropicais Brasileiras**. 2015. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

AMOA, M.; APPIAH-YEBOAHAND, J.; OKAI, R. **Characterization of physical and mechanical properties of branch, stem and root wood of iroko and emiretropical trees**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, v 4, n 12, p 1755-1761, 2012; ISSN: 20407459,

APA – The Engineered Wood Association. **Wood products and other bulding materials used in new residential construction in the United States, with comparison to previous studies**. 2012.

ARAÚJO, V. A.; BARBOSA, J. C.; GAVA, M.; GARCIA, J. N.; SOUZA, A. J. D.; SAVI, A. F.; MORALES, H. A. M.; MOLINA, J. C.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. **Classification of Wooden Housing Building Systems**. Bioresources (Raleigh, N.C, v. 11, p. 7889-7901, 2016.

ARDALANY, M. DEAM, B.; FRAGIÁCOMO, M.; CREWS, K. I. **Tension perpendicular to grain strength of wood, Laminated Veneer Lumber (LVL), and Cross-Banded LVL (LVL-C).** Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, p 891-896, 2011, Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials.

ARWADE, S.; WINANS, R.; CLOUSTON, P. **Variability of the compressive strength of parallel strand lumber.** Journal of Engineering Mechanics, v 136, n 4, p 405-412, April 2010; ISSN: 07339399;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6230: Ensaio físico e mecânico de madeiras - Método Brasileiro.** Rio de Janeiro: 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro: 1997

BALOGH, D.T. **Efeito do solvente na obtenção de ligninas pelo processo organossolve.** 1989. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

BETTELHEIM, F. A.; MARCH, J. **Introduction to General, Organic & Biochemistry.** Saunders College Publishing, 1998. 920p.

BURDZIK, W. M. G.; NKWERA, P. D. **Transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size *Eucalyptus grandis*.** Forest Products Journal, Madison, v. 52, n. 6, p. 63-67, 2002.

CABRERA, A. L. & KLEIN, R. M. **Compostas, Tribo Mutiseae.** In Flora Ilustrada Catarinense (R. Reitz, ed.). Herbário Barbosa Rodrigues, Itajaí, v.1, fasc. 38, p. 1-124. 1973.

CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** 1 ed. Barueri: Manole Ltda, 2003.

CALIL JR, C; MOLINA, J. C. **Emerging Timber Bridge Program to São Paulo State: A Five-Year Report**. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 5, p. 459-464, 2011.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species**. International Journal of Materials Engineering 2016, 6(3): 107-112. 2016

CELULOSE ONLINE. <http://celuloseonline.com.br/nos-estados-unidos-madeira-e-o-material-mais-importante-para-construir-casas/>. Acessado em: 17/02/2017

CHRISTOFORO, A. L.; ARROYO, F. N.; SILVA, D. A. P. L.; PANZERA, T. H.; ROCCO LAHR, F. A. **Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrina* wood specie**. Engenharia Agrícola (Online), v. 37, p. 376-384, 2017a.

CHRISTOFORO, A. L.; ARROYO, F. N.; SILVA, D. A. L.; PANZERA, T. H.; ROCCO LAHR, F. A. **Full Characterization of Calycophyllum Multiflorum Wood Specie**. Engenharia Agrícola, v. 37, p. 637-643, 2017b.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; SANTOS, J. C.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. **Shrinkage for some wood species estimated by density**. International Journal of Materials Engineering, v. 6, p. 23-27. 2016

CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; ARAUJO, V. A.; FIORELLI, J.; ROCCO LAHR, F. A. . **Timber beam repair based on polymer-cementitious blends**. Engenharia Agrícola (Online), v. 37, p. 366-375, 2017c.

COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas, 30 : 1-009. 1973.

DA SILVA, F.; HIGUCHI, N.; NASCIMENTO, C. C.; MATOS, J. L. M.; DE PAULA, E. V. C. M.; DOS SANTOS, J. **Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood**. Journal of Tropical Forest Science, v 26, n 1, p 69-74, 2014.

DE ALMEIDA, D. H.; CAVALHEIRO, R. S.; FERRO, F. S.; DE ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL, C.; LAHR, F. A. R. **Hardness of the *Schizolobium amazonicum* Wood**. *Advanced Materials Research (Online)*, v. 912-914, p. 2018-2021, 2014.

DE ALMEIDA, D. H.; DE ALMEIDA, T. H.; MOLINA, J. C. FERRO, F.SALLES ; CHRISTOFÓRO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Embedment Strength of *Pinus sp.* Wood to Metal Pins**. *Advanced Materials Research (Online)*, v. 884-885, p. 653-656, 2014.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Dissertação de Mestrado - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

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

EDWIN, P.; OZARSKA, B. **Bending properties of hardwood timbers from secondary forest in Papua New Guinea**. *Journal of Tropical Forest Science*, v 27, n 4, p 456-461, 2015.

ERIKSSON, L. O.; GUSTAVSSON, L.; HÄNNINEN, R.; KALLIO, M.; LYHYKÄINEN, H.; PINGOUD, K.; POHJOLA, J.; SATHRE, R. **Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework**. *Eur J Forest Res* (2012) 131:131–144.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: W.de Gruyter, 1984.

FREITAS, J. F. **Estudo preliminar sobre a utilização da cana-de-açúcar e seus derivados para produção de painéis hardboard**. 184p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

FUJIMOTO, T.; MATSUMOTO, K.; KURATA, Y.; TSUCHIKAWA, A. **Rapid and nondestructive evaluations of wood mechanical properties by near infrared spectroscopy**. Japan, 2008.

GAO, Z.; ZHU, Y.; WANG, X.; LIN, Y. WANG, X.; SUN, J. **Study on the Chemical Properties of *Toona ciliate***. Applied Mechanics and Materials Vols 94-96. pp 759-763. Trans Tech Publications, Switzerland. 2011

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; LUCIA, R. M. D.; SARTORIO, R. C. **Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis***. Revista Árvore, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 501-509, 2009.

HUBBELL S. P.; HE F.; CONDIT R.; BORDA-DE-ÁGUA L.; KELLNER J.; STEEGE H. **How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct?** The National Academy of Sciences of the USA. 2008.

ICIMOTO, F. H.; CALIL NETO, C.; FERRO, F. S.; MACEDO, L. B.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CALIL JR, C. **Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa***. International Journal of Materials Engineering, v. 6, p. 51-55, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo. 2013.

KACÍK, F.; ŠMÍRA, P.; KACÍKOVÁ, D.; REINPRECHT, L.; NASSWETTROVÁ, A. **Chemical changes in fir wood from old buildings due to ageing**. Cellulose Chemistry and Technology. 2013.

KILIC, A. & NIEMZ, P. **Extractives in some tropical woods**. European Journal of Wood and Wood Products, v 70, n 1-3, p 79-83, January 2012

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3.ed. Curitiba: UFPR, 2005.

KOLIN, B.; JANEZIC, T. S. **The Effect of Temperature, Density and Chemical Composition upon the Limit of Hygroscopicity of Wood**. Holzforschung. p263-268. 1996

KOMARIAH, R. N.; HADI, Y. S.; MASSIJAYA, M.Y.; SURYANA, J. **Physical-mechanical properties of glued laminated timber made from tropical small-diameter logs grown in Indonesia**. Journal of the Korean Wood Science and Technology, v 43, n 2, p 156-167, March 2015;

KRETSCHMANN, D. E.; MASCIA, N. T. **Testing of small clear tension perpendicular to grain samples of Sugar Maple for radial, tangential and 45 degree loading orientations**. Source: WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering, 2016, WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering.

LHATE, I.; CUVILAS, C.; TERZIEV, N.; JIRJIS, R. **Chemical composition of traditionally and lesser used wood species from Mozambique**. Wood Material Science and Engineering, v 5, n 3-4, p 143-150, 2010.

LOGSDON, N. B.; CALIL JR, C. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, n.18, p.77-107, 2002.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; ROSA, L. M. **Caracterização da madeira de Cambará, *Vochysia guianensis* Aubl.** Revista Engenharia Civil, n. 29, p. 57-69, 2007.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARCELO, C.R. **Determinação da relação siringila/guaiacila em ligninas de *Eucalyptus* spp. por pirólise associada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas**. 2007. 63p. Dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, 2007.

MATA, V. L. G. **Caracterização de meios porosos: porosimetria, modelização 3D e tomografia seriada – aplicação a suportes catalíticos**. 1998. 304 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1998.

MILLER, R.B. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, Wisconsin, Forest Products Laboratory - FPL, 463p., 1999.

MITCHUAL, S. J.; MENSAH, K. F.; DARKWA, N. A. **Evaluation of Fuel Properties of Six Tropical Hardwood Timber Species for Briquettes**. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 2014, 4, 1-9.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass**. Laboratory Analytical Procedure (LAP). 2012

NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; BATISTA, F. R. R. **Anatomical and energy characteristics of charcoal made from five species**. Acta Amazonica. 2014.

REMADE. <<http://www.remade.com.br/>>. Acesso em: 14 de novembro de 2016.

RAVENSHORST, G.; VAN DE KUILEN, J. **Comparison of methods of strength classification of (tropical) hardwood timber**. 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, v 2, p 1004-1012, 2010, 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010

ROCCO LAHR, F. A.; AFTIMUS, B. H. C.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N. **Full Characterization of *Vatairea* sp. Wood Specie**. International Journal of Materials Engineering, v. 6, p. 92-96, 2016a.

ROCCO LAHR, F. A.; CHAHUD, E.; FERNANDES, R. A.; TEIXEIRA, R. S. **Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras da madeira**. Scientia Forestalis (IPEF), v. 38, p. 153-158, 2010.

ROCCO LAHR, F. A.; CHRISTOFORO, A. L.; FIORELLI, J. **Influence of nails size and layout to obtain the reduction coefficient of moment of inertia for timber beams with composite cross section**. Engenharia Agrícola (Online), v. 36, p. 715-723, 2016b.

ROCCO LAHR, F. A.; CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, C. E. G.; ANDRADE JUNIOR, J. R.; PINHEIRO, R. V. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) com diferentes teores de umidade e extraídas de regiões distintas.** Revista Árvore (Impresso), v. 40, p. 147-154, 2016c.

SANTANA, M. A. E. & OKINO, E. Y. A. **Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species.** Holzforschung, Berlin.2007.

SILVA, G. A. C.; VAREJÃO, M. J. C.; NASCIMENTO, C. C. **Estudos tecnológicos de alternativas de uso de resíduos madeireiros.** Anais do 61a Reunião Anual da SBPC, p.5356, Manaus, AM. 2009.

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e *Pinus Taeda*.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais e Área de concentração em Desenvolvimento Caracterização e Aplicação de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos; Instituto de Física de São Carlos; Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2012.

SJOSTROM, S. **Wood chemistry: fundamentals and applications.** London: Academic Press, Inc., 1981.

STAMADE. <<http://stamade.com.br/wood-frame>>. Acesso em: 20 de maio de 2017.

STOLF, D. O.; BERTOLINI, M. S.; ALMEIDA, D. H. ; SILVA, D. A. L.; PANZERA, T. H.; CHRISTÓFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. **Influence of growth ring orientation of some wood species to obtain toughness.** REM. Revista da Escola de Minas (Impresso), v. 68, p. 265-271, 2015.

TER STEEGE, H. et al. **The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa.** Sci. Rep. 6, 29549; doi: 10.1038/srep29549 (2016). (Nature)

WIDMANN, R.; FERNANDEZ-CABO, J. L.; STEIGER, R. S. **Mechanical properties of thermally modified beech timber for structural purposes.** European Journal of Wood and Wood Products, v 70, n 6, p 775-784, November 2012.

ZAU, M. D. L.; VASCONCELOS, R. P. de; GIACON, V. M.; LAHR, F. A. R. **Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia - Cumaru (*Dipteryx Odorata*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona.** Polímeros, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 726-732, Dec. 2014.

**Apêndice - Tabelas com resultados dos ensaios preconizados
pelo Anexo B da NBR 7190/97, componentes químicos e
porosidade para cada madeira.**

Nas tabelas a seguir constam os resultados das propriedades físicas e mecânicas, componentes químicos e de porosidade das espécies de madeiras, onde:

1. Densidade aparente
2. Retração radial total
3. Retração tangencial total
4. Resistência à compressão paralela às fibras
5. Resistência à tração paralela às fibras
6. Resistência à tração normal às fibras
7. Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
8. Resistência ao fendilhamento
9. Resistência convencional no ensaio de flexão estática
10. Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras
11. Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras
12. Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática
13. Dureza paralela às fibras
14. Dureza normal às fibras
15. Tenacidade
16. Resistência à compressão normal às fibras
17. Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras
- A. Resultado para as 12 amostras.
- B. Resultado para as 6 primeiras amostras.
- C. Resultado para as 6 últimas amostras

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Tatajuba a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,95	5,96	0,94	3,70	0,95	2,73
² R_{radT} (%)	4,29	11,86	3,99	20,55	4,58	16,04
³ R_{tgT} (%)	5,88	13,09	6,17	14,06	5,59	15,74
⁴ f_{c0} (MPa)	80	19,43	76	6,06	85	6,98
⁵ f_{t0} (MPa)	96	26,44	103	21,21	90	24,32
⁶ f_{t90} (MPa)	3,8	32,30	3,5	17,65	4,2	24,00
⁷ f_{v0} (MPa)	20	8,80	21	16,93	19	18,07
⁸ f_{s0} (MPa)	0,87	19,27	0,96	14,29	1	11,11
⁹ f_M (MPa)	107	24,39	102	19,41	112	18,87
¹⁰ E_{c0} (MPa)	18961	18,15	18160	9,87	19761	10,70
¹¹ E_{t0} (MPa)	18200	13,84	17345	7,36	19056	7,89
¹² E_M (MPa)	18427	14,17	17695	9,49	19159	9,64
¹³ f_{h0} (MPa)	121	16,72	115	10,07	126	12,60
¹⁴ f_{h90} (MPa)	88	15,67	83	12,40	92	12,80
¹⁵ W (daN.m)	1,10	35,74	0,98	26,29	1,21	19,12
¹⁶ f_{c90} (MPa)	15	21,33	14	27,27	16	20,00
¹⁷ E_{c90} (MPa)	903	20,04	853	13,46	953	15,45

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Roxinho a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,94	3,19	0,95	2,11	0,93	3,23
² R_{radT} (%)	3,62	7,73	3,75	13,07	3,49	15,19
³ R_{tgT} (%)	6,07	10,54	6,16	14,12	5,98	15,72
⁴ f_{c0} (MPa)	72	8,40	76	9,21	68	10,29
⁵ f_{t0} (MPa)	114	35,47	120	29,75	118	27,80
⁶ f_{t90} (MPa)	4,3	30,70	4,6	24,57	4,0	26,00
⁷ f_{v0} (MPa)	20	14,89	23	12,91	17	18,35
⁸ f_{s0} (MPa)	1,09	18,35	1,18	20,34	0,99	22,22
⁹ f_M (MPa)	151	11,74	161	10,56	141	14,18
¹⁰ E_{c0} (MPa)	21913	21,31	22763	18,70	21162	18,47
¹¹ E_{t0} (MPa)	22586	8,67	18980	11,52	18700	10,73
¹² E_M (MPa)	20396	10,43	21417	10,76	19375	11,17
¹³ f_{h0} (MPa)	140	5,35	145	6,20	135	6,44
¹⁴ f_{h90} (MPa)	115	5,56	119	7,48	111	5,13
¹⁵ W (daN.m)	1,04	25,70	1,21	26,45	0,87	32,18
¹⁶ f_{c90} (MPa)	19	15,79	19	14,05	18	15,22
¹⁷ E_{c90} (MPa)	975	21,33	1003	25,52	947	23,13

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cambará a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,70	2,86	0,71	4,23	0,69	2,90
² R_{radT} (%)	5,90	17,46	6,04	18,05	5,76	17,71
³ R_{tgT} (%)	7,31	19,56	7,49	21,50	7,13	19,64
⁴ f_{c0} (MPa)	48	14,58	49	12,24	46	10,87
⁵ f_{t0} (MPa)	51	21,18	57	21,40	46	22,61
⁶ f_{t90} (MPa)	2,1	19,52	2,3	20,00	1,9	21,05
⁷ f_{v0} (MPa)	9	27,78	10	27,00	9	23,33
⁸ f_{s0} (MPa)	0,40	35,00	0,44	27,27	0,36	38,89
⁹ f_M (MPa)	76	18,42	79	18,99	73	20,55
¹⁰ E_{c0} (MPa)	13267	10,37	13370	10,85	13165	10,71
¹¹ E_{t0} (MPa)	12146	14,10	12294	13,68	11998	13,59
¹² E_M (MPa)	13168	14,85	13198	15,81	13038	14,32
¹³ f_{h0} (MPa)	59	20,20	60	17,77	59	20,31
¹⁴ f_{h90} (MPa)	40	20,45	40	20,54	39	18,78
¹⁵ W (daN.m)	0,78	15,38	0,75	21,33	0,81	13,58
¹⁶ f_{c90} (MPa)	9	23,33	7	22,86	10	20,00
¹⁷ E_{c90} (MPa)	587	17,55	600	19,50	574	17,07

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cedroarana a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,57	7,67	0,56	5,36	0,58	6,90
² R_{radT} (%)	3,49	26,53	3,80	26,84	3,18	27,99
³ R_{tgT} (%)	6,44	18,42	6,95	14,68	5,93	21,08
⁴ f_{c0} (MPa)	41	23,93	37	24,32	46	23,91
⁵ f_{t0} (MPa)	62	28,27	69	27,54	55	30,91
⁶ f_{t90} (MPa)	3,1	38,37	3,5	37,14	2,6	42,31
⁷ f_{v0} (MPa)	12	27,57	13	23,13	10	29,81
⁸ f_{s0} (MPa)	0,57	25,03	0,64	18,75	0,50	30,00
⁹ f_M (MPa)	60	19,28	67	16,42	53	22,64
¹⁰ E_{c0} (MPa)	10252	12,67	9320	14,65	11184	11,12
¹¹ E_{t0} (MPa)	10861	15,64	10005	17,45	11717	11,10
¹² E_M (MPa)	10077	10,85	9276	12,11	10877	9,40
¹³ f_{h0} (MPa)	58	32,87	55	30,91	61	26,23
¹⁴ f_{h90} (MPa)	36	19,62	40	17,50	32	18,75
¹⁵ W (daN.m)	0,45	40,03	0,54	37,04	0,37	43,24
¹⁶ f_{c90} (MPa)	9	22,22	8	30,00	9	21,11
¹⁷ E_{c90} (MPa)	512	19,73	451	21,29	573	17,10

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cumaru a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	1,09	3,08	1,08	3,70	1,10	2,73
² R_{radT} (%)	3,95	20,85	3,65	20,55	4,24	16,04
³ R_{tgT} (%)	6,38	16,94	6,97	14,06	5,78	15,74
⁴ f_{c0} (MPa)	93	5,45	99	6,06	86	6,98
⁵ f_{t0} (MPa)	122	21,57	132	21,21	111	24,32
⁶ f_{t90} (MPa)	2,9	19,71	3,4	17,65	2,5	24,00
⁷ f_{v0} (MPa)	18	16,69	18,9	16,93	17	18,07
⁸ f_{s0} (MPa)	0,76	11,87	0,70	14,29	0,81	11,11
⁹ f_M (MPa)	165	19,01	170	19,41	159	18,87
¹⁰ E_{c0} (MPa)	23002	10,76	24100	9,87	22901	10,70
¹¹ E_{t0} (MPa)	22719	7,09	24012	7,36	21426	7,89
¹² E_M (MPa)	23217	9,48	21213	9,49	25221	9,64
¹³ f_{h0} (MPa)	138	10,31	149	10,07	127	12,60
¹⁴ f_{h90} (MPa)	127	13,30	129	12,40	125	12,80
¹⁵ W (daN.m)	2,32	20,65	2,13	26,29	2,51	19,12
¹⁶ f_{c90} (MPa)	24	21,05	22	27,27	20	20,00
¹⁷ E_{c90} (MPa)	1269	14,70	1308	13,46	1230	15,45

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cupiúba a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,86	3,72	0,86	2,33	0,86	3,49
² R_{radT} (%)	4,37	12,83	4,15	15,42	4,60	14,78
³ R_{tgT} (%)	7,49	11,09	8,02	11,85	6,96	10,92
⁴ f_{c0} (MPa)	57	19,18	64	18,75	50	18,00
⁵ f_{t0} (MPa)	73	27,29	80	23,75	66	27,27
⁶ f_{t90} (MPa)	3,6	30,43	4,2	23,81	3,1	35,48
⁷ f_{v0} (MPa)	18	15,76	21	16,19	16	18,75
⁸ f_{s0} (MPa)	0,73	27,89	0,83	25,30	0,64	35,94
⁹ f_M (MPa)	79	19,87	85	20,00	73	26,03
¹⁰ E_{c0} (MPa)	13612	20,91	15017	17,80	12206	24,44
¹¹ E_{t0} (MPa)	13368	23,75	14018	21,44	12718	23,22
¹² E_M (MPa)	13379	19,75	12478	20,44	14280	19,58
¹³ f_{h0} (MPa)	98	18,27	101	19,80	95	17,89
¹⁴ f_{h90} (MPa)	67	15,23	72	13,89	62	17,74
¹⁵ W (daN.m)	0,66	44,52	0,70	38,57	0,61	40,98
¹⁶ f_{c90} (MPa)	14	21,43	12	16,67	15	20,00
¹⁷ E_{c90} (MPa)	834	18,23	802	20,82	865	14,57

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Caixeta a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,41	8,29	0,40	8,00	0,41	7,07
² R_{radT} (%)	4,81	11,25	4,65	12,13	4,97	11,51
³ R_{tgT} (%)	7,89	11,46	7,72	11,33	8,06	11,45
⁴ f_{c0} (MPa)	31	20,10	29	20,93	33	19,88
⁵ f_{t0} (MPa)	39	14,64	36	14,78	42	15,36
⁶ f_{t90} (MPa)	2,0	28,00	1,9	27,37	2,1	30,00
⁷ f_{v0} (MPa)	6	33,50	6	37,00	6	39,83
⁸ f_{s0} (MPa)	0,32	20,31	0,30	23,67	0,34	19,41
⁹ f_M (MPa)	48	14,38	44	17,05	52	14,04
¹⁰ E_{c0} (MPa)	6123	19,03	6020	17,33	6226	19,10
¹¹ E_{t0} (MPa)	7821	20,43	7731	21,64	7911	21,40
¹² E_M (MPa)	7944	16,88	7855	17,39	8034	15,55
¹³ f_{h0} (MPa)	40	20,05	38	18,67	40	21,09
¹⁴ f_{h90} (MPa)	21	16,04	20	16,58	23	17,78
¹⁵ W (daN.m)	1,25	26,40	1,06	33,96	1,44	22,22
¹⁶ f_{c90} (MPa)	4	28,25	4	24,50	4	34,00
¹⁷ E_{c90} (MPa)	390	17,95	379	17,41	401	20,20

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cedro a 12%
de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,50	5,35	0,49	6,12	0,50	4,00
² R_{radT} (%)	3,45	24,14	3,67	21,80	3,23	24,15
³ R_{tgT} (%)	5,02	19,32	5,53	19,17	4,51	19,73
⁴ f_{c0} (MPa)	31	17,88	28	19,29	34	19,41
⁵ f_{t0} (MPa)	67	22,80	64	21,88	72	18,06
⁶ f_{t90} (MPa)	2,8	26,90	2,4	29,17	3,12	24,04
⁷ f_{v0} (MPa)	9	24,41	8,20	18,29	9,80	25,51
⁸ f_{s0} (MPa)	0,46	32,84	0,42	30,95	0,51	27,45
⁹ f_M (MPa)	57	20,46	51	23,92	63	16,67
¹⁰ E_{c0} (MPa)	8354	14,09	7720	13,69	8988	14,37
¹¹ E_{t0} (MPa)	9523	20,21	8558	19,74	9948	20,14
¹² E_M (MPa)	8717	19,86	8205	20,05	9229	20,81
¹³ f_{h0} (MPa)	49	35,78	44	36,82	53	29,62
¹⁴ f_{h90} (MPa)	32	25,01	29	24,83	35	22,57
¹⁵ W (daN.m)	0,53	39,95	0,49	40,82	0,58	41,38
¹⁶ f_{c90} (MPa)	7	30,00	6,1	31,15	7,8	23,08
¹⁷ E_{c90} (MPa)	462	16,88	390	20,51	533	15,76

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Sucupira a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,79	1,22	0,79	1,79	0,79	0,90
² R_{radT} (%)	5,42	0,15	5,38	0,15	5,46	0,14
³ R_{tgT} (%)	8,28	0,17	8,23	0,16	8,33	0,18
⁴ f_{c0} (MPa)	61	13,86	56	24,28	63	6,15
⁵ f_{t0} (MPa)	70	27,28	75	30,96	64	20,56
⁶ f_{t90} (MPa)	3,1	12,22	3,0	12,27	3,3	11,39
⁷ f_{v0} (MPa)	16,4	15,26	17,4	14,99	15,3	13,77
⁸ f_{s0} (MPa)	0,69	16,59	0,66	17,75	0,73	15,47
⁹ f_M (MPa)	92	15,55	90	18,63	93	13,57
¹⁰ E_{c0} (MPa)	13676	14,08	12008	14,06	14790	9,43
¹¹ E_{t0} (MPa)	13690	14,56	14401	15,78	12979	11,84
¹² E_M (MPa)	12955	17,94	13130	24,53	12779	9,35
¹³ f_{h0} (MPa)	96	12,59	95	10,74	96	15,20
¹⁴ f_{h90} (MPa)	67	13,13	68	13,47	67	14,07
¹⁵ W (daN.m)	45,30	34,15	54,34	30,68	36,26	19,97
¹⁶ f_{c90} (MPa)	10	3,86	10	4,23	10	3,68
¹⁷ E_{c90} (MPa)	8796	6,22	8858	4,95	8735	7,73

**Resultados das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Cajueiro a
12% de umidade**

Propriedade	A		B		C	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
¹ ρ_{ap} (g/cm ³)	0,55	7,64	0,54	7,04	0,55	8,18
² R_{radT} (%)	4,39	10,64	4,81	9,31	3,97	12,80
³ R_{tgT} (%)	6,39	17,06	7,01	15,12	6,77	19,79
⁴ f_{c0} (MPa)	40	19,50	37	20,54	43	20,00
⁵ f_{t0} (MPa)	84	24,52	79	25,06	89	25,51
⁶ f_{t90} (MPa)	2,0	28,00	2,0	25,50	2,1	28,10
⁷ f_{v0} (MPa)	9,1	35,49	8,7	32,99	9,5	36,32
⁸ f_{s0} (MPa)	0,49	17,76	0,56	14,11	0,43	26,05
⁹ f_M (MPa)	72	17,78	77	13,90	67	19,70
¹⁰ E_{c0} (MPa)	11741	15,09	11131	14,05	12351	14,62
¹¹ E_{t0} (MPa)	11528	17,03	10816	16,50	12238	17,77
¹² E_M (MPa)	12156	13,88	11323	15,22	12989	13,84
¹³ f_{h0} (MPa)	50	20,40	46	22,61	55	17,45
¹⁴ f_{h90} (MPa)	28	18,57	26	18,46	31	18,71
¹⁵ W (daN.m)	0,72	38,89	0,67	37,31	0,76	34,21
¹⁶ f_{c90} (MPa)	7	15,71	7,0	15,14	7,0	17,57
¹⁷ E_{c90} (MPa)	518	23,75	578	17,47	558	25,63

Resultados das composições químicas das madeiras estudadas

Espécies	Celulose			Hemicelulose			Lignina A			Lignina B			Cinzas			Extrativos		
	%	Média	CV (%)	%	Média	CV (%)	%	Média	CV (%)	%	Média	CV (%)	%	Média	CV (%)	%	Média	CV (%)
Tatajuba	42,77	42,93	0,52	15,26	15,19	0,64	35,21	35,16	0,22	0,78	0,63	33,41	0,31	0,40	31,82	4,81	4,78	0,66
	43,08			15,12			35,10			0,48			0,49			4,76		
Roxinho	42,75	44,13	4,43	17,14	17,15	0,05	32,90	32,96	0,26	1,22	1,17	6,46	0,53	0,55	5,14	9,15	8,95	3,09
	45,51			17,15			33,02			1,12			0,57			8,76		
Cambará	39,51	38,94	2,06	14,99	15,12	1,24	36,84	36,98	0,52	1,07	1,01	8,48	0,88	0,86	4,14	8,42	8,03	6,79
	38,38			15,25			37,11			0,95			0,83			7,64		
Cedroarana	45,69	45,83	0,42	14,32	14,36	0,41	34,09	34,00	0,40	1,71	1,75	3,26	0,62	0,63	1,13	6,50	6,31	4,25
	45,96			14,40			33,90			1,79			0,63			6,12		
Cupiúba	38,93	41,23	7,89	13,12	13,73	6,22	36,34	35,07	5,14	1,40	1,49	8,82	0,24	0,24	3,01	13,67	13,04	6,75
	43,53			14,33			33,79			1,58			0,23			12,42		
Cumarú	43,19	43,69	1,61	14,93	14,88	0,52	36,79	37,11	1,20	1,06	1,03	5,19	0,50	0,50	1,43	12,84	12,72	1,28
	44,18			14,83			37,42			0,99			0,49			12,61		
Caixeta	46,51	47,39	2,63	14,27	13,93	3,49	31,58	31,63	0,20	0,93	0,96	4,02	0,51	0,51	1,40	6,31	6,17	3,38
	48,27			13,58			31,67			0,98			0,5			6,02		
Cedro	45,52	43,53	6,46	13,58	12,54	11,6	35,09	33,48	6,82	0,19	0,24	25,17	0,73	0,69	9,29	8,46	8,06	6,91
	41,54			11,51			31,86			0,28			0,64			7,67		
Sucupira	38,53	38,85	1,16	17,16	16,98	1,56	42,07	43,63	5,06	1,22	1,06	20,24	0,23	0,24	3,01	10,67	10,61	0,78
	39,17			16,79			45,19			0,91			0,24			10,56		
Cajueiro	51,27	50,82	1,26	17,72	18,14	3,23	25,87	25,92	0,25	1,75	1,85	7,04	0,61	0,58	7,31	7,06	6,94	2,42
	50,37			18,55			25,96			1,94			0,55			6,82		

Resultados da porosidade das madeiras estudadas

Espécie	Porosidade (%)
Tatajuba	31,60
Roxinho	29,62
Cambará	46,10
Cedroarana	72,04
Cupiúba	40,36
Cumaru	36,63
Caixeta	73,25
Cedro	73,29
Sucupira	44,66
Cajueiro	65,95