



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Celi Cristina Ramos da Silva

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DO CERNE E ALBURNO DE
PAU-BRASIL (*Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis)**

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Celi Cristina Ramos da Silva

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE
PAU-BRASIL (*Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis)**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO – 2019

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE
PAU-BRASIL (*Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis)**

Celi Cristina Ramos da Silva

APROVADA EM:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes – UFRRJ
Membro

MSc. Carlos Eduardo da Silva Silveira – UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia a Deus e a minha amada avó Joanna.

A persistência é o caminho do êxito.

- Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todos os benefícios feitos a mim. Por seu filho Jesus, que nunca me abandonou. Por todo amor que recebi de Ti.

Agradeço aos meus avós Joanna e Valério, por todo apoio, investimento em minha educação e pelas orações que me conduziram pelo caminho da persistência.

Agradeço a minha mãe Valéria e minha tia Alessandra, por acreditarem em mim e se orgulharem da minha conquista. À minha tia Silvia, quero agradecer por ter proporcionado meios para me ajudar durante a graduação.

Agradeço aos meus irmãos Marcos e Eric por me ajudarem, cada um de uma forma diferente, e ao meu primo Arthur, pois sua alegria foi um incentivo para continuar nessa caminhada.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade de formação, pelo alojamento estudantil e bolsa alimentação concedidos durante a graduação.

Agradeço ao MEC e ao CNPq pelas bolsas de estudos concedidas. Aos grupos PET Inclusão, LSRACA, CAEF, Flora Júnior, LPM e NPQM quero agradecer imensamente pela oportunidade de termos trabalhado juntos, agregando conhecimento científico e profissional.

Agradeço ao meu professor e orientador Alexandre Monteiro, por ter sido amigo e muitas vezes um pai, sempre me incentivando, preocupado com minha saúde e orgulhoso das minhas conquistas, seus ensinamentos e ajuda foram fundamentais para eu chegar até aqui.

Aos membros da banca examinadora, professor Fernando Borges e ao doutorando Carlos Eduardo, agradeço muito pelos ensinamentos, pelo carinho e por todas as contribuições dadas ao trabalho.

Aos meus professores do Instituto de Florestas, quero agradecer por toda paciência e dedicação, tenho muito orgulho de vocês. Em especial, ao professor João Vicente Latorraca, que foi muito solícito em ajudar na coleta do material para o estudo.

Agradeço a toda equipe do LPM, em especial, ao Mário que foi grande parceiro de trabalho, ao Paulo César, Tharles e Osmar pelas avaliações de usinagem. Vocês são incríveis!

Ao LBL, quero agradecer a toda equipe, em especial, ao professor Fernando Borges, à Larisse e a Junilha por toda ajuda nas análises químicas e pelas horas de trabalho cedidas ao meu estudo.

Agradeço às Donas do 206, Ana Luíza, Júlia, Lavínia, Letícia V., Leide, Mariana, Milene e Paloma, por todos os momentos compartilhados, pela amizade e irmandade, pelas sociais e por cada situação que superamos juntas, vocês se fizeram família.

Aos meus amigos e colegas de profissão, Carlos, Carol, Felipe, Gabriela M., Junilha e Marcos, agradeço muito por todas as horas de estudos, pelos lanches e por toda paciência nesses anos.

Agradeço aos meus amigos da vida, Gabriela F., Larissa, Letícia S. e Valéria S., por todo apoio, carinho e amizade nesses anos.

Amo todos vocês, obrigada!

RESUMO

As propriedades físicas da madeira, bem como as propriedades químicas e a sua trabalhabilidade são parâmetros importantes para identificar a qualidade e a melhor utilização de uma espécie. A partir disso, pode-se realizar uma produção e manejo mais sustentáveis ou buscar alternativas para substituir uma espécie por outra que tenha características físico-químicas semelhantes. Assim exposto, o presente trabalho buscou caracterizar os lenhos de alburno e cerne da madeira de Pau-brasil (*Paubrasilia echinata*), a partir da caracterização das propriedades físico-químicas e de sua trabalhabilidade através de testes de usinagem realizados em indivíduo proveniente do Campus da UFRRJ. Para determinar as propriedades físicas (coeficiente de anisotropia e as densidades aparente, básica e anidra), foram confeccionados 10 corpos de prova com dimensões de 5,0 x 3,0 x 2,0cm para cada tipo de lenho (cerne e alburno), seguindo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram confeccionados 10 corpos de provas de cada porção da madeira com dimensões de 36,0 x 6,0 x 2,5cm para os testes de usinagem (teste de plaina, teste de lixa, teste de furação para cavilha e dobradiça; teste de rasgo e fendilhamento por pregos), seguindo a norma ASTM D1666-11, adaptada pela metodologia descrita pelo IBAMA (1997). Para análise da composição química da madeira foram seguidas as normas TAPPI e a metodologia de Gomide e Demuner (1986) para determinar os teores de extrativos, cinzas, lignina insolúvel em ácido e lignina solúvel em ácido, respectivamente, e a holocelulose foi feita pelo método da diferença. De acordo com padrões estabelecidos para madeira de serraria, o lenho de alburno apresentou densidade média ($0,64\text{g/cm}^3$) e maior estabilidade segundo o coeficiente de anisotropia, o cerne por sua vez, apresentou madeira de alta densidade ($0,74\text{g/cm}^3$) e menor estabilidade, além de uma elevada quantidade de teor de extrativos no lenho do cerne (15,9%). Concluindo-se que de maneira geral a espécie apresentou, a partir das notas atribuídas nos testes de usinagem, resultados considerados de bons à regulares para seu uso industrial, porém, não se podem realizar trabalhos onde seja necessária a inserção de pregos nas peças.

Palavras-chave: relação cerne/alburno; propriedades físicas; propriedades químicas; usinagem; trabalhabilidade.

ABSTRACT

The physical, chemical properties and workability of the wood are important parameters for identifying the quality and best use of a species. Hence, a more sustainable production and management can be undertaken or it can be search alternatives to replace one species with another that has similar physicochemical characteristics. Thus exposed, the present work aimed to characterize the sapwood and heartwood of the wood of Pau-brasil (*Paubrasilia echinata*), from the characterization of the physical-chemical properties and workability through machining tests performed on an individual from Campus da UFRRJ. To determine the physical properties (anisotropy coefficient and bulk, basic and anhydrous densities), 10 specimens of 5,0 x 3,0 x 2,0cm were made for each type of wood (heartwood and sapwood), following the NBR 7190 standard (ABNT, 1997). Ten specimens were made from each portion of the wood with dimensions of 36,0 x 6,0 x 2,5cm for the machining tests (planer test, sandpaper test, drill test for dowel and hinge; tear test and nail cracking), following ASTM D1666-11, adapted by the methodology described by IBAMA (1997). The chemical composition of the wood followed by TAPPI standards and the methodology of Gomide and Demuner (1986) to determine the levels of extractives, ashes, acid insoluble and soluble lignin, respectively, and holocellulose content was calculated by the difference of the other substances. According to established standards for sawmill wood, the sapwood presented medium density ($0,64\text{g/cm}^3$) and greater stability according to the anisotropy coefficient. The heartwood presented high density wood ($0,74\text{g/cm}^3$) and lower stability as well as a high amount of extractives content in heartwood (15,9%). In conclusion, the species generally presented, based on the grades given in the machining tests, results considered good to regular for its industrial use, however, it is not possible to work where nails need to be inserted in the pieces.

Keywords: heartwood/sapwood ratio; physical properties; chemical properties; machining; workability.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE TABELAS..... | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 2 |
| 2.1. <i>Paubrasilia echinata</i> (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis..... | 2 |
| 2.2. Propriedades tecnológicas e qualidade da madeira | 3 |
| 2.2.1. Propriedades físicas da madeira..... | 4 |
| 2.2.2. Propriedades químicas da madeira..... | 5 |
| 2.2.3. Trabalhabilidade e usinagem da madeira..... | 7 |
| 2.3. Relação cerne/alburno..... | 8 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 9 |
| 3.1. Coleta e amostragem do material | 9 |
| 3.2. Propriedades físicas da madeira | 11 |
| 3.2.1. Densidade aparente | 12 |
| 3.2.2. Densidade básica..... | 13 |
| 3.2.3. Densidade anidra..... | 13 |
| 3.2.4. Coeficiente de anisotropia..... | 13 |
| 3.3. Usinagem da madeira..... | 14 |
| 3.3.1. Aplainamento (teste de plaina) | 16 |
| 3.3.2. Lixamento (teste de lixa) | 17 |
| 3.3.3. Furação | 18 |
| 3.3.4. Rasgo lateral..... | 19 |
| 3.3.5. Fendilhamento | 19 |
| 3.4. Caracterização química da madeira | 20 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 21 |
| 4.1. Propriedades físicas da madeira | 21 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2. | Usinagem da madeira..... | 24 |
| 4.2.1. | Aplainamento (teste de plaina) | 24 |
| 4.2.2. | Lixamento (teste de lixa) | 25 |
| 4.2.3. | Furação | 25 |
| 4.2.4. | Rasgo lateral | 27 |
| 4.2.5. | Fendilhamento | 27 |
| 4.3. | Caracterização química da madeira..... | 28 |
| 5. | CONCLUSÕES | 29 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 29 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Notas aplicadas na classificação da avaliação dos defeitos..... | 16 |
| Tabela 2. Normas empregadas para a realização das análises químicas..... | 20 |
| Tabela 3. Valores encontrados para a caracterização das propriedades físicas da madeira de <i>Paubrasilia echinata</i> | 21 |
| Tabela 4. Valores das matrizes de correlação de Pearson e de p-valores entre as variáveis densidade básica e coeficiente de anisotropia. | 23 |
| Tabela 5. Referência da análise de coeficiente de anisotropia (CA) para madeira. | 23 |
| Tabela 6. Avaliação relacionada a diferentes tipos de defeitos quanto à grã arrancada, grã felpuda e marcas de cavaco. | 24 |
| Tabela 7. Avaliação realizada em lixadeira de esteira, classificação em relação à superfície. | 25 |
| Tabela 8. Avaliação do teste de furação para cavilhas realizadas com furadeira vertical de coluna equipada com brocas helicoidais. | 26 |
| Tabela 9. Avaliação do teste de furação para dobradiça realizado com furadeira vertical de coluna equipada com broca chata. | 26 |
| Tabela 10. Resultados da avaliação do teste de rasgo realizado pela furadeira horizontal. | 27 |
| Tabela 11. Resultados obtidos para o teste de fendilhamento. | 27 |
| Tabela 12. Análises químicas realizadas com a madeira de alburno e cerne da espécie <i>Paubrasilia echinata</i> | 28 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Exemplar de <i>Paubrasilia echinata</i> (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis..... | 3 |
| Figura 2. Local de coleta do material. | 10 |
| Figura 3. Serra de fita horizontal e prancha de pau-brasil. | 10 |
| Figura 4. Dimensões dos corpos de prova de propriedades físicas. | 11 |
| Figura 5. Equipamentos utilizados para medição das dimensões dos corpos de prova. | 12 |
| Figura 6. Dimensões dos corpos de prova de usinagem. | 15 |
| Figura 7. Representação dos ensaios de usinagem. | 16 |
| Figura 8. Corpo-de-prova em operação de aplainamento. | 17 |
| Figura 9. Esquema dos cortes de desempenho em oposição e concordância. | 17 |
| Figura 10. Lixadeira. | 18 |
| Figura 11. Furadeira vertical utilizada para realizar os furos de cavilha e dobradiça. | 18 |
| Figura 12. Furadeira horizontal e ilustração da superfície do rasgo. | 19 |
| Figura 13. Teste de fendilhamento realizado com martelos e pregos. | 20 |
| Figura 14. Distribuição da densidade básica e do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova de alburno. | 22 |
| Figura 15. Distribuição da densidade básica e do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova de cerne. | 22 |

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, sólido, poroso, heterogêneo e anisotrópico, constituído de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, tornando-a desejável ou não para diversos tipos de usos. Enquanto matéria prima, a madeira necessita ter uniformidade de cor, densidade básica, resistência mecânica e trabalhabilidade, para que assim seja utilizada na indústria (BURGER e RICHTER, 1991; BATISTA et al., 2010; CARVALHO et al., 2010).

Paubrasilia echinata é uma espécie da família Fabaceae, nativa e endêmica das florestas ombrófilas e estacionais da Mata Atlântica. O Pau-brasil possui madeira densa, seiva de cor avermelhada e devido à sua exploração predatória, se deparou com a ameaça de extinção, onde a população foi extremamente reduzida. Assim, uma alternativa para amortizar esse impacto foi o desenvolvimento de corantes sintéticos (GAGNON et al., 2016; CARVALHO et al., 2018; MACEDO et al., 2018; FORMIGA, 2019).

Em 1785, o Pau-brasil foi denominado por Lamarck como *Caesalpinia echinata*. A partir de estudos realizados por taxonomistas do Canadá, Suíça, Reino Unido e Brasil, concluíram que a espécie pertence a um gênero botânico peculiar, sendo rebatizado para *Paubrasilia echinata* em 2016. Conhecido também como pau-de-pernambuco, ibirapitanga ou brasileto, o batismo do nome “Brasil” foi dado pelas cortes europeias em referência ao corante vermelho como brasa, cujo qual se tornou o primeiro produto a ser explorado pelos portugueses, sendo a primeira atividade econômica do agronegócio brasileiro (CNCFLORA, 2012; SANTOS, 2016; CARVALHO et al., 2018; FORMIGA, 2019).

Atualmente, existe uma grande demanda pela madeira de Pau-brasil com origem legal, sendo considerada como a melhor para produção de arcos de violino, tendo em vista que seus extrativos influenciam de maneira positiva as propriedades vibratórias do arco (MATSUNUGA et al., 1996; Carvalho et al., 2018). Mesmo assim, esse tipo de atividade comercial é de pequeno interesse para o agronegócio brasileiro, que conta somente com uma demanda de 200 m³ de madeira/ano. Contudo, as alternativas de comercialização para a madeira de *Paubrasilia echinata*, não foram suficientes para evitar que a árvore mais simbólica do Brasil fosse reconhecida pelo Instituto Nacional do Meio Ambiente (IBAMA) como uma espécie com risco de extinção (FORMIGA, 2019). Apesar disso, o Pau-brasil ainda é uma espécie bastante utilizada em projetos de recuperação florestal nas cidades, principalmente por ser considerada uma árvore-símbolo do reflorestamento (SILVA et al., 2013).

As madeiras utilizadas nos primórdios das civilizações eram obtidas através das árvores oriundas das florestas naturais, que apresentavam propriedades tecnológicas de excelente qualidade (VIDAURRE et al., 2011). As propriedades físicas da madeira, bem como as propriedades químicas e a sua trabalhabilidade são parâmetros importantes para identificar a qualidade e a melhor utilização de uma espécie. A partir disso, pode-se realizar uma produção e manejo mais sustentáveis ou buscar alternativas para substituir uma espécie por outra que tenha características físico-químicas semelhantes.

Assim exposto, o presente trabalho buscou caracterizar os lenhos de alburno e cerne da madeira de Pau-brasil (*Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis), a partir da determinação das propriedades físico-químicas e de sua trabalhabilidade através de testes de usinagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis

Paubrasilia echinata é uma espécie de porte arbóreo da família Fabaceae, endêmica do Brasil e está dispersa entre os estados do Rio Grande do Norte e Rio de Janeiro nas florestas ombrófilas e estacionais da Mata Atlântica. Possui seiva de cor vermelha, madeira densa, e devido sua exploração inadequada, se encontra ameaçada de extinção (GAGNON et al., 2016; CARVALHO et al., 2018; MACEDO et al., 2018).

Em 1785, o Pau-brasil foi denominado por Lamarck como *Caesalpinia echinata*. A partir de estudos realizados por taxonomistas do Canadá, Suíça, Reino Unido e Brasil, onde foi analisado o DNA de dezenas do gênero, concluindo-se que o Pau-brasil pertence a um gênero botânico peculiar, sendo rebatizado para *Paubrasilia echinata* em 2016 (SANTOS, 2016; FORMIGA, 2019).

O Pau-brasil apresenta como característica morfológica fenotípica em sua fase adulta folhas compostas bipinadas, com 5-6 pares de pinas, folíolos em número de 6-10 pares por pina (LORENZI, 2000). Os tamanhos das folhas podem mudar de acordo com suas três variantes morfológicas: folha-miúda, folha-de-café e folha-de-laranja. O tronco tem a presença de acúleos, com os formatos reto e longo (com mais 15 m de altura), quando presente no interior de uma floresta natural ou curto e tortuoso, quando plantado isoladamente e exposto a pleno sol. Possui ramificação irregular, com copa ampla e aberta, sua folhagem é verde-escuro brilhante. A casca exibe uma coloração pardo-acinzentada nos locais onde descamou e sua parte interna é vermelho-escuro (CARVALHO, 2003).

Em relação as suas características morfológicas reprodutivas, possui fruto do tipo seco, legume capsulado, com coloração pardo-avermelhada e coberto de múltiplas cerdas. A semente por sua vez é elíptica, lisa, chata, de contorno irregular, medindo cerca de 17mm de comprimento por 15mm de largura, de coloração castanha, com pontuações de diferentes tonalidades. Ressalta-se que as raízes de Pau-brasil não se associam com a bactéria fixadora de nitrogênio, *Rhizobium* (CARVALHO, 2003).

O Pau-brasil é conhecido também como Pau-de-pernambuco, Ibirapitanga ou Brasileto. O batismo do nome “Brasil” foi dado pelas cortes europeias em referência ao corante vermelho como brasa, cujo qual se tornou o primeiro produto a ser explorado pelos portugueses no país, sendo a primeira atividade econômica do agronegócio brasileiro. Devido à exploração predatória desse recurso natural, que em teoria seria renovável, o Pau-brasil se deparou com a ameaça de extinção, onde a população foi extremamente reduzida. Assim, uma alternativa para amortizar esse impacto foi o desenvolvimento de corantes sintéticos (CNCFLORA, 2012; CARVALHO et al., 2018; FORMIGA, 2019).

Existe uma grande demanda pela madeira de Pau-brasil com origem legal (Carvalho et al., 2018). Atualmente, a espécie é considerada como a melhor para produção de arcos de violino, tendo em vista que seus extrativos influenciam de maneira positiva as propriedades vibratórias do arco (MATSUNUGA et al., 1996).

Segundo Marques et al. (2012), a densidade é uma propriedade importante para definir qual madeira será utilizada na fabricação de arcos, de acordo com essa característica será estabelecido o uso específico para a confecção de arco para violino, violoncelo ou contrabaixo.

Esse tipo de atividade comercial é de pequeno interesse para o agronegócio brasileiro, que conta somente com uma demanda de 200m³ de madeira/ano. Contudo, as alternativas de comercialização para a madeira de *Paubrasilia echinata* não foram suficientes para evitar que a árvore mais simbólica do Brasil fosse reconhecida pelo IBAMA como uma espécie com

risco de extinção (FORMIGA, 2019). Apesar disso, o Pau-brasil (Figura 1) ainda é uma espécie bastante utilizada em projetos de recuperação florestal nas cidades, principalmente por ser considerada uma árvore-símbolo do reflorestamento (SILVA et al., 2013).



Figura 1. Exemplar de *Paubrasilia echinata* (Lam.) E. Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis. (A) Floração da espécie (H.C. Lima, Brasil, Lima et al. 2705 (RB)); (B) frutos (G. P. Lewis); (C) acúleos presentes no tronco jovem (E. Gagnon, Bahia, Brasil, Lima et al. (RB)); (D) árvore plantada individualmente (L. P. de Queiroz, Bahia,); (E) árvore em floresta natural (E. Gagnon, Bahia, Brasil, Lima et al. 7894 (RB)); (F) corte na seção transversal do tronco, mostrando cerne vermelho escuro (E. Gagnon, Espírito Santo, Brasil, unvouchered); (G) inflorescência (L. P. de Queiroz, Bahia, Brasil, unvouchered).
Fonte: Research Gate, uploaded by Edeline Gagnon.

2.2. Propriedades tecnológicas e qualidade da madeira

Carvalho et al. (2018), afirmam que uma espécie florestal é caracterizada em relação às suas propriedades tecnológicas (anatômicas, energéticas, físicas, químicas e mecânicas) a partir de avaliações da qualidade da madeira, determinando-se seu comportamento e potencial de uso como matéria prima.

As madeiras utilizadas nos primórdios das civilizações eram obtidas através das árvores oriundas das florestas naturais, que apresentavam propriedades tecnológicas de

excelente qualidade. Com o passar dos anos, as árvores deixaram de ter diâmetros grandes, levando ao início de produções com manejos estratégicos, onde se iniciou o uso de espécies com rápido crescimento e os ciclos de cortes se tornaram mais curtos (VIDAURRE et al., 2011).

Os processos tecnológicos utilizados na fabricação de produtos madeireiros são exigentes em relação à espécie, tamanho e qualidade da matéria-prima, uma vez que estes foram desenvolvidos em países que possuem grandes reservas de povoamentos florestais homogêneos. No Brasil, ainda existem poucos estudos inerentes à utilização de madeiras nativas, o que seu uso problemático em muitas das vezes, promovendo também uma qualidade variável dos produtos (NAKAMURA & FILHO, 1982; NUNES et al., 1999).

Grande parte das espécies nativas apresentam características fundamentais para adaptação ao ambiente e potencial para múltiplos usos, mas para isso, é necessário que haja conhecimento sobre suas propriedades tecnológicas (GOULART et al., 2012). A qualidade da madeira é diferente entre árvores jovens e mais velhas, sendo assim, a mesma espécie pode ter diferentes utilizações em função da idade de sua colheita (CARVALHO et al., 2018).

Gonçalves et al. (2009), afirmam que a madeira é um elemento orgânico, heterogêneo e composto por celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, apresentando uma enorme versatilidade de usos. O crescimento de sua utilização como matéria-prima, só poderá ocorrer através de estudos sobre suas propriedades físicas e químicas.

2.2.1. Propriedades físicas da madeira

O estudo das propriedades físicas da madeira é importante para determinar o uso correto de uma espécie e assim gerar produtos de maior valor agregado. A densidade é a propriedade mais utilizada devido à facilidade de ser determinada e por ter uma correlação direta com a composição celular (BATISTA et al., 2010; MÜLLER et al., 2014).

Segundo Araújo (2007), a massa específica (ou densidade) é expressa pelo quociente entre a massa e o volume, e a instabilidade dimensional é representada pela variação das dimensões (linear e volumétrica) em função do teor de umidade.

Na busca por caracterizar uma madeira, determinar sua densidade, bem como as variações existentes no sentido radial, tangencial e longitudinal, é essencial para entender seu comportamento e como isso influencia na qualidade (OLIVEIRA et al., 2005).

A densidade básica é a propriedade física mais relevante, pois se relaciona de forma direta com outras propriedades físicas da madeira, como a anisotropia. Aspectos anatômicos influenciam na densidade, que por sua vez exerce influência na anisotropia e esses parâmetros norteiam os usos e os tipos de produtos a serem gerados a partir de cada espécie (BATISTA et al., 2010).

De acordo com Lopes e Garcia (2002), a densidade básica da madeira é definida pela relação entre seu peso absolutamente seco e seu volume saturado (umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras – PSF) e expresso em g.cm⁻³.

A densidade aparente pode ser medida relacionando o volume e massa da madeira em 12% de umidade, enquanto a densidade básica é medida com a madeira após secagem em estufa (CARVALHO et al., 2010).

Em um estudo realizado por Dias (2000), comprova-se que a densidade aparente corresponde à densidade medida a certo conteúdo de umidade. Nas condições de uma atmosfera com 20°C de temperatura e uma umidade relativa de 65%, a umidade de equilíbrio para a madeira é 12%, sendo este o valor de referência adotado pela NBR 7190/1997.

A densidade anidra é expressa em peso e volume absolutamente seco. Atualmente, as indústrias do setor madeireiro tem interesse em consumos específicos e dados com uma base

constante, como o peso seco da madeira. Esse interesse pode ser explicado pelo fato da base constante (peso seco) não sofrer variação com o teor de umidade e os balanços mássicos, fazendo com que os cálculos de rendimentos sejam usados com sucesso nos processos de industrialização (FOELKEL, 2015).

A densidade básica é uma propriedade física da madeira que se relaciona diretamente com outras, como a anisotropia (BATISTA et al., 2010), que pode ser determinada através da razão entre as retrações tangencial e radial, chamada de coeficiente de anisotropia.

A madeira possui, entre seus atributos físicos, o comportamento chamado de anisotropia, onde o material sofre inchamento e contração desigual em seus sentidos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal). Devido ao fenômeno da anisotropia, ocorre o desenvolvimento de defeitos na madeira durante a fase de secagem ou de seu acondicionamento, tais como rachaduras, torções, empenamentos e abaulamentos (MORESCHI, 2012).

As variáveis “coeficiente de anisotropia” e “variação volumétrica” são responsáveis por indicar o comportamento da madeira a partir do ganho ou perda de água, tanto quando a umidade do ar se eleva ou diminui, ou quando a madeira entra em contato direto com a água. Tais variáveis também podem compreender as características relacionadas à estabilidade da madeira, evitando-se que madeiras de menor estabilidade dimensional sejam utilizadas de maneira inadequada (CARVALHO et al., 2018).

Segundo Moreschi (2012), o fator ideal de anisotropia de um material seria igual a 1, o que indicaria inexistência de alteração nas suas dimensões ou que as alterações nos seus diferentes sentidos anatômicos seriam iguais, no entanto, isto não pode ser observado para a madeira. Na madeira, quanto maior o desvio entre as variações dimensionais nos sentidos anatômicos radial e tangencial, maior será o fator de anisotropia e, conseqüentemente, pior será o seu comportamento durante a secagem ou durante a aquisição de umidade.

2.2.2. Propriedades químicas da madeira

A composição química do material lenhoso exerce grande influência no processo de beneficiamento da madeira e, o teor de cada constituinte sofre grande influência do ambiente (ZANUNCIO et al., 2013). A madeira é majoritariamente um material orgânico, composto basicamente por carbono, hidrogênio e oxigênio, possuindo uma parte inorgânica muito pequena (0,2-0,5%), mas extremamente variada, constituída de alumínio, cálcio, cobre, ferro, manganês, magnésio, potássio, sódio e zinco, além dos cátions que estão associados a ânions, como os carbonatos, cloretos, fosfatos, nitratos, oxalatos, silicatos e sulfatos (COLODETTE, et al., 2005).

No Brasil, normalmente são determinados a densidade básica da madeira, o teor de lignina Klason, insolúvel e solúvel, e o teor de extrativos solúveis em uma mistura álcool e tolueno ou, mais recentemente, em acetona. Essas análises poderiam ser consideradas como caracterização básica da madeira, compreendendo um mínimo necessário de informações para uma caracterização preliminar de qualidade da madeira (SILVÉRIO et al., 2006; GOMIDE et al., 2010).

Em relação à composição química, Sixta (2006) descreve a madeira como sendo um material orgânico composto principalmente por carbono, oxigênio e hidrogênio. Esses elementos formam macromoléculas, ou seja, polímeros que representam os principais compostos da parede celular, tais como celulose, hemiceluloses e lignina. Outros constituintes de menor peso molecular, como os extrativos e as substâncias inorgânicas (cinzas) podem ser encontrados na parede celular, e esta composição difere entre espécies folhosas e coníferas.

Numa outra definição de Farinas (2011), a estrutura da parede celular vegetal consiste em uma mistura de polissacarídeos (celulose e hemiceluloses), proteínas, lignina, compostos fenólicos e sais minerais.

Todas as madeiras são compostas de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e de um pequeno teor de minerais (cinzas) em quantidades distintas e variáveis. Esta composição faz com que as características essenciais de cada espécie tenham uma relação estreita com a composição química, a qual exerce influência sobre suas propriedades físico-mecânicas (COLDEBELLA, 2016).

De acordo com Colodette et al. (2015), as substâncias estruturais e principais constituintes químicos da madeira são os polímeros: celulose, hemiceluloses e ligninas. As substâncias poliméricas, que aparecem em menores quantidades, são: amido, proteínas e substâncias pécnicas, além disso, encontram-se os extrativos. Esses vários componentes se agrupam em: carboidratos, substâncias fenólicas, terpenos, proteínas, hidrocarbonetos, etc. Todavia, o peso da madeira tem maior representação (95%) dos carboidratos, celulose e hemiceluloses em especial.

A celulose compõe 40% a 50% de todas as plantas, sendo considerada o principal componente da madeira. Conceituada como polissacarídeo que se apresenta a partir de um polímero de cadeia linear com comprimento suficiente para ser insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e bases diluídas à temperatura ambiente, se consiste exclusivamente em unidades de β -D-anidroglicopiranosose unidas por ligações dos carbonos (1-4) e possui estrutura organizada e parcialmente cristalina. As microfibrilas de celulose estão embebidas numa matriz composta de hemiceluloses e lignina (FENGEL e WEGENER, 1989; KLOCK et al., 2005; COLODETTE et al., 2015).

As hemiceluloses são definidas como polissacarídeos de baixo peso molecular que se apresentam a partir de polímeros formados por diferentes tipos de açúcares e ácidos ligados por condensação, formando estruturas ramificadas e amorfas. Por não possuir cadeias cristalinas, torna-se bastante reativa aos produtos químicos e representam uma parte da madeira onde seus produtos são extraíveis por álcali. As hemiceluloses estão em estreita associação com a celulose na parede celular, constituindo-se por hexoses (açúcares neutro): glucose, manose e galactose e as pentoses: xilose e arabinose, algumas vezes podem conter adicionalmente os ácidos urônicos. Além disso, formam um revestimento nas microfibrilas de celulose e assim, a lignina consegue se conectar às microfibrilas através de poucas ligações covalentes. (GORING, 1977; FENGEL e WEGENER, 1989; KLOCK et al., 2005; COLODETTE et al., 2015).

A holocelulose é a combinação da celulose com as hemiceluloses. A diferença entre as hemiceluloses e a celulose se dá pelo fato de que as hemiceluloses possuem unidades de açúcares diferentes de cinco ou seis átomos de carbono, e as celulosas por sua vez, são compostas de glicopiranoses (SANTOS et al., 2001).

As ligninas, “lignum” do latim, que significa madeira, fazem parte do grupo das substâncias aromáticas, sendo o terceiro componente mais expressivo, representando cerca de 20-30% do peso. São caracterizadas pela presença de grupos hidroxílicos fenólicos, insolúveis em solvente comuns, necessitando de hidrólise alcalina ou ácida na madeira para sua remoção. As coníferas possuem maior teor de lignina do que as folhosas, e existem diferenças estruturais entre a lignina encontrada em cada grupo. Morfologicamente, a lignina é uma substância amorfa que se localiza na lamela média composta, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente da parede que interpenetra as fibrilas, e assim, fortalece e aumenta a rigidez das paredes celulares, reduz a permeabilidade da madeira e protege o material contra os agentes xilófagos, devido à sua natureza fenólica (KLOCK et al., 2005; COLODETTE et al., 2015).

Estudos sobre os extrativos tem sido de alta relevância para descobrir e caracterizar novas estruturas químicas-orgânicas, classificação taxonômica de espécies, processos de crescimento da árvore, obtenção de novos produtos e subprodutos de valor comercial, e a determinação dos problemas quanto aos usos da madeira (KLOCK et al., 2005).

Segundo Gomide e Colodette (2007), os extrativos são componentes não estruturais, possuem baixo ou médio peso molecular e não pertencem às paredes celulares. Contudo, algumas madeiras apresentam extrativo com alto peso molecular (tanino) e existem espécies (sequoias) que possuem todos os extrativos dentro da parede celular. Em geral, são representados pelas graxas, óleos essenciais, pigmentos, resinas e taninos (MORAIS et al., 2005).

Na definição de Klock et al. (2005), os extrativos são componentes da madeira oriundos das modificações sofridas pelos carboidratos durante o processo fisiológico da árvore, representando uma fração pequena da madeira (3-10% em geral). São substâncias facilmente solúveis em solventes orgânicos neutros ou água e, fornecem algumas características da madeira como: cor, cheiro, resistência ao apodrecimento natural, gosto e propriedades abrasivas. Sua composição e quantidade dependem de diversos fatores, como espécie, idade e região de origem. A região do cerne apresenta a maior quantidade de extrativos, por isso tem maior resistência ao ataque de agentes degradadores da madeira. Os extrativos podem ocorrer na casca, folhas e acículas, flores, frutos e sementes e quase sempre as quantidades nessas partes da árvore são proporcionalmente maiores que na madeira.

As cinzas, por sua vez, representam a porcentagem de componentes minerais (substâncias inorgânicas) contidos na madeira através de agregação pela seiva bruta ao longo de sua vida ou por contaminação superficial durante os processos de colheita, transporte e manuseio. As cinzas se classificam como um resíduo sólido mineral que se origina após a combustão completa da biomassa (BRAND, 2007; FOELKEL, 2011).

A pesquisa realizada por Rodrigues et al. (2009), informa que as cinzas são constituídas basicamente por sulfatos, oxalatos, carbonatos e silicatos; tendo como contrações mais comuns cálcio, potássio, magnésio e manganês. Já Moulin et al. (2015), comentaram em seu estudo que o menor teor de materiais inorgânicos é desejável para o setor de energia, uma vez que as cinzas podem formar incrustações e corrosão dos equipamentos, prejudicando os processos de produção com esse matéria prima.

2.2.3. Trabalhabilidade e usinagem da madeira

A madeira é um material orgânico, sólido, com composição complexa, contida de constituintes químicos como celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, tornando-a desejável ou não para diversos tipos de usos (Burger e Richter, 1991).

Enquanto matéria prima, deseja-se que a madeira tenha uniformidade de cor, densidade básica, resistência mecânica e trabalhabilidade, para que assim seja utilizada na indústria. No entanto, por se tratar de um material heterogêneo e anisotrópico, o atendimento de todas essas características desejáveis se torna difícil. Além disso, esses fatores precisam ser considerados em processos de usinagem e beneficiamento, comumente chamados de “aparelhamento”, sendo necessário que haja entendimento sobre a maneira correta de se usar cada espécie, pois essa prática influencia economicamente a produção, reduzindo as perdas, a necessidade de se realizar mais de uma etapa de usinagem e ainda melhora o acabamento superficial da madeira, aumentando seu valor agregado (BATISTA et al., 2010; CARVALHO et al., 2010).

Segundo Burger e Richter (1991), a usinagem pode ser definida como a facilidade em se processar a madeira com auxílio de equipamento e máquinas específicas, tendo como finalidade de cortar o material, produzir variadas formas e superfícies e, obter qualidade satisfatória nos acabamentos dos produtos de maneira mais econômica. Carvalho et al. (2018), afirmam que os testes de usinagem e trabalhabilidade geram resultados que demonstram a facilidade do processamento da madeira, a necessidade de utilização de equipamentos específicos para uma determinada espécie e adequam a madeira ao seu destino final.

“A usinagem da madeira corresponde ao seu comportamento frente a operações de processamento mecânico primário, secundário e terciário. Na produção de móveis de madeira as operações de usinagem são muito importantes e realizadas em inúmeras etapas de processamento e transformação da madeira em produtos acabados. De maneira a maximizar a obtenção de produtos de maior valor agregado para a indústria moveleira, essas operações devem ser continuamente monitoradas e avaliadas” (SILVA et al., 2015).

Atualmente, as avaliações de usinagem, trabalhabilidade e operações relacionadas ao acabamento superficial da madeira nem sempre têm sido consideradas nos estudos de qualidade desse material. A análise do seu comportamento ao longo do processamento é de suma importância, pois traz informações sobre a adequação de um determinado material genético e de como será sua utilização ou produto específico (CARVALHO et al. 2018).

A qualidade final e os baixos rendimentos na transformação da madeira em produtos acabados são decorrentes da ineficácia dos setores de secagem, usinagem e acabamentos superficiais. Os principais defeitos no processo de usinagem da madeira são: as variações das propriedades da madeira, condições das máquinas, ferramentas de corte, treinamento do operador e a regulação correta das máquinas (SILVA et al., 2002). Por esta razão, é necessário que os ensaios de usinagem da madeira sejam avaliados constantemente.

2.3. Relação cerne/alburno

As madeiras possuem características que são afetadas diretamente pelo ambiente onde estão inseridas, sendo estas: relação cerne/alburno; relação entre lenhos inicial e tardio; teores de extrativos, madeira juvenil e lignina; tipos de lignina; proporção de elementos de vaso ou células parenquimáticas; espessura da parede celular; diâmetro das fibras (FOELKEL, 2015). Ocorrem diferenças significativas cerne e alburno, madeira de início e madeira de fim de estação de crescimento, e até mesmo entre células individuais (TRUGILHO e SILVA, 2003).

Segundo Nogueira e Ballarin (2008), a diferenciação no lenho é a presença da medula na parte central do tronco das árvores. Para os plantios comerciais, é importante que haja o estudo de outras diferenciações no lenho como, as regiões de cerne e alburno, bem como as de madeira juvenil e adulta. Ponce e Watai (1985) apontaram a importância das composições das microestruturas (proporção e tipos de células) e macroestruturas (alburno, cerne e medula) da madeira.

A proporção de alburno e cerne pode variar dentro da própria espécie, idade, sítio, solo e clima (BURGER & RICHTER, 1991). O alburno é a parte do lenho fisiologicamente ativa e a parte com células mortas denomina-se cerne. No alburno são encontrados os açúcares, alguns constituintes da seiva e as substâncias de reserva como as graxas e amidos. O cerne, por sua vez, possui os materiais fenólicos tais como as ligninas, os flavanóides, fenóis simples e polifenóis, também apresenta terpenos e terpenóides (NOGUEIRA E BALLARIN, 2008; RODRIGUES et at., 2019).

Na definição de Costa et al. (2003), o autor informa que o alburno é composto por células funcionais com a função de conduzir a água e solutos nela dissolvidos de forma ascendente. O alburno apresenta geralmente uma coloração mais clara e, quando se tornam

inativas para o transporte, passam a fazer parte do cerne, que por sua vez, pode conter óleos, resinas, gomas e/ou compostos fenólicos (responsáveis pela coloração mais escura).

O processo de cernificação é responsável por transformar o alburno para cerne durante o ciclo de vida de uma árvore. Enquanto uma nova camada de alburno é formada na parte mais externa do tronco (próximas ao câmbio), uma camada mais antiga sofrerá morte das células do parênquima radial, aumentando a sua quantidade de extrativos, tiloses, o consumo de oxigênio e liberação de CO₂, assim, é transformada em cerne a cada ano. Algumas espécies apresentam essa transição de alburno para cerne visualmente, onde a deposição de extrativos faz com que essa região se torne mais escura, podendo trazer também uma maior durabilidade da madeira contra insetos ou fungos biodegradadores (NOGUEIRA E BALLARIN, 2008).

Existem muitas diferenças marcantes entre cerne e alburno em relação às suas composições químicas, físicas e morfológicas, e podem influenciar a maneira de utilização de uma madeira, além de gerar produtos distintos. As mais importantes são: 1) o alburno apresenta maior quantidade de amido e menos compostos fenólicos e ácidos do que o cerne; 2) a lignina presente no cerne é mais condensada e apresenta maior peso molecular; 3) o alburno possui maior teor de umidade devido à sua atividade fisiológica ativa; 4) o cerne é mais denso, possui tecido mais compacto em geral e por isso menos permeável (BURGER & RICHTER, 1991; SILVA e TRUGILHO, 2003).

Em geral, a madeira que apresenta grande quantidade de cerne é extremamente desejável para produzir móveis ou ser utilizada em construções, pois tem maior proporção de madeira adulta. Sua coloração e propriedades específicas tem alto valor tecnológico para usos em serraria e, por isso, existe ampla demanda de madeiras com essa característica (SILVA, 2002; PEREIRA et al., 2013).

Silva & Trugilho (2003), científicaram que as características distintas entre cerne e alburno do ponto de vista químico, físico e morfológico, fazem com que estas partes se comportem de maneira muito diferente uma da outra, e do ponto de vista da degradação térmica, pode-se esperar que também se comportem distintamente, uma vez que suas composições químicas são variáveis. O autor acrescentou em seu trabalho que existem muitos estudos sobre a decomposição térmica dos materiais celulósicos, mas existe carência em pesquisas que avaliem a variação dimensional sofrida pela madeira de cerne e alburno em altas temperaturas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e amostragem do material

A coleta do material de estudo foi realizada no Pavilhão Central da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, campus Seropédica – RJ (Figura 2). A espécie arbórea coletada foi a *Paubrasilia echinata* de um indivíduo com aproximadamente 70 anos de idade, que teve queda acidental proporcionada por uma intempérie ambiental severa, com chuvas e ventos fortes em fevereiro de 2019.



Figura 2. Local de coleta do material.
Fonte: Google Earth.

Os toretes da árvore de Pau-brasil foram encaminhados à serraria do Departamento de Produtos Florestais no Instituto de Florestas (UFRRJ), onde passaram pelo desdobro primário e produziram-se pranchas diametrais com espessura de 2,7 cm utilizando a serra de fita horizontal (Figura 3). A seguir, as pranchas foram submetidas à secagem ao ar livre, em ambiente coberto, até atingirem a condição de umidade de equilíbrio com o ambiente (aproximadamente 12% de umidade).



Figura 3. Serra de fita horizontal e prancha de pau-brasil.
Fonte: Arquivo pessoal.

Posteriormente, as pranchas foram encaminhadas para o Laboratório de Processamento Mecânico de Madeiras (LPM) onde foi realizada a confecção dos corpos de prova de densidade e usinagem.

3.2. Propriedades físicas da madeira

Foram confeccionados 10 corpos de prova da porção do alburno da madeira e 10 corpos de prova da porção do cerne separadamente, todos com dimensões de 5,0 x 3,0 x 2,0cm de acordo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), “Projetos de estrutura de madeira - Anexo B” (Figura 4).



Figura 4. Dimensões dos corpos de prova de propriedades físicas.

Fonte: Arquivo pessoal.

As densidades aparente, básica e anidra, bem como o coeficiente de anisotropia, foram calculados a partir das dimensões e do peso dos corpos de prova nos sentidos radial, tangencial e longitudinal, utilizando um paquímetro digital, a balança digital e estufa com circulação forçada de ar (Figura 5).



Figura 5. Equipamentos utilizados para medição das dimensões dos corpos de prova.
Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.1. Densidade aparente

Para determinar a densidade aparente foram medidas as dimensões e os pesos dos corpos de prova em umidade de equilíbrio (12%). Os corpos de prova foram medidos nas direções tangenciais, radiais e longitudinais, de acordo com os anéis de crescimento, para obtenção do volume e pesados na balança digital.

De posse do volume e do peso em umidade de equilíbrio, foi possível determinar a densidade aparente de acordo com a equação 1:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{UE}}{v_{UE}} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

m_{UE} = massa do corpo de prova em umidade de equilíbrio (g);

v_{UE} = volume do corpo de prova em umidade de equilíbrio (cm³).

3.2.2. Densidade básica

Na determinação da densidade básica, as amostras foram imersas em água até que fosse atingido o estado de saturação, ou seja, todos os espaços vazios presentes na madeira foram preenchidos. As dimensões (volume) e o peso em estado de saturação foram medidos, em seguida os corpos de prova foram levados à estufa sob temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até obterem massa e volume secos constantes (NBR 7190 - ABNT, 1997).

De posse do volume saturado e da massa seca, foi possível determinar a densidade e básica de acordo com a equação 2:

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_{\text{seca}}}{v_{\text{sat}}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2)$$

Onde:

ρ_{bas} = densidade básica (g/cm^3);

m_{seca} = massa seca do corpo de prova (g);

v_{sat} = volume do corpo de prova saturado (cm^3).

3.2.3. Densidade anidra

De posse do volume e do peso secos, foi possível determinar a densidade anidra de acordo com a equação 3:

$$\rho_{\text{anidra}} = \frac{m_{\text{seca}}}{v_{\text{seco}}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (3)$$

Onde:

ρ_{bas} = densidade anidra (g/cm^3);

m_{seca} = massa seca do corpo de prova (g);

v_{seco} = volume do corpo de prova seco (cm^3).

3.2.4. Coeficiente de anisotropia

O coeficiente de anisotropia é definido pela razão entre a contração tangencial e a radial (T/R), portanto inicialmente foi calculada a deformação específica de retração de cada direção por corpo de prova, no sentido tangencial, segundo a equação 4, e posteriormente no sentido radial segundo a equação 5:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{L_{sat} - L_{seca}}{L_{seca}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

ε_t = deformação específica da retração tangencial;

L_{sat} = dimensão tangencial do corpo de prova saturado (cm);

L_{seca} = dimensão tangencial do corpo de prova seco (cm).

$$\varepsilon_r = \left(\frac{L_{sat} - L_{seca}}{L_{seca}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

ε_r = deformação específica de retração radial;

L_{sat} = dimensão radial do corpo de prova saturado (cm);

L_{seca} = dimensão radial do corpo de prova seco (cm).

Em seguida foi calculada a relação T/R para a determinação do coeficiente de anisotropia, com isso obtendo-se o valor desejado, segundo a equação 6.

$$CA = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r} \quad (6)$$

Onde:

CA = coeficiente de anisotropia;

ε_t = deformação específica de retração tangencial;

ε_r = deformação específica de retração radial.

Os dados foram processados no software Excel com o auxílio do complemento Action Stat 3.6, onde realizaram-se as estatísticas descritivas, utilizando a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação como parâmetro para correlacionar as densidades e coeficiente de anisotropia com a qualidade da madeira de Paubrasilia echinata.

3.3. Usinagem da madeira

Os corpos de prova foram confeccionados no LPM com dimensões de 36 x 6,0 x 2,5cm (Figura 6), levados até a estufa de circulação forçada de ar por um período de 24 horas à 55°C. A partir disso, os testes foram realizados e cada corpo de prova passou por uma avaliação visual baseada na sensibilidade do observador, onde os defeitos ou a inexistência

deles nas peças são comparados com imagens fotográficas que seguem a metodologia descrita pelo IBAMA (1997), a qual se refere a uma adaptação da norma ASTM D1666-11 “Standard Test Methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-Base Materials”.

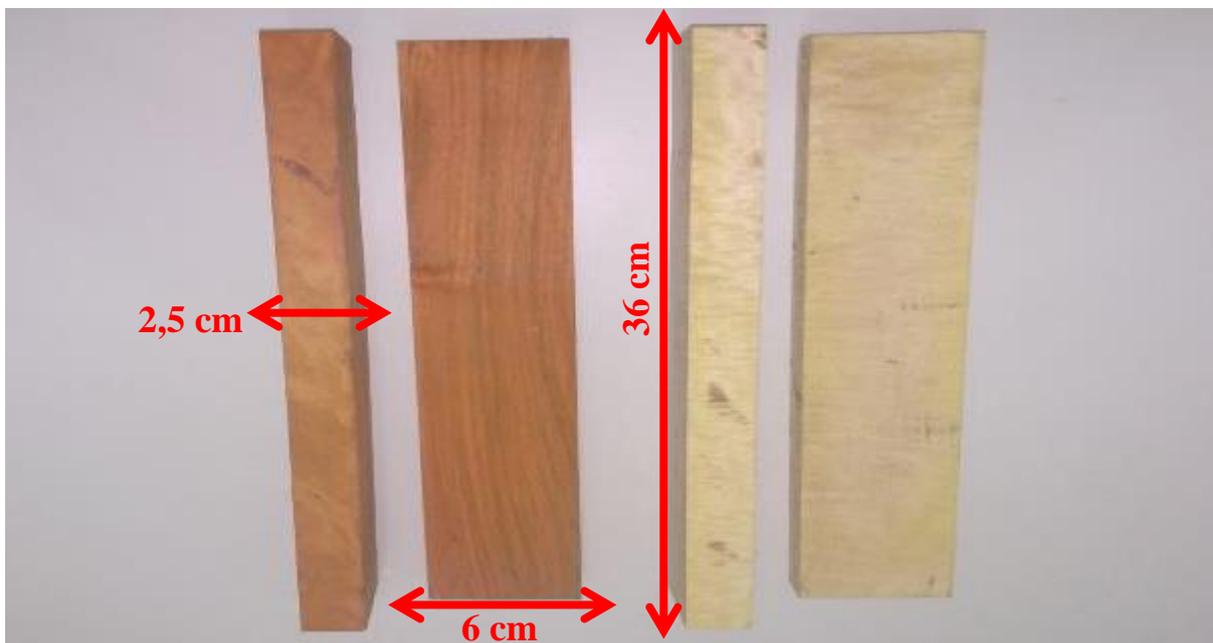


Figura 6. Dimensões dos corpos de prova de usinagem.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a realização das análises de qualidade da superfície usinada da madeira, foram realizados os testes descritos a seguir:

- Aplainamento: teste de plaina;
- Lixamento: teste de lixa;
- Furação: furos para cavilhas e dobradiças (passante e não passante);
- Rasgo lateral;
- Fendilhamento por pregos.

Na Figura 7 são representados os corpos de prova após a realização dos ensaios de usinagem da madeira.

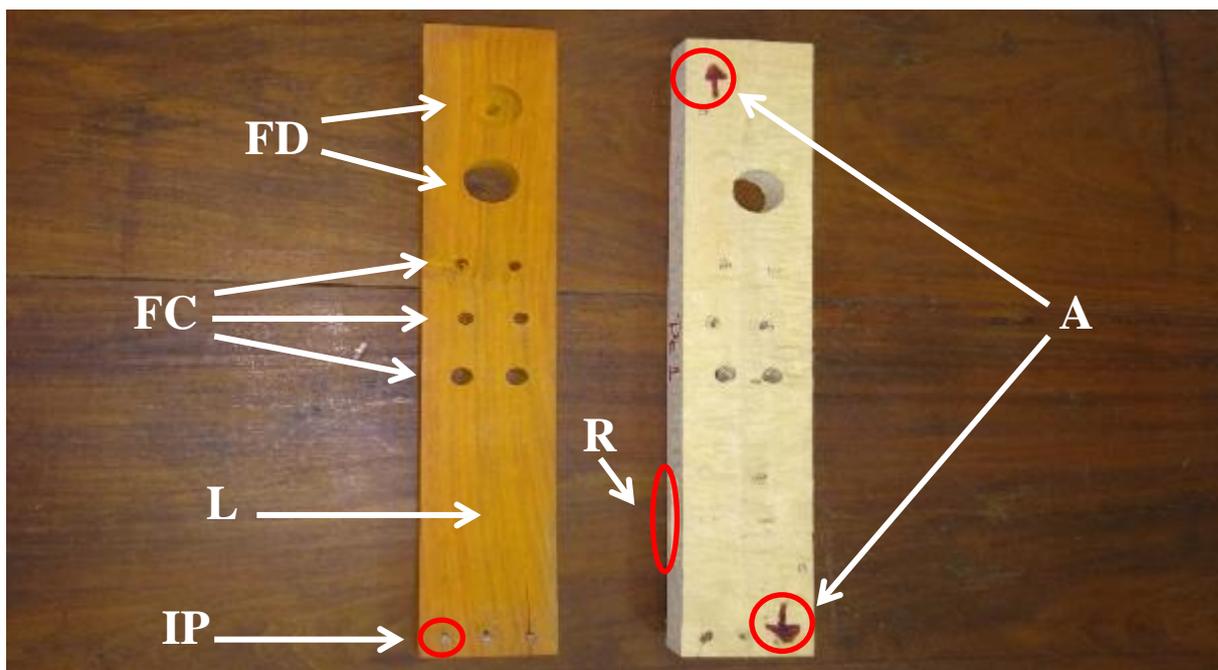


Figura 7. Representação dos ensaios de usinagem.

Fonte: Arquivo pessoal. Onde: A – aplainamento; L – lixamento; FC – furação para cavilha; FD- furação para dobradiça; R – rasgo; IP – inserção de pregos.

Para avaliar a qualidade da madeira, em cada corpo de prova foram atribuídas notas de 1 a 5 conforme o comportamento observado por quatro avaliadores, onde:

Tabela 1. Notas aplicadas na classificação da avaliação dos defeitos.

| Nota | Classificação | Frequência Dos Defeitos |
|------|---------------|--|
| 1 | Excelente | Peça sem defeitos |
| 2 | Boa | Defeitos em uma pequena parte da peça |
| 3 | Regular | Defeitos na metade da peça |
| 4 | Ruim | Defeitos na maior parte da peça |
| 5 | Muito ruim | Defeitos em quase a totalidade da peça |

3.3.1. Aplainamento (teste de plaina)

Foram realizadas duas operações de desempenho, uma em “concordância” e outra em “discordância” com relação à grã, no sentido longitudinal da peça ou da disposição das fibras, assumindo que a movimentação do eixo e da faca foi o mesmo, mudando apenas o sentido do corpo de prova, cada tipo de movimentação foi realizado em metade do corpo de prova (Figuras 8 e 9).



Figura 8. Corpo-de-prova em operação de aplainamento.
Fonte: Arquivo pessoal.

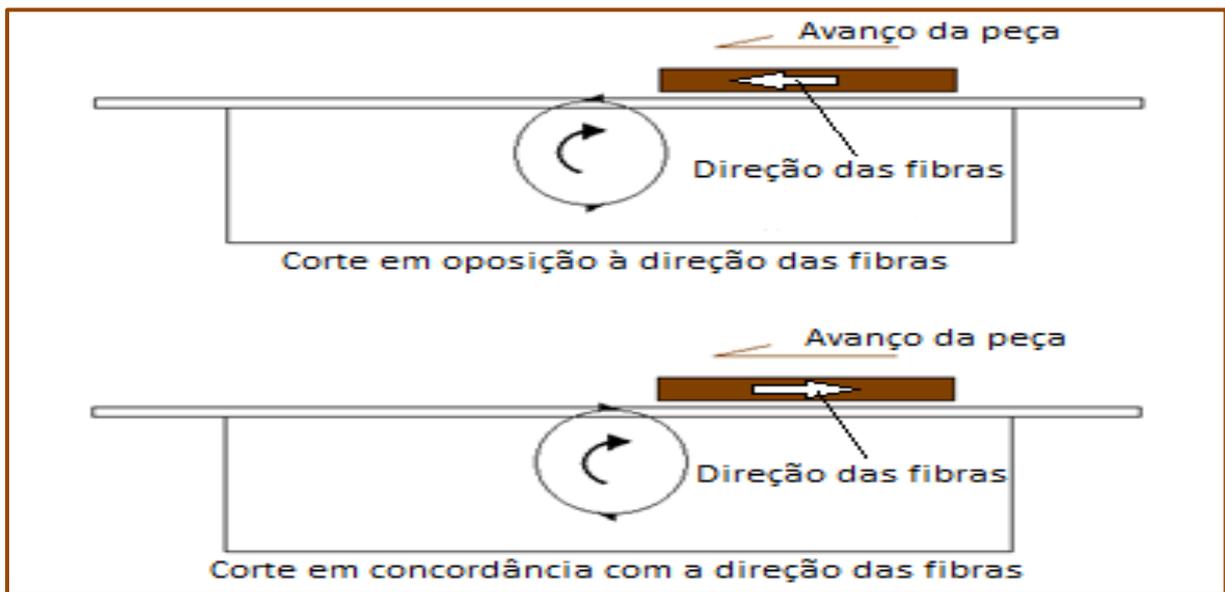


Figura 9. Esquema dos cortes de desempenho em oposição e concordância.
Fonte: CARVALHO, 2017.

3.3.2. Lixamento (teste de lixa)

Os testes de lixamento foram realizados em uma lixadeira de esteira com lixa de grão 100. Os corpos de prova foram lixados por 20 segundos na face oposta à do teste de plaina (Figura 10).



Figura 10. Lixadeira.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.3. Furação

Para os testes de furação foi utilizada uma furadeira vertical de coluna com velocidade de avanço manual e frequência de rotação do motor de 3100 min^{-1} . Foram realizados dois tipos de furações; uma para cavilha (pinos de madeira torneados) e outra para dobradiça. Na furação para cavilha, a furadeira foi equipada com brocas do tipo helicoidal de aço, com 6, 8, e 12 mm de largura, sendo realizados 6 furos passantes por amostra, 2 para cada broca. Na furação para dobradiça, foi utilizada broca chata de 25 mm, confeccionando assim dois furos, sendo um passante e o outro não passante. Os furos possuem uma distância mínima de 25 mm entre eles (Figura 11).



Figura 11. Furadeira vertical utilizada para realizar os furos de cavilha e dobradiça.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.4. Rasgo lateral

O teste foi realizado na lateral do corpo de prova em sua porção inferior, na qual foi realizado o teste com a utilização de uma furadeira horizontal e uma broca helicoidal de 10 mm (Figura 12).

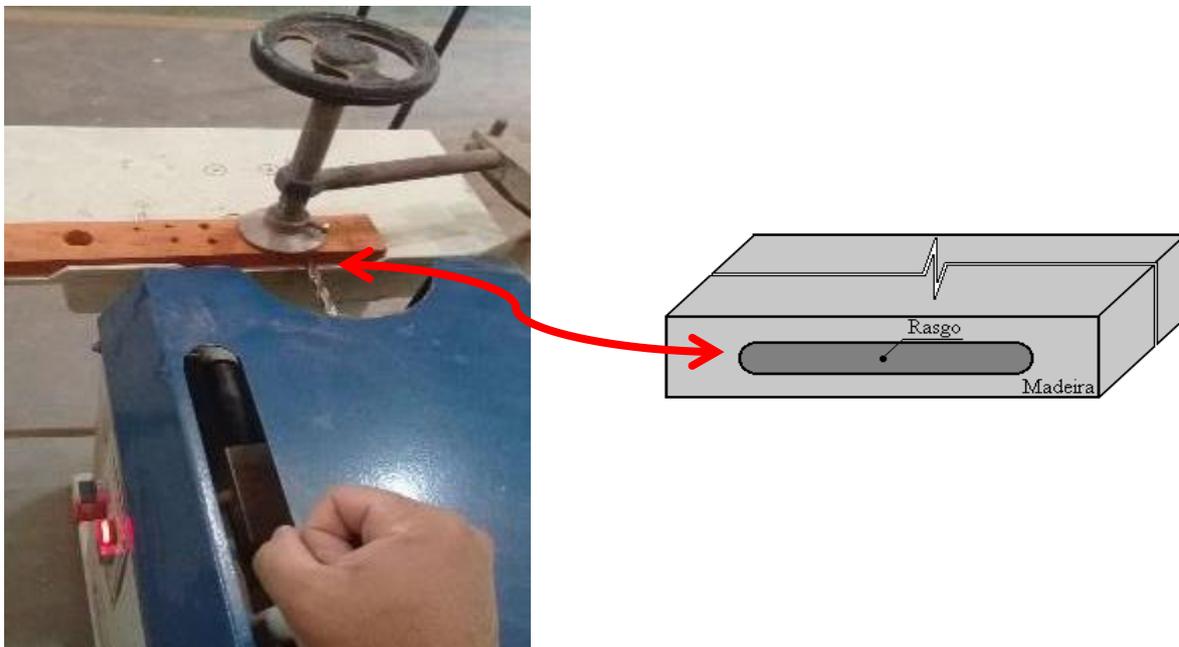


Figura 12. Furadeira horizontal e ilustração da superfície do rasgo.
Fonte: Arquivo pessoal; SALOMONE, 2011.

3.3.5. Fendilhamento

As avaliações foram feitas a partir da observação de rachas ou trincas presentes na superfície de penetração (Figura 13). A análise dos testes foi baseada na qualidade de cada corpo de prova, considerada para todos os testes realizados. Adotou-se para o teste de fendilhamento a quantidade de três pregos por corpo de prova, onde cada um representa o 33,33% em relação a aceitação de sua inserção na superfície e profundidade da madeira. Sendo assim, as peças com ausência de defeitos nas três inserções possuem 100% de aceitação a pregos; as peças que apresentaram rachas em uma ou duas inserções foram descontadas o proporcional do valor de cada prego; e as peças que possuíram rachaduras em todas as inserções tem 0% de aceitação a pregos.

Os corpos de prova foram classificados como:

- Peça que aceita pregos: amostra sem rachas, trincas e dimensões insignificantes destes, não alcançando o topo das amostras, ou com rachaduras provenientes da secagem natural/estufa da madeira;
- Peça que não aceita pregos: com trincas ou rachas.



Figura 13. Teste de fendilhamento realizado com martelos e pregos.
Fonte: Arquivo pessoal.

3.4. Caracterização química da madeira

Para realizar as análises químicas foram cortados discos de três alturas diferentes da árvore, em seguida houve separação do albúrnio e do cerne. As partes referentes ao albúrnio e do cerne foram misturadas e transformadas em palitos, depois em serragem utilizando-se moinho Wiley.

Por meio de peneiras, a serragem foi classificada, onde a fração utilizada para as análises químicas foi aquela que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Posteriormente, a serragem foi levada para uma sala com controle interno de temperatura e umidade relativa ($23 \pm 1^\circ\text{C}$ e UR% de $50 \pm 2\%$), na qual espera-se atingir seu teor de equilíbrio de umidade.

Após a climatização da serragem, esta foi armazenada em recipientes hermeticamente fechados e o teor de umidade determinada. As análises químicas realizadas foram feitas em duplicata, sendo elas: determinação do teor de extrativos totais, lignina solúvel, insolúvel e total, cinzas. O teor de holocelulose foi calculado pela diferença entre as demais substâncias analisadas.

A Tabela 2 apresenta as normas utilizadas em cada análise.

Tabela 2. Normas empregadas para a realização das análises químicas.

| Parâmetros | Procedimentos |
|------------------------------------|--------------------------|
| Classificação da serragem | TAPPI 204 cm-97 (1997) |
| Teor de extrativos totais | TAPPI T 264 cm-97 (1997) |
| Teor de lignina insolúvel em ácido | TAPPI UM 250 (1991) |
| Teor de lignina solúvel em ácido | GOMIDE e DEMUNER (1986) |
| Teor de cinzas | NREL TP 510-42622 |

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades físicas da madeira

Na Tabela 3 se encontram os valores das médias, dos desvios padrão e dos coeficientes de variação das densidades aparente, anidra e básica, bem como os resultados de coeficiente de anisotropia para cada região da madeira (alburno e cerne).

Tabela 3. Valores encontrados para a caracterização das propriedades físicas da madeira de *Paubrasilia echinata*.

| Propriedades Físicas | Alburno | | Cerne | |
|---|---------|--------------|-------|--------------|
| | Média | Desvio | Média | Desvio |
| Densidade aparente (g/cm ³) | 0,72 | 0,07 (9,97) | 0,82 | 0,08 (9,21) |
| Densidade básica (g/cm ³) | 0,64 | 0,01 (1,57) | 0,74 | 0,04 (5,74) |
| Densidade anidra (g/cm ³) | 0,71 | 0,01 (1,60) | 0,83 | 0,05 (5,45) |
| Coefficiente de anisotropia | 1,57 | 0,32 (20,53) | 1,78 | 0,28 (15,88) |

Valores dos coeficientes de variação (C.V.%) em parênteses seguidos do desvio padrão.

Os estudos de Melo et al. (1990) e Silveira et al. (2013), classificam como madeiras de baixa densidade aquelas que possuem valores menores que 0,550 g cm⁻³, de média densidade as que apresentam valores entre 0,55 e 0,72 g cm⁻³, e de alta densidade aquelas cujo valores são superiores a 0,73 g cm⁻³.

A partir dessa classificação e dos resultados obtidos em todas as densidades estudadas, a madeira de alburno pode ser caracterizada como sendo de média densidade ($\rho_{bas}=0,64$ g/cm³) e a do cerne como de alta densidade ($\rho_{bas}=0,74$ g/cm³). Essas variações de densidade entre essas regiões podem ser explicadas, segundo Costa (2006), devido à idade do indivíduo, a maior taxa de extrativos, a espessura da parede das fibras, a percentagem de material da parede e a quantidade proporcional de diferentes tipos de células presentes no cerne.

Os resultados mostram que o coeficiente de variação da densidade básica foi menor que o do coeficiente de anisotropia, sendo assim, pode-se afirmar que os dados relativos à densidade básica são mais homogêneos que os dados do coeficiente de anisotropia. Nas Figuras 14 e 15 estão plotadas as distribuições dos valores de densidade básica e do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova de alburno e cerne, respectivamente.

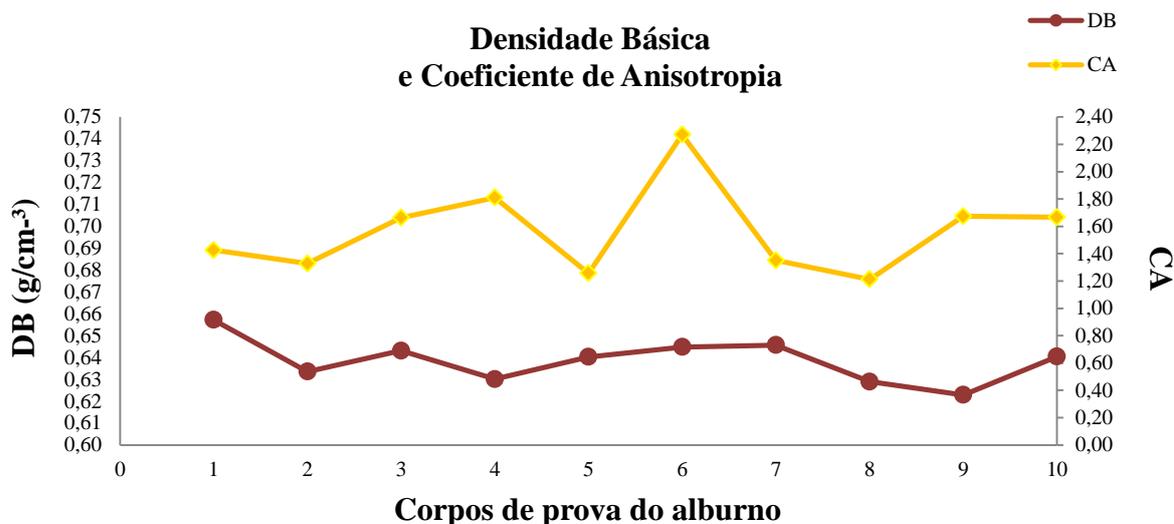


Figura 14. Distribuição da densidade básica e do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova de alburno.

Fonte: Arquivo pessoal. Onde: DB (densidade básica) e CA (coeficiente de anisotropia).

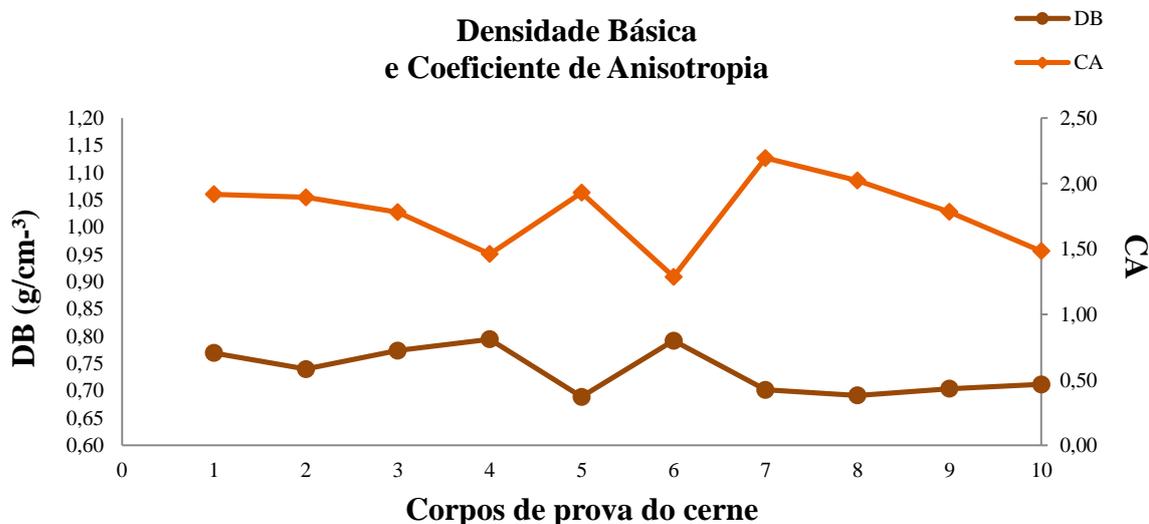


Figura 15. Distribuição da densidade básica e do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova de cerne.

Fonte: Arquivo pessoal. Onde: DB (densidade básica) e CA (coeficiente de anisotropia).

Para a madeira de alburno, nota-se visualmente que não há correlação entre as variáveis. No cerne, percebe-se que há correlação negativa entre alguns pontos do gráfico, onde à medida que o valor de densidade básica aumentou, o coeficiente de anisotropia ficou menor, conferindo melhor instabilidade. Assim, foram realizadas as matrizes de correlação e de p-valores para comprovar o comportamento de cada porção (Tabela 4).

Tabela 4. Valores das matrizes de correlação de Pearson e de p-valores entre as variáveis densidade básica e coeficiente de anisotropia.

| Valores de Correlação e P-Valores | Alburno | Cerne |
|--|----------------|--------------|
| Matriz de Correlação | 0,04 | - 0,62 |
| Matriz de P-Valores | 0,91 | 0,06 |

O coeficiente de correlação de Pearson pode variar entre -1 a +1. Sendo que valores próximos ou iguais a zero representam relação linear fraca ou inexistente, até 0,50 apresentam uma correlação baixa, e acima disso (0,60-0,90) representam correlação forte. Valores próximos a -1 ou +1 indicam relação negativa ou positiva perfeita.

A partir dos resultados da tabela 4, pode-se comprovar que para a madeira de alburno não teve correlação entre as variáveis citadas, pois o valor do coeficiente de correlação é muito próximo a zero e seu p-valor (0,91) é muito maior do que o nível de significância utilizado como parâmetro (0,05). Já a madeira de cerne, apresentou o coeficiente -0,62, que indica uma relação negativa razoável, devido poucos pontos apresentarem correlação entre as variáveis e seu p-valor (0,06) ser pouco maior do que o nível de significância.

O fator ideal de anisotropia de um material seria igual a 1, o que indicaria inexistência de alteração nas suas dimensões ou que as alterações nos seus diferentes sentidos anatômicos seriam iguais, no entanto, segundo Moreschi (2012), isto não pode ser observado para a madeira. Nock et al. (1975) apresentou em seu trabalho valores de referência para o coeficiente de anisotropia (Tabela 5).

Tabela 5. Referência da análise de coeficiente de anisotropia (CA) para madeira.

| C.A. | Classificação | Estabilidade |
|-------------|----------------------|--|
| ≤ 1,5 | Excelente | Madeira de baixa anisotropia e alta estabilidade |
| > 1,5 a 2,0 | Normal | Madeira de média anisotropia e baixa ou média estabilidade |
| > 2,0 | Ruim | Madeira de alta anisotropia e baixa estabilidade |

Portanto, o resultado do coeficiente de anisotropia foi 1,57 para o alburno, mostrando que a madeira tem qualidade considerada normal e possui anisotropia média, porém pode apresentar baixa ou média estabilidade de acordo com o material genético e idade do indivíduo. O cerne por sua vez, obteve 1,78 de coeficiente de anisotropia, mostrando ser a porção mais instável da madeira.

As madeiras que possuem coeficientes de anisotropia menores que 1,5 (muito estáveis) são indicadas para produção de móveis finos, esquadrias e instrumentos; aquelas que apresentam valores entre 1,6 e 2,0 (estáveis ou com pouca estabilidade) podem ser indicadas para usos que aceitam pequenos empenamentos, como estantes, armários ou mesas; já as de resultado acima que 2,0 (baixa estabilidade) são indicadas para usos menos nobres, principalmente na construção civil (NOCK et al., 1975).

4.2. Usinagem da madeira

De maneira geral, as madeiras das regiões do alburno e do cerne de *Paubrasilia echinata*, obtiveram resultados regulares, apresentando defeitos em sua maioria classificados de leves a médios, ou seja, demonstraram ausência de determinado defeito ou somente numa parte da peça. Uma pequena parte dos corpos de prova apresentou defeitos graves ou aqueles presentes em todo comprimento da peça, sendo necessário que outros estudos, como a determinação das propriedades mecânicas, sejam realizados para determinar o potencial para a produção ou aproveitamento dessa madeira.

4.2.1. Aplainamento (teste de plaina)

Nos testes de plaina, os corpos de prova apresentaram um comportamento similar em relação à quantidade de defeitos tanto no sentido concordante, como no discordante, por tanto foram realizadas as médias entre eles. Os valores correspondentes à frequência de corpos de prova classificados por nota e defeito, no ensaio de aplainamento, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Avaliação relacionada a diferentes tipos de defeitos quanto à grã arrancada, grã felpuda e marcas de cavaco.

| Nota | Teste de Plaina – Alburno / Cerne | | | | | |
|------|-----------------------------------|-------|-------------|-------|------------------|-------|
| | Grã Arrancada | | Grã Felpuda | | Marcas De Cavaco | |
| | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne |
| 1 | 8 % | 15 % | 30 % | 29 % | 31 % | 41 % |
| 2 | 24 % | 25 % | 29 % | 40 % | 38 % | 45 % |
| 3 | 41 % | 30 % | 25 % | 18 % | 28 % | 13 % |
| 4 | 26 % | 28 % | 16 % | 14 % | 4 % | 1 % |
| 5 | 1 % | 3 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |

Onde: Nota 1 (excelente) – peça sem defeitos; Nota 2 (bom) – defeitos em uma pequena parte da peça; Nota 3 (regular) – defeitos na metade da peça; Nota 4 (ruim) – defeitos na maior parte da peça; Nota 5 (muito ruim) – defeitos graves ou na maior parte da peça.

As porções de alburno e cerne apresentaram os defeitos dos tipos “grã felpuda” e “marcas de cavaco”, classificados em sua maioria como excelente ou bom, mas também como leves, regulares ou ruins (defeitos presentes em apenas uma parte ou metade da peça). Entretanto, o defeito “grã arrancada” apareceu em numa pequena parte dos corpos de prova de alburno e de cerne classificados como “muito ruim” (defeitos em todo comprimento da peça).

Filho (2004) comentou em seu estudo que as operações realizadas através das plainas desengrossadeira e/ou desempenadeira têm a finalidade de melhorar a qualidade do acabamento nas quatro faces da superfície das peças, assim, a espécie apresenta no geral uma resposta regular ao aplainamento, mas pode apresentar perda no potencial de trabalhabilidade e na qualidade do acabamento de sua superfície.

4.2.2. Lixamento (teste de lixa)

Para o lixamento, os valores correspondentes à frequência de corpos de prova classificados para cada nota e separados por defeito estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Avaliação realizada em lixadeira de esteira, classificação em relação à superfície.

| Teste de lixa – Alburno / Cerne | | | | |
|--|--------------------|--------------|-------------------|--------------|
| Nota | Grã Felpuda | | Riscamento | |
| | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne |
| 1 | 53 % | 53 % | 53 % | 75 % |
| 2 | 28 % | 23 % | 35 % | 20 % |
| 3 | 10 % | 18 % | 10 % | 5 % |
| 4 | 8 % | 8 % | 3 % | 0 % |
| 5 | 3 % | 0 % | 0 % | 0 % |

Onde: Nota 1 (excelente) – peça sem defeitos; Nota 2 (bom) – defeitos em uma pequena parte da peça; Nota 3 (regular) – defeitos na metade da peça; Nota 4 (ruim) – defeitos na maior parte da peça; Nota 5 (muito ruim) – defeitos graves ou na maior parte da peça.

No teste de lixa, mais de 50% dos corpos de prova, tanto de alburno quanto de cerne, apresentaram resultados excelente para todos os defeitos. O defeito “grã felpuda” apresentou uma pequena parte de corpos de provas considerados ruins ou muito ruins, já o defeito “riscamento” apresentou os melhores resultados, sendo a porção do cerne melhor avaliada com 75% dos corpos de prova considerados excelentes ou com ausência desse defeito. Estes resultados mostram que a espécie tem ótima aceitação para esse equipamento, uma vez que a madeira se comporta de forma satisfatória na operação de lixamento.

4.2.3. Furação

Os resultados obtidos para o teste de furação de cavilha e dobradiça foram apresentados nas Tabelas 8 e 9 respectivamente, onde foi realizada média para os furos realizados com brocas helicoidais de 6, 8 e 10 mm e média entre os furos passante e não passante feitos a partir das borcas chatas.

Tabela 8. Avaliação do teste de furação para cavilhas realizadas com furadeira vertical de coluna equipada com brocas helicoidais.

| Furação para Cavilha – Alburno / Cerne | | | | | | |
|---|--------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
| Notas | Esmagamento | | Grã arrancada | | Grã felpuda | |
| | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne |
| 1 | 55 % | 57 % | 36 % | 37 % | 46 % | 51 % |
| 2 | 23 % | 23 % | 23 % | 32 % | 23 % | 28 % |
| 3 | 17 % | 18 % | 17 % | 23 % | 16 % | 15 % |
| 4 | 6 % | 2 % | 25 % | 8 % | 15 % | 7 % |
| 5 | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 1 % | 0 % |

Onde: Nota 1 (excelente) – peça sem defeitos; Nota 2 (bom) – defeitos em uma pequena parte da peça; Nota 3 (regular) – defeitos na metade da peça; Nota 4 (ruim) – defeitos na maior parte da peça; Nota 5 (muito ruim) – defeitos graves ou na maior parte da peça.

Tabela 9. Avaliação do teste de furação para dobradiça realizado com furadeira vertical de coluna equipada com broca chata.

| Furação para Dobradiça – Alburno / Cerne | | | | | | |
|---|--------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
| Notas | Esmagamento | | Grã arrancada | | Grã felpuda | |
| | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne |
| 1 | 46 % | 68 % | 20 % | 51 % | 15 % | 34 % |
| 2 | 40 % | 31 % | 41 % | 28 % | 44 % | 40 % |
| 3 | 14 % | 1 % | 34 % | 19 % | 35 % | 24 % |
| 4 | 0 % | 0 % | 5 % | 3 % | 6 % | 3 % |
| 5 | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |

Onde: Nota 1 (excelente) – peça sem defeitos; Nota 2 (bom) – defeitos em uma pequena parte da peça; Nota 3 (regular) – defeitos na metade da peça; Nota 4 (ruim) – defeitos na maior parte da peça; Nota 5 (muito ruim) – defeitos graves ou na maior parte da peça.

Em geral, os testes de furação para cavilha e dobradiça apresentaram bom desempenho, pois a maior parte dos corpos de prova receberam notas 1 ou 2 (excelente ou bom). Uma pequena parte dos corpos de prova receberam nota 4 (ruim), sendo que o defeito “grã arrancada” foi o pior avaliado para o teste de furação.

4.2.4. Rasgo lateral

A madeira de *Paubrasilia echinata* apresentou desempenho considerado ótimo para o defeito “esmagamento” no teste de rasgo, onde nenhum corpo de prova recebeu nota 4 ou 5 (ruim ou muito ruim), sendo que o cerne teve 78% dos corpos de prova considerados excelentes. No defeito “grã arrancada” apresentou desempenho regular, onde o alburno obteve um maior número de nota 3. Os corpos de prova do cerne tiveram os melhores resultados, mesmo que uma pequena deles tenham recebido notas 4 ou 5, isso indica que essa porção tem uma aceitação maior ao teste de plaina (Tabela 10).

Tabela 10. Resultados da avaliação do teste de rasgo realizado pela furadeira horizontal.

| Notas | Esmagamento | | Grã arrancada | |
|-------|-------------|-------|---------------|-------|
| | Alburno | Cerne | Alburno | Cerne |
| 1 | 48 % | 78 % | 8 % | 38 % |
| 2 | 30 % | 15 % | 33 % | 30 % |
| 3 | 23 % | 8 % | 38 % | 20 % |
| 4 | 0 % | 0 % | 23 % | 10 % |
| 5 | 0 % | 0 % | 0 % | 3 % |

Onde: Nota 1 (excelente) – peça sem defeitos; Nota 2 (bom) – defeitos em uma pequena parte da peça; Nota 3 (regular) – defeitos na metade da peça; Nota 4 (ruim) – defeitos na maior parte da peça; Nota 5 (muito ruim) – defeitos graves ou na maior parte da peça.

4.2.5. Fendilhamento

O teste de fendilhamento por pregos apresentou uma baixa aceitação para a porção de alburno (33,33%). Os corpos de prova de cerne apresentaram rachaduras em todas as inserções, ou seja, o material não aceita de forma alguma a utilização dos pregos utilizados nos ensaios. Em geral, todos os corpos de prova apresentaram rachas, podendo-se considerar que esse teste gerou os piores resultados (tabela 11).

Tabela 11. Resultados obtidos para o teste de fendilhamento.

| Avaliação | Alburno | Cerne |
|------------|---------|-------|
| Sem rachas | 33,33 % | 0% |
| Com rachas | 66,66 % | 100 % |

A condição de secagem das amostras pode ter exercido influência nos resultados do teste de fendilhamento por pregos, visto que os corpos de provas foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 55°C por 24 horas, essa ação pode ter causado o enfraquecimento nas extremidades das peças, gerando o surgimento de fissuras nessa região.

4.3. Caracterização química da madeira

Tabela 12. Análises químicas realizadas com a madeira de alburno e cerne da espécie *Paubrasilia echinata*.

| Análises | Teor (%) | |
|-------------------|--------------|--------------|
| | Alburno | Cerne |
| Extrativos | 4,6 ± 0,01 | 15,9 ± 0,00 |
| Cinzas | 2,24 ± 0,02 | 1,86 ± 0,01 |
| Lignina solúvel | 1,96 ± 0,09 | 1,77 ± 0,04 |
| Lignina insolúvel | 23,32 ± 0,00 | 23,21 ± 0,08 |
| Lignina total | 25,27 ± 0,09 | 24,98 ± 0,12 |
| Holocelulose | 67,88 ± 0,10 | 57,25 ± 0,12 |

Os teores de extrativos para o cerne foi de 15,92% e o alburno de 4,61%. Essa diferença entre as duas porções se deve ao cerne ser a parte fisiologicamente inativa da árvore, onde há maior concentração dessas substâncias, que em geral possuem características hidrofóbicas, e por isso tendem a apresentar menores teores de umidade, assim, o cerne pode apresentar maior resistência ao ataque de agentes degradadores da madeira (Tabela 12). Dias et al. (2013), encontrou em sua amostra da madeira de Pau-brasil o teor de 14,35% de extrativos, mostrando que os resultados encontrados na pesquisa são coerentes. Ainda quanto a ordem de grandeza dos valores, destaca-se que geralmente, o gênero *Eucalyptus* sp apresenta teores de extrativos na faixa de 2 a 5% (PEREIRA et al., 2013; ZANUNCIO et al., 2013), e espécies nativas apresentam de 8 a 17% (MORI et al., 2003). A quantidade e a composição de extrativos dependem de diversos fatores, como espécie, idade e região de origem. Com isso, pode-se considerar que a madeira estudada possui elevado teor de extrativos quando comparada com algumas espécies nativas e exóticas, como as do gênero *Eucalyptus* sp.

O Pau-brasil apresentou 2,24% de teor de cinzas no lenho de alburno e no cerne 1,86%. Geralmente, o maior teor de cinzas é encontrado no alburno por ser a porção fisiologicamente ativa da árvore, onde há grande fluxo de minerais em transporte. Com base na literatura (FENGEL & WEGENER, 1989), o teor de cinzas encontrado para madeiras em geral é em torno de 0,5%, assim, pode-se considerar que a espécie apresentou um teor de compostos inorgânicos elevado.

Os teores de lignina solúvel e insolúvel para alburno (25,27%) e cerne (24,98%) não apresentaram diferenças significativas entre si. Esses valores estão de acordo com o estudo realizado por Dias et al. (2013), que encontrou para a madeira de Pau-brasil os valores de 24,69 %, 21,15 % e 23,5 % para os teores de lignina na madeira livre de extrativos e lignina na Madeira Seca respectivamente. Além disso, os valores são próximos aos descritos por Klock et al (2005), onde a concentração de lignina em folhosas foi caracterizada em torno de $20 \pm 4\%$.

Quanto ao teor de holocelulose da madeira, o alburno apresentou teor maior (67,88%) do que o cerne (57,25%). Klitzke et al. (2008), comentaram que maior teor de holocelulose encontrado foi na madeira de alburno, seguido do lenho de transição e, finalmente, do cerne para o estudo realizado com a madeira de jatobá (*Hymenaea* sp.), e que quanto maior for o teor de holocelulose, maior a higroscopicidade da madeira, uma vez que a celulose e a

hemicelulose são as maiores responsáveis por essa propriedade. Assim, pode-se confirmar que o alburno deve sempre apresentar valores maiores de holocelulose que o cerne.

5. CONCLUSÕES

Em função da anisotropia verificada, a porção de alburno mostrou-se mais estável, indicando que, mesmo em idades mais reduzidas do que a pressuposta para o material avaliado neste estudo, a utilização desta porção pode ser considerada também para fins nobres da madeira.

De maneira geral, a madeira apresentou boa trabalhabilidade a partir dos resultados de usinagem, sendo adequada para fins e segmentos madeireiros onde não se utilizem inserção de pregos, ou onde cavilhas e adesivos devam ser priorizados na confecção dos bens de consumo finais, móveis, esquadrias, objetos e outros.

A porção do cerne do Pau-brasil estudado apresentou teores de extrativos elevados, se comparado com teores de extrativos de outras espécies nativas e exóticas, entretanto, é necessário que se desenvolvam mais estudos que qualifiquem esses extrativos e que analisem seus comportamentos separadamente, para assim, determinar se outras espécies nativas com características químicas similares, possam ser utilizadas, por exemplo, para a produção de arcos para instrumentos de cordas, entre outros usos onde o Pau-brasil possui alta qualidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1666-87 standard method for conducting machining tests of wood and wood base materials (reapproved 1994). Philadelphia. p.226-245. 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1666-11: Standard Method for conducting machining tests of wood and wood base materials. Philadelphia, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Projeto de Estruturas de Madeira. NBR-7190:1997. Rio de Janeiro: ABNT, 107p. 1997.

ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n. 3, 2007.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BRAND, M. A. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. 2007. 23 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 2007.

- BURGER, L.M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 180p.
- CARVALHO, P. E. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2003. 719-725p.
- CARVALHO, A. M.; SILVA, B. T. B.; LATORRACA, J. V. F. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.). **Cerne**, v. 16, 106-114p, 2010.
- CARVALHO, P. C. L. **Avaliação de usinagem e propriedades físicas da madeira de *Syzygium cumini* (L.) Skeels**. 2017. 11 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F.; REIS, C. A.; SILVA, C. E. S.; CARVALHO, P. C. L.; MACIEL, N. S. R.; PACE, J. H. C.; CASTRO, J. P.; SANTOS, G. C. V.; SOUZA, J.; SIQUEIRA, G. S.; FERREIRA, M. E. S.; SAKAI, E. S. Avaliações de qualidade da madeira em espécies nativas de plantios florestais. In: Samir G. Rolim; Daniel Piotto. (Org.). **Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica**. 01 ed. v 01. Belo Horizonte: Editora Rona, 2018. 135-137p.
- CNCFLORA. ***Caesalpinia echinata* in Lista Vermelha da flora brasileira**. Versão 2012.2, Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em: <[www.cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Caesalpinia echinata](http://www.cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Caesalpinia%20echinata)>. Acesso em 14/04/2019.
- COLDEBELLA, R. Caracterização das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. DON EX STEUD. 2016. 27 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. **Technical Report #0018-2005. Laboratório de Celulose e Papel**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2005. 224p.
- COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. Composição Química de Materiais Lignocelulósicos. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da Produção da Polpa Marrom ao Produto Acabado**. 01 ed. v 01. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015. 33-57p.
- COSTA, C. G.; CALLADO, C. H.; CORADIN, V. T. R.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. Xilema. In: APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal**. Viçosa: UFV, 2003. cap. 5, p. 129-154.
- COSTA, V. E. Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. 2006. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- DIAS, F. M. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. 2000. 12 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- DIAS, Matheus Cordasso et al. Teor de celulose em madeira de *Caesalpinia echinata* Lam.(pau-brasil). XIII Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – **JEPEX**. Dezembro de 2013.

FARINAS, C. S. **A parede celular vegetal e as enzimas envolvidas na sua degradação.** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 13 p. 2011.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions.** Berlin: Walter & Gesyter, 1989. 613 p.

FILHO, F. C. L. Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis. 2004. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

FOELKEL, C. E. B. **Qualidade da Madeira do Eucalipto - Reflexões Acerca da Utilização da Densidade Básica como Indicador de Qualidade da Madeira no Setor de Base Florestal.** Disponível: <http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT41_Densidade_Basica_Madeira.pdf>. Acesso em: 14/10/2019.

FOELKEL, C. E. B. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto.** Disponível: http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinais.pdf>. Acesso em: 14/10/2019.

FORMIGA, H. M. S. **Desafios do Agronegócio Brasileiro no Século XXI.** Boletim legislativo, Núcleo de Estudo e Pesquisa da Consultoria Legislativa, 2019.

GAGNON, E.; BRUNEAU, A.; HUGHES, C.E.; QUEIROZ, L.P.; LEWIS, G.P. A new generic system for the pantropical *Caesalpinia* group (Leguminosae). **PhytoKeys**, 2016. 71:1–160p.

GOMIDE, J. L. e DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. **O Papel**, 47 (8): p. 36-38, 1986.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Qualidade da Madeira. In: BORÉM. A. **Biotecnologia Florestal.** Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. 25-54p.

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

GORING, D. A. Molecular architecture of wood tissue. In: Arthur, J. C. **Cellulose chemistry and technology.** Washington: American Chemical Society, 1977. P. 273.

GOULART, S. L.; MORI, F. A.; RIBEIRO, A. O.; COUTO; A. M.; ARANTES, M. D. C.; MENDES, L. M. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão [(*stryphnodendron adstringens*) coville] de bioma cerrado. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 59-66, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Madeiras da Amazônia: características e utilização - Amazônia Oriental. Brasília, 1997. v. 3. p. 24-27.

KLITZKE, R. J.; SAVIOLI, D. L.; MUÑIZ, G. I. B.; BATISTA, D. C. Caracterização dos lenhos de cerne, alborno e transição de jatobá (*Hymenaea* sp.) visando ao agrupamento para fins de secagem convencional. **Scientia Forestalis, Piracicaba**, v. 36, n. 80, p. 279-284, 2008.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.; HERNANDEZ, J.; ANDRADE, A. **Química da madeira**. Curitiba: UFPR, 2005. 86p. Apostila.

LOGSDON, N. B. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. 1998. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LOPES, G. A.; GARCIA, J. N. Densidade básica e umidade natural da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith, de Itatinga, associadas aos padrões de casca apresentados pela população. **Scientia Forestalis, Piracicaba**, n. 62, p. 13-23, 2002.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivos de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3 ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 2000. p.145.

MACEDO, T. M.; SILVA, A. V. S.; GONÇALVES, M. L. A.; DIAS, A. C. A. A. Pau-brasil: como conservar sem conhecer? **Diversidade e Gestão**. Volume Especial: Conservação *in situ* e *ex situ* da Biodiversidade Brasileira, 2018.

MATSUNAGA, M.; SUGIYAMA, M.; MINATO, K.; NORIMOTO, M. **Physical and mechanical properties required for violin bow materials**. *Holzforschung*, 1996. Páginas 50:511-517.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata* lam.) nativa e de reflorestamento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, 2012. v.36, n.2, p.373-380.

MELO, J.E.; CORADIN, V.T.R.; MENDES, J.C. 1990. Classes de densidade de madeira para a Amazônia brasileira. In: Anais do Congresso Florestal Brasileiro 6: 695-699. São Paulo, SP, Brasil.

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. **Curitiba: Universidade Federal do Paraná**, 2012.

MORAES, S.A.L.; NASCIMENTO, E.A. do; MELO, D.C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa*: parte I: estudos dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.3, p.461-470, 2005.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. D. C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, vol. 39, n. 1, pp. 199-208, 2015.

MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; CARDOSO, M. D. G. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.

MÜLLER, B. V.; ROCHA, M. P.; CUNHA, A. B.; KLITZKE, R. J.; NICOLETTI, M. F. Avaliação das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 535-542, 2014.

NAKAMURA, R. M.; FILHO, M. S. **Aglomerado de misturas de espécies tropicais da Amazônia**. Brasília: Ministério da Agricultura, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Departamento de Economia Florestal, Laboratório de Produtos Florestais, 1982.

NOCK, H.P.; RICHTER, H.G.; BURGER, L.M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, Universidade Federal do Paraná, 216 p. 1975.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Efeito da idade na qualificação mecânica da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. com uso de ensaios não-destrutivos. *Energia na Agricultura, Botucatu*, v. 23, n. 3, p. 74-94, 2008.

NUNES, W. H.; ANDRADE, A. M.; BRITO, E. O. Produção de chapas de partículas do estipe de *Euterpe edulis* Martius (Palmiteiro). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.6, n.1, p.95-105, 1999.

OLIVEIRA, J. T. D. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto**. 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/607>>. Acesso em: 14/10/2019.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal Correlations among the heart/sapwood ratio of *Eucalyptus* wood, yield and charcoal properties. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, jun. 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, A. C., FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources** 8 (3),4574–4592. 2013.

RODRIGUES, C. K.; HILLIG, E.; MACHADO, G. D. O. Análise química da madeira de *Pinus oocarpa*. Semana de Integração Ensino, Pesquisa e Extensão. **Anais da SIEPE – Semana de Integração Ensino, Pesquisa e Extensão**. Outubro de 2009.

SALOMONE, L. G. C. Ensaio de usinagem em amostras da madeira de cinco espécies nativas brasileiras. 2011. 20 f. Monografia - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2011.

SANTOS, C.P.; REIS, I.N.; MOREIRA, J.E.B.; BRASILEIRO, L.B. Papel: como se fabrica?. **Revista Química Nova na Escola**, Sociedade Brasileira de Química, n.14, novembro de 2001.

SANTOS, A. O. **Árvore que representa o Brasil recebe nova nomenclatura científica.** Disponível: <www.periodicos.capes.gov.br/?option=com_pnews&component=NewsShow&view=pnewsnewsshow&cid=432&mn=0>. Acesso em: 10/10/2019.

SILVA, J. R. M. Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. 2002. 23 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 2002.

SILVA, J. C. Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira. 2002. 179 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, D. A.; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, B. H.; COSTA, R. F. M.; NASCIMENTO, A. K. V.; CELESTINO, P. C. G.; SILVA, E. J. S.; DIAS, M. C. D.; BARRETO, L. P. Teor de lignina em madeira de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.). XIII Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – **JEPEX**. Dezembro de 2013.

SILVA, J.C; CASTRO, V.R; ENCANGELISTA, W.V. Influência da idade na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, visando uso na indústria moveleira. **Scientia Forestalis**, volume 43, n. 105, mar. 2015.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p.179 – 184, 2013.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. D. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.

SIXTA, H. **Handbook of Pulp**. Wiley-CVH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1368p. 2006.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. Tappi test methods: 1992-1993. Atlanta: 1992.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. Tappi standard methods. Atlanta: TAPPI, 2000.

VIDAURRE, G. B.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

ZANUNCIO, A. J. V.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R. Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 755-760, 2013.

* * *