

Densidade básica e aparente da madeira de *Eucalyptus sp.* para uso energético

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar a densidade básica e aparente de clones de *Eucalyptus* utilizando a densitometria de Raios X. Para densidade aparente, amostras do disco do DAP de 11 materiais genéticos de *Eucalyptus* foram usinadas e retiradas amostras radiais de 2 mm de espessura, as quais foram introduzidas em um equipamento de raios X digital (Faxitron LX-60), gerando imagens em alta definição que foram analisadas com auxílio de software conhecido como ImageJ. Os resultados de densidade básica foram realizados pelo método gravimétrico. Os resultados evidenciaram variação de densidade aparente ao longo do sentido medula-casca com maiores valores de densidade nas proximidades da casca. Já a densidade básica verificou-se que o maior valor foi no clone *E. grandis* X *E. urophylla* e o menor no *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis*. De modo geral, as densidade dos clones avaliados mostram-se com valores adequados para fins energéticos.

Palavras-chave: Biomassa, Propriedades físicas, Metodologia não-destrutivas.

Basic and apparent density of *Eucalyptus sp.* for energetic use

Abstract: The objective of this study was to evaluate the basic and apparent density of *Eucalyptus* clones using X-ray densitometry. For apparent density, DAP disc samples of 11 *Eucalyptus* genetic materials were machined and taken from 2 mm thick radial samples, such as which were introduced into a digital X-ray equipment (Faxitron LX-60), generating high definition images that were verified with the software known as ImageJ. Basic density results were performed using the gravimetric method. The results showed variation in apparent density along the pith-bark direction with higher density values in the pith of the bark. As for the basic density, the highest value was in the *E. grandis* x *E. urophylla* clone and the lowest in the *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis*. In general, the density of the evaluated clones shows adequate values for energy purposes.

Keywords: Biomass, Physical properties, Non-destructive methodology.

1. INTRODUÇÃO

O setor brasileiro de florestas plantadas tem avançado nos últimos anos em função da expansão das áreas de cultivo, associado ao desenvolvimento de técnicas silviculturais e de melhoramento genético de diversos genótipos, principalmente do gênero *Eucalyptus* (Silva et al., 2022). Este aumento na

produtividade florestal está associado à composição da matriz energética brasileira, uma vez que 45,2% deste total são provindas de fontes renováveis, representando aproximadamente 130 milhões de toneladas de óleo equivalente. Destaca-se ainda que o carvão vegetal e os materiais lenhosos correspondem a 8,4% da energia total gerada no país (Protásio et al., 2021).

De acordo com o relatório do Ibá (2023), o país atingiu 9,94 milhões de hectares destinados para cultivos industriais em 2022. Deste total, aproximadamente 7,6 milhões de hectares são de áreas cultivadas com o gênero *Eucalyptus* por ser consolidado no mercado florestal (Ibá, 2023).

Na tentativa de ampliar a produtividade, qualidade da madeira e melhorar a adaptação de seus genótipos, as empresas florestais por meio de programas de melhoramento genético, selecionam materiais genéticos constantemente para o estabelecimento de novos plantios (Crous; Sale; Naidoo, 2019). Neste contexto, é fundamental conhecer a variabilidade, composição química, bem como as características anatômicas e físicas da madeira e as suas implicações em produtos resultantes do seu processamento (Hein; Pakkanen; Santos, 2017).

A densidade desempenha um papel crucial ao caracterizar madeiras e materiais lignocelulósicos, fornecendo informações necessárias para sua melhor utilização na indústria, como siderurgia e carvão, papel e celulose e na construção civil. Sua determinação é acessível, de custo reduzido e está intimamente ligada às propriedades físicas e mecânicas do material (EMBRAPA, 2017).

A análise da densidade da madeira e de materiais lignocelulósicos oferece informações importantes sobre sua qualidade, revelando variações em uma série de fatores, incluindo dimensões das fibras, espessura das paredes celulares, diâmetro e volume dos vasos e parênquimas, bem como a relação entre cerne e alburno, no contexto da anatomia da árvore (Foelkel et al., 1971). Essa análise pode detectar variações na direção radial, do centro para a casca, ou mesmo na vertical, da base para o topo (Oliveira et al., 2005).

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a densidade básica (gravimétrico) e aparente por densitometria de raios X da madeira de *Eucalyptus* spp.



Engenharia
Industrial
UFPEL
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA

2. MATERIAL E MÉTODOS

Origem do material

Onze materiais genéticos comerciais do gênero *Eucalyptus* (Tabela 1) de idade de 7 anos, espaçamento de plantio 3x3 m, com seleção de duas árvores de diâmetro médio por tratamento, totalizando 22 unidades amostrais. Os discos de madeira retirados na posição do DAP das árvores, foram utilizados para as análises das densidades.

Tabela 1 – Descrição dos materiais genéticos.

Clone
<i>E. cloeziana</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
<i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>

Análise da densidade básica

Para a determinação da densidade básica da madeira, seguiu-se a norma NBR 7190 (ABNT 2022).

Análise da densidade aparente

A partir dos discos do DAP foram confeccionadas amostras radiais com 2 milímetros de espessura utilizando uma serra circular destopadeira com o corte no sentido radial (medula-casca). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sala climatizada a 25 °C, com a umidade relativa (UR) em 60% até atingirem o teor de umidade de aproximadamente 15% (base seca).



Aquisição das imagens de Raios X

Para confecção dos perfis de densidade aparente das amostras de *Eucalyptus spp.* foi utilizado o equipamento digital Faxitron X-ray LX-60 calibrado para leitura automática (30 Kv, 19 segundos), conforme observado na Figura 1. Após o tempo estimado, o software do equipamento fornece imagens digitais com alta resolução e contraste que foram salvas no formato DICOM e JPEG.

Os perfis de densidade aparente foram obtidos das imagens em escala de cinza. A calibração foi realizada utilizando uma escala de acetato de celulose, com o auxílio do software ImageJ, em que as imagens foram processadas e analisadas pixel a pixel. Também foi possível avaliar as imagens em escala Rainbow.

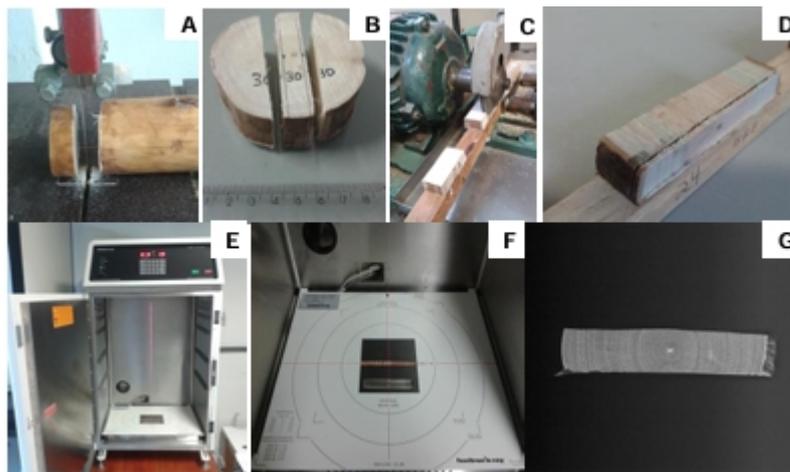


Figura 1: Amostras de *Eucalyptus* (A, B, C e D), confeccionadas com 2 mm de espessura (E e F) e o equipamento de Raios X utilizado (G) (modelo Faxitron LX-60).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de densidade básica e aparente das madeiras de *Eucalyptus*, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Densidade básica e aparente dos clones de *Eucalyptus*

Clone	DA (g/cm ³)	DB (g/cm ³)
<i>E. cloeziana</i>	0,52 ± 0,01	0,52 ± 0,08
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	0,54 ± 0,02	0,48 ± 0,07
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	0,47 ± 0,00	0,41 ± 0,10
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	0,52 ± 0,04	0,45 ± 0,09
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	0,55 ± 0,02	0,46 ± 0,09
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	0,52 ± 0,00	0,43 ± 0,09
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	0,44 ± 0,00	0,37 ± 0,10

<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	0,48 ± 0,00	0,38 ± 0,09
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	0,49 ± 0,06	0,38 ± 0,09
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	0,53 ± 0,01	0,41 ± 0,08
<i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>	0,49 ± 0,01	0,39 ± 0,09

O valor médio da densidade aparente variou de $0,44 \pm 0,00 \text{ g/cm}^3$ (clone *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis*) a $0,55 \pm 0,02 \text{ b g/cm}^3$ (clone *E. grandis* x *E. urophylla*). Os maiores valores densidade da madeira refletem em uma maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume da madeira, ocasionando maior resistência (Zieminska et al., 2020; Dudziec; Stachowicz; Storlarski, 2023).

Madeiras com maior densidade básica são desejáveis para o setor siderúrgico, uma vez que a qualidade do carvão vegetal pode ser melhorada devido ao maior volume de material lenhoso disponível, resultando no aumento de carbono fixo e redução do número de fissuras, graças à menor quantidade de espaços vazios (Rodrigues; Junior, 2019). A literatura demonstra que madeiras com densidade maior que $0,500 \text{ g/cm}^3$ são recomendadas para produção de carvão vegetal. O uso das madeiras dos clones 3, 6, 8, 9 e 10 culminará em carvões mais densos, pois é reportada relação positiva entre a densidade da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal (Lima et al., 2020). Além disso, esses carvões apresentarão maior densidade energética e elevada resistência mecânica, características desejáveis ao biorredutor siderúrgico.

As imagens digitais das seções dos clones de *Eucalyptus* evidenciaram a importância do uso de imagens de raios X para um melhor entendimento da variação radial da densidade aparente (Figura 2). A variação de cores indo do preto ao branco na escala cinza, indicam que as regiões mais escuras representam regiões com menor densidade, e as regiões mais esbranquiçadas, que indicam pontos com maior densidade. Entre os diferentes genótipos de *Eucalyptus* avaliados, verificou-se um padrão semelhante no perfil de densidade, aumentando do sentido interno da medula em direção a casca.

Figura 2: Perfis densitométricos das amostras de *Eucalyptus*

com valores adequados para fins energéticos.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Os autores também agradecem à FAPEMIG e CNPq. Adicionalmente, agradecemos o apoio da Universidade Federal de Viçosa (UFV/Brasil), da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Florestal (EMBRAPIL), da Sociedade de Investigações Florestais (SIF), do Laboratório de Celulose e Papel (LCP), do Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pertencentes à UFV.

6. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. **NBR 16828**: Estruturas de Bambu Determinação das Propriedades físicas e mecânicas do bambu. Rio de Janeiro. 2020.

DE VOS, Valentijn. **Bamboo for exterior joinery**. 2010. Tese de Doutorado. BSc Thesis, International Timbertrade, Larenstein University, The Netherlands.

EMBRAPA; Cultivos de Pínus. Sistemas de produção EMBRAPA, 2014.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos Para Determinação da Densidade Básica de Cavacos Para Coníferas e Folhosas. **IPEF, Piracicaba**, v. 2, n. 3, p. 65-74, 1971.

HAMDAN, H. U. M. K.; ANWAR, U. M. K.; ZAINDON, A. et al. Mechanical properties and failure behaviour of *Gigantochloa scortechinii*. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 336-344, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBÁ 2023. São Paulo, 2023. 91 p.

MUSTAFA, A. A.; DERISE, M. R.; YONG, W. T. L. et al. A Concise Review of *Dendrocalamus asper* and Related Bamboos: Germplasm Conservation, Propagation and Molecular Biology. **Plants**. v.10, n.9, p.1897, 2021.

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. **Revista Árvore**, v. 29, p. 115-127, 2005.

RUSCH, F.; HILLIG, É.; CEOLIN, G. B. Anatomia de hastes adultas de bambu: uma revisão. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 38, 2018.

SANTOS, D.D.S.; SETTE JUNIOR, C.R.; SILVA, M.D. et al. Bamboo species potential as energy source. **Scientia Forestalis**, 2016, 44, 751–758.

SATHITSUKSANOH, N.; ZHU, Z.; TEMPLETON, N. et al. Saccharification of a potential bioenergy crop, *Phragmites australis* (common reed), by lignocellulose fractionation followed by enzymatic hydrolysis at decreased cellulase loadings. **Industrial & Engineering Chemistry Researchs**, v48, n. 13, p. 6441–6447, 2009.

TOMAK, E. D.; TOPALOGLU, E.; AY, N. et al. Effect of accelerated aging on some physical and mechanical properties of bamboo. **Wood science and technology**. v. 46, p. 905-918, 2012.

TOMAZELLO FILHO, M.; BELINI, U. L.; OLIVEIRA, J. T. D. S. et al. Avaliação tecnológica da madeira e de painéis MDF de eucalipto por densitometria de raios X. **Madeira: Arquitetura & Engenharia**, v. 11, n. 27, p. 45-58, 2010.

Zhang, Y. H. P. Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnologie**, v. 35, n.5, p. 367–375, 2008.