

Densitometria de raios X em carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.

Resumo: O estudo avaliou o perfil densitométrico e a densidade aparente de carvões oriundos de *Eucalyptus* spp. utilizando a densitometria de raios X. A madeira dos clones de eucalipto na posição do DAP foram usinadas e retiradas amostras radiais de 2 mm de espessura, e submetidas ao tratamento térmico de carbonização (400°C). Os carvões foram introduzidos em um equipamento de raios X digital (Faxitron LX-60), gerando imagens em alta definição que foram analisadas em no software livre ImageJ. A densidade relativa aparente do carvão vegetal também foi determinada pelo método gravimétrico. Os resultados evidenciaram variação de densidade aparente dos carvões vegetais ao longo do sentido medula-casca com maiores valores de densidade nas proximidades da casca, e verificou-se que o maior valor foi no clone *E. urophylla* × *E. sp* e o menor no *E. urophylla* × *E. pellita*. As densidades dos carvões avaliados mostram-se com valores adequados para fins energéticos.

Palavras-chave: Perfil densitométrico, Propriedades físicas, Metodologia não-destrutivas.

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

Abstract: The study evaluated the densitometric profile and apparent density of carvings from eucalyptus using X-ray densitometry. The wood of Eucalyptus clones in the DAP position was machined and 2 mm thick radial samples were taken and sent to heat treatment for carbonization (400°C). The charcoals were introduced into digital X-ray equipment (Faxitron LX-60), generating high definition images that were verified using the free software ImageJ. The apparent density of charcoal was also determined using the gravimetric method. The results showed variation in the apparent density of charcoal along the pith-bark direction with higher density values in the pith of the bark, and reinforced that the highest value was in the clone *E. urophylla* × *E. spp.* and the smaller in *E. urophylla* × *E. pellita*. The density of the evaluated coals shows adequate values for energy purposes.

Keywords: Densitometric profile, Physical properties, Non-destructive methodology.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário mundial por ser o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, correspondendo por 12% da produção mundial, e por ser o único país do mundo que utiliza esse produto em larga escala nas indústrias de ferro gusa e aço (IBA, 2023). Em 2022, foram produzidas 6.933 mil toneladas de

carvão vegetal no Brasil (BEN, 2023).

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

Em se tratando de carvão vegetal de madeiras do gênero *Eucalyptus* as regiões do cerne e do alburno apresentam comportamento distinto no processo da degradação térmica pelas diferenças anatômico-física e químicas. A decomposição térmica de materiais celulósicos é um assunto bem estudado, porém, a avaliação da variação dimensional que a madeira passa em altas temperaturas ainda não é bem conhecida. É fato conhecido que a madeira, sob a ação do calor, está sujeita a variação em suas dimensões, seja linear, superficial e volumétrica. Em temperatura elevada a madeira passa transformações resultando na modificação dos seus componentes anatômicos como a redução da espessura da parede das células, deformação e ruptura de elementos celulares, além da perda de massa e consequentemente a densidade (Schweingruber et al., 2006; Kwon et al., 2009).

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. A utilização de métodos mais precisos para determinar a densidade de produtos lignocelulósicos como a densitometria de raios X tem aumentado por serem não destrutivos, rápidos, dispensarem reagentes e solventes e permitirem obter com precisão a densidade aparente do perfil radial da madeira (Jacquin et al., 2017).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo caracterizar o perfil densitométrico de carvões de clones de *Eucalyptus* spp.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem do material

Foram coletados seis materiais genéticos comerciais do gênero *Eucalyptus* (Tabela 1) com idade de 7 anos, espaçamento de plantio 3 × 3 m, com seleção de duas árvores de diâmetro médio por tratamento, totalizando 12 unidades amostrais.

Os discos de madeira retirados na árvore na posição do DAP das árvores, foram utilizados para as análises das densidades.

Tabela 1. Descrição dos materiais genéticos.

Clones
1. <i>E. cloeziana</i>
2. <i>E. urophylla</i> × <i>E. sp</i>
3. <i>E. urophylla</i> × <i>E. sp</i>
4. <i>E. urophylla</i> × <i>E. camaldulensis</i> × <i>E. grandis</i>
5. <i>E. urophylla</i> × <i>E. camaldulensis</i> × <i>E. grandis</i>
6. <i>E. urophylla</i> × <i>E. pellita</i>

2.2 Densidade aparente do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, em que as amostras foram imersas em mercúrio, conforme relatado por Oliveira et al., (2010). O ensaio foi realizado em amostras de carvão com 5% de umidade, com sete repetições para cada carbonização, de modo que a densidade aparente média foi obtida pela média aritmética.

2.3 Análise da densidade aparente do carvão vegetal

A partir dos discos do DAP foram confeccionadas amostras radiais com 2 mm de espessura utilizando uma serra circular destopadeira com o corte no sentido radial (medula-casca).

As carbonizações das amostras de 2 mm de espessura foram realizadas em forno elétrico (mufla) adaptado com controle digital do aquecimento (incrementos de 15°C; 30 min.) correspondendo a uma taxa média de 0,5°C/minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 100°C e a temperatura máxima de 400°C, permanecendo esta estabilizada por um período de 60 minutos, com tempo total de carbonização de 10 horas (Arantes et al., 2013).

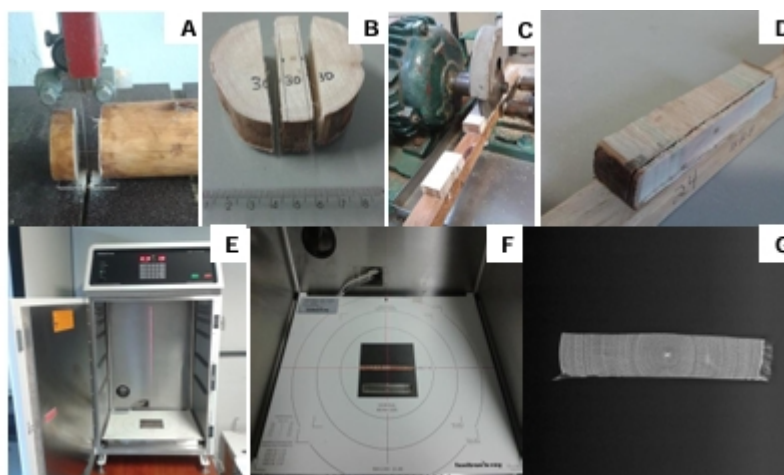
2.4 Aquisição das imagens de Raios X

Para confecção dos perfis densitométricos dos carvões 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 1E. 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 densitométricos dos carvões vegetais foram obtidos das imagens em escala de cinza. A calibração foi realizada utilizando uma escala de acetato de celulose, mediante uso do software livre *ImageJ*, em que as imagens foram processadas e analisadas pixel a pixel.

Figura 1. Amostras de *Eucalyptus* (A, B, C e D), confeccionadas com 2 mm de espessura (E e F) e amostras de carvão vegetal no equipamento de Raios X utilizado (G) (modelo Faxitron LX-60).



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de densidade aparente dos carvões vegetais dos clones de *Eucalyptus* pelas metodologias, gravimétrico e por densitometria de raios X, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios da densidade aparente dos carvões de *Eucalyptus* spp. pelo método gravimétrico (DAg) e por densitometria de raios X (DARx).

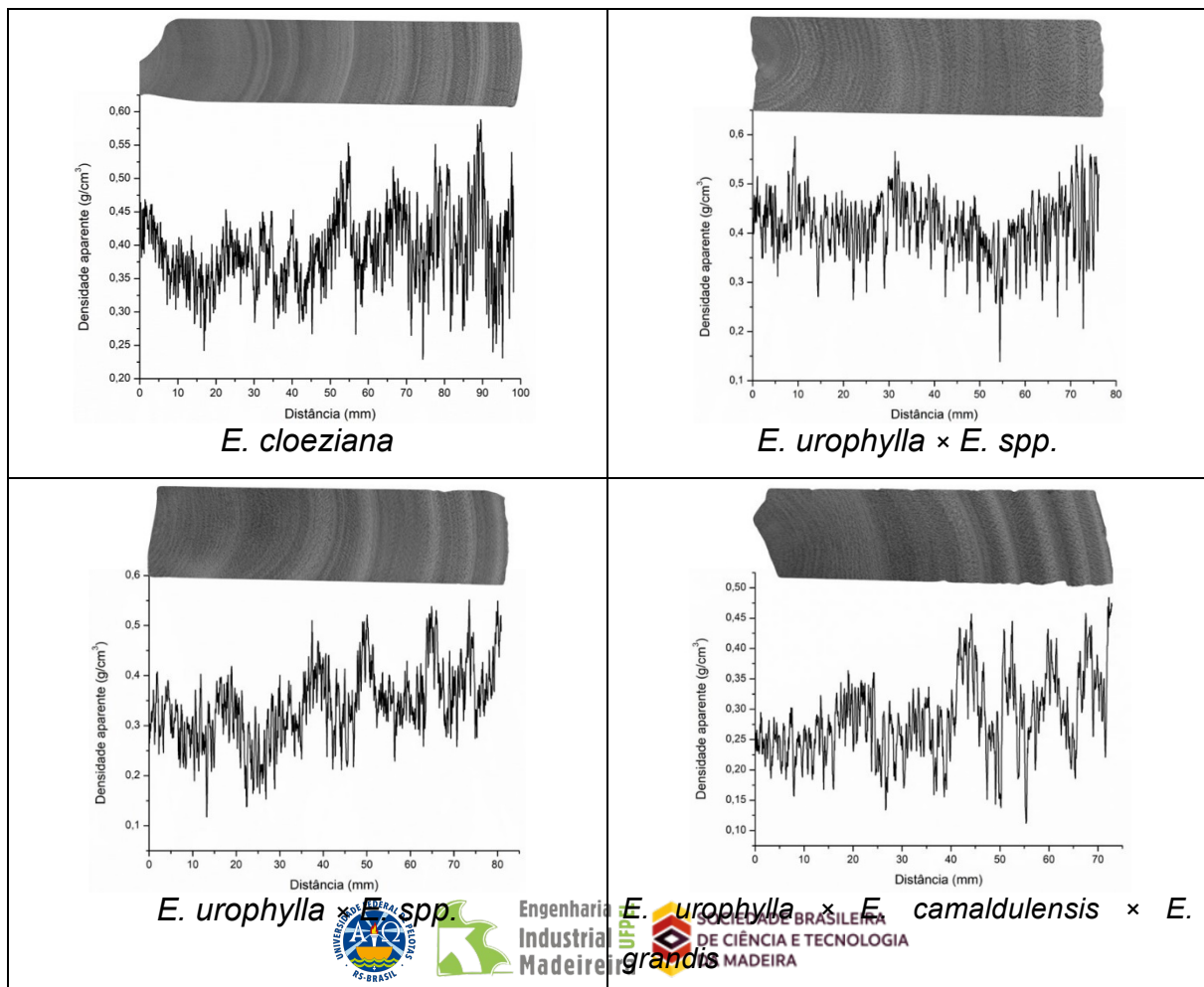
Clones	DAg (Kg/m ³)	DARx (Kg/m ³)
1. <i>E. cloeziana</i>	369	340
2. <i>E. urophylla</i> × <i>E. sp.</i>	375	420
3. <i>E. urophylla</i> × <i>E. sp.</i>	323	340
4. <i>E. urophylla</i> × <i>E. camaldulensis</i> × <i>E. grandis</i>	334	350
5. <i>E. urophylla</i> × <i>E. camaldulensis</i> × <i>E. grandis</i>	245	220
6. <i>E. urophylla</i> × <i>E. pellita</i>	272	250

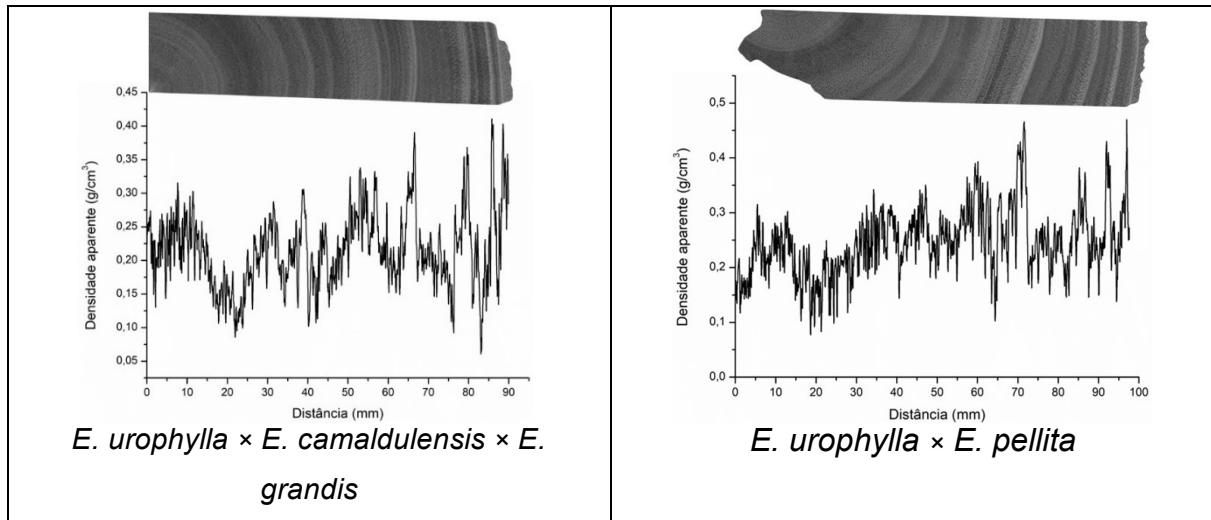
O valor médio da densidade aparente dos carvões pelo método gravimétrico

variou de 272 Kg/m³ (clone *E. urophylla* × *E. pellita*) a 375 Kg/m³ (clone *E. urophylla* × *E. spp.*). Já O valor médio da densidade aparente dos carvões pelo método da densitometria de raios X variou de 250 Kg/m³ (clone *E. urophylla* × *E. pellita*) a 430 Kg/m³ (clone *E. urophylla* × *E. spp.*).

Os perfis radiais de densidade aparente do carvão dos clones de *Eucalyptus* spp. (Figura 2) atendem o modelo de variação indicado na literatura, por vários autores, caracterizado pela menor densidade no lenho próximo da medula, aumentando em direção à casca (Arango; Tamayo, 2008; Tomazello Filho et al., 2008; Sette, 2010); a região do lenho próxima da medula, compreendendo 3-4 cm iniciais do raio, é característica de lenho juvenil, com diferença no sentido longitudinal do tronco, com maior % de lenho juvenil na sua região terminal, observada para quase todos os clones.

Figura 2. Perfis densitométricos dos carvões dos clones de *Eucalyptus* spp.





Em árvores de clones de eucalipto, de 7,5 anos, Pereira et al. (2012) obtiveram valores de densidade aparente do carvão de 0,36 a 0,41 g/cm³, e concluíram que a madeira de maior densidade, resulta em carvão mais denso. A madeira carbonizada de árvores de *Eucalyptus pellita*, de 5 anos, a 1,25°C/min, 6h, 450°C, mostrou maior rendimento gravimétrico, maior poder calorífico superior e maior teor de carbono fixo e densidade aparente de 0,35 a 0,39 g/cm³ (Oliveira et al., 2010).

Estudos realizados por Tavares et al. (2012) demonstraram para árvores de eucalipto que a densidade aparente do carvão é cerca de 50% menor do que a da madeira. Por outro lado, Neves et al. (2011) avaliando clones de eucalipto, de 68 meses, encontraram densidade aparente do carvão de 0,351 g/cm³, concluindo que a madeira de maior densidade e maior teor de lignina é recomendada para a produção de carvão. Botrel et al. (2007) encontraram para árvores de clones de densidade aparente do carvão de 0,280 a 0,420 g/cm³. Carvões com maior densidade, poderão apresentar maior densidade energética e maior resistência mecânica, características desejáveis ao biorredutor siderúrgico.

Dessa forma, pode-se constatar que as imagens digitais dos carvões dos clones de *Eucalyptus* spp. pode ser uma ferramenta útil para futuras análise de carvão vegetal, pois evidenciaram através de imagens de raios X um melhor entendimento da variação radial da densidade aparente.

4. CONCLUSÃO

Pode concluir-se que os resultados evidenciaram variação de densidade aparente dos carvões vegetais ao longo do sentido medula-casca com maiores valores de densidade nas proximidades da casca. A densidade aparente apresentou maior valor no clone *E. urophylla* × *E. spp.* e o menor no *E. urophylla* × *E. pellita*. A densidade aparente dos carvões dos clones avaliados mostram-se 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

ARANGO, B.; TAMAYO, L. Densidad de la madera en clones de Eucalyptus por densitometría de rayos X. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, Medellín, n. 45, p. 87-99, set. 2008.

ARANTES, M.D.C.; Trugilho, P.F.; Silva, J.R.M.; Andrade, C.R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, 19, 3, set 2013

Balanco Energético Brasileiro – BEN. (2023). Empresa de Pesquisa Energética. [acessado: 25 mar.2024]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-202>. Acesso: 16 mar.2024.

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n.3, p.391-398, 2007.

Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ. (2023). Estatística da indústria brasileira de árvores. Disponível em: <https://www.iba.org/detalhes/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-compactado.pdf>. Acesso em 23 mar.2024.

Jacquin, P.; Longuetaud, F.; Laban, J.M.; Mothe, F. X-ray microdensitometry of

wood: a review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, 42, p.42-50, 2017.

KWON, S.M.; KIM, N.H.; CHA, D.S. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, n. 5/6, p. 487-498, 2009.

NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T.P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; VIEIRA, C.M.M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319, maio 2011.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; CORRADI, P.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO A.M.M. L.; CARNEIRO, A.C.O. SANTOS, L.C.; VITAL, B.R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, 8 p., 2012.

SCHWEINGRUBER, F.H.; BORNER, A.; SCHULZE, E.D. Atlas of woody plant stems. Berlin: **Springer-Verlag**, 2006. 229 p.

SETTE JUNIOR, C.R. Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. 2010. 153 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

TAVARES, D.R.; FERREIRA, A.T.B.; HENRIQUES, E.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp e de *Corymbia* sp “in natura” e carbonizada por densitometria de raios X. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 20., 2012, Pirassununga. Anais... Pirassununga: USP, 2012. p. 1-2.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIM, A.W.; BENJAMIN, C.A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of *Eucalypt* Wood. **Maderas: Ciência y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p.139-14975, 2008.