

Qualidade e combustão espontânea do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. coletados em diferentes posições do forno

Gabrielle Fialho Abranches¹, Bruna Duque Guirardi¹, Gustavo Mattos Abreu¹, Letícia Costa Peres¹, Angélica de Cassia Oliveira Carneiro¹, Benedito Rocha Vital¹.

¹ laboratório de painéis e energia da madeira (lapem), universidade federal de viçosa, viçosa/mg, brasil – lapem@ufv.br

Resumo: O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar o ensaio de combustão espontânea estabelecido pela ONU, em carvões vegetais produzidos a partir de clones de *Eucalyptus* sp., coletados em diferentes pontos do forno (porta, fundo, meio, lados direito e esquerdo). As amostras foram preparadas e submetidas a testes em uma estufa a 140 °C, ao longo de 24 horas, com registro da temperatura a cada hora. Determinou-se a ocorrência de combustão espontânea quando a temperatura da amostra ultrapassou 60 °C acima da temperatura da estufa (140°C), ou seja, acima de 200°C. Os pontos de coleta das amostras influenciaram na qualidade do carvão vegetal. Independentemente da localização das amostras coletadas não houve combustão espontânea do carvão vegetal.

Palavras-chave: Transporte, Classe de risco 4.2, Resolução ANTT nº 5.947/21.

Quality and spontaneous combustion of *Eucalyptus* sp. charcoal collected at different positions in the kiln

Abstract: The main objective of this research was to evaluate the spontaneous combustion test established by the UN, on charcoal produced from *Eucalyptus* sp. clones, collected at different points in the kiln (door, bottom, middle, right and left sides). The samples were prepared and tested in an oven at 140 °C for 24 hours, with the temperature recorded every hour. Spontaneous combustion was determined when the sample temperature exceeded 60 °C above the oven temperature (140 °C), i.e. above 200 °C. The sampling points influenced the quality of the charcoal. Regardless of where the samples were taken, there was no spontaneous combustion of the charcoal.

Keywords: Transportation, Risk Class 4.2, ANTT Resolution No. 5,947/21.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, representando 12% da produção global (IBÁ, 2023). Em 2020, a produção alcançou 6,14 milhões de toneladas, com mais de 90% provenientes de madeira de florestas plantadas, principalmente do gênero *Eucalyptus*. Essa demanda é elevada devido à sua importância como matéria-prima para a produção de ferro-gusa e, principalmente, por sua baixa emissão de gases tóxicos.

Contudo, o setor ainda encara um custo elevado no transporte, devido à classificação do carvão vegetal como carga perigosa pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), conforme estabelecido na Resolução nº 420 e atualizado pela Resolução nº 5.947, de 1º de junho de 2021. Essa legislação categoriza o produto como Classe 4.2, devido ao risco de combustão espontânea. De acordo com Castells et al. (2020), a combustão espontânea ocorre quando um material inicia o processo de queima, sem depender de uma fonte externa para iniciar a ignição.

Conforme apontado por Rohde (2005), o carvão vegetal submetido a uma temperatura final de carbonização entre 260 e 280 °C apresenta uma temperatura de ignição situada entre 340 e 360 °C. No entanto, para temperaturas finais de carbonização mais elevadas, variando entre 1000 e 1500 °C, a temperatura de ignição do material é observada na faixa de 600 a 800 °C.

Nesse contexto, as altas temperaturas causam a degradação dos componentes químicos da madeira, resultando na diminuição dos materiais voláteis e, conseqüentemente, no aumento do carbono fixo. Tais fatores que juntos impedem a possível combustão do carvão vegetal.

Sob essa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades e o risco de combustão espontânea de amostras de carvão vegetal coletados em diferentes pontos do forno.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção do material e preparação

Os carvões vegetais utilizados nesse estudo foram provenientes de carbonizações da madeira do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em uma unidade de produção de carvão vegetal.

Para realizar o teste de combustão espontânea e obter a qualidade do carvão vegetal, foram coletadas amostras em várias posições distintas do forno (Figura 1). A coleta foi setorizada, abrangendo as áreas de meio, porta, fundo e os lados direito e esquerdo do forno. Após a coleta, as amostras foram subdivididas em quadrantes e, em seguida, os quadrantes opostos foram homogeneizados e retiradas amostras com aproximadamente 50 Kg para os ensaios de composição química imediata, densidade a granel, densidade aparente e teste de combustão espontânea.

Figura 1. Fluxograma dos pontos de coleta das amostras de carvão vegetal nas diferentes posições do forno.



Fonte: O próprio autor

2.2 *Análises realizadas*

O teor de umidade do carvão vegetal foi determinado seguindo a metodologia descrita na norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986). A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada de acordo com a norma NBR 6922 (ABNT, 1981). A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi obtida de acordo com a norma NBR 9165 (ABNT, 1985). A composição química imediata do carvão vegetal (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) foi determinada de acordo a metodologia descrita na norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

Após as análises os dados das propriedades do carvão vegetal foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) a 5% de significância e tendo diferenças significativas, foi realizado o teste Tukey também a 5% de significância.

2.3 Ensaio de combustão espontânea

A avaliação da combustão espontânea no carvão vegetal foi conduzida conforme as diretrizes do Manual de Ensaios e Critérios (Recomendações Sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas) da Organização das Nações Unidas (ONU, 2019). As amostras de carvão vegetal selecionadas foram submetidas a uma granulometria específica, variando entre 19 e 25 mm.

Em seguida, foram preparadas e submetidas a testes em uma estufa a 140 °C por um período de 24 horas, com o monitoramento da temperatura a cada hora. A ocorrência de combustão espontânea foi identificada quando a temperatura da amostra excedeu 60 °C em relação à temperatura da estufa (140°C), atingindo valores superiores a 200°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das propriedades do carvão vegetal de eucalipto proveniente de diferentes posições dentro do forno.

Tabela 1. Propriedades dos carvões vegetais em diferentes posições do forno circular.

Posição do forno	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade a granel (Kg/m ³)	Teor de materiais voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de carbono fixo (%)
Porta	6,24 ab	453,89 a	162,81 a	15,16 ab	0,63 a	84,22 bc
Meio	6,25 ab	457,92 a	155,19 a	15,56 ab	0,72 a	84,73 bc
Fundo	6,78 a	458,39 a	164,92 a	16,07 a	0,85 a	83,07 c
Lado direito	6,52 ab	505,51 a	164,92 a	10,29 c	0,66 a	89,05 a
Lado Esquerdo	5,90 b	470,09 a	172,82 a	12,00 bc	0,77 a	87,23 ab

Valores médios seguidos de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Nota-se que os menores valores de materiais voláteis foram obtidos nos carvões provenientes das laterais do forno (Lado direito e lado esquerdo) e consequentemente tiveram, os maiores teores de carbono fixo. Isso se deve as maiores temperaturas e taxas de aquecimentos nestas posições, uma vez que os controladores de ar ficam posicionados na lateral dos fornos, dois em cada lado da

parede. Logo, essas regiões são as mais quentes, promovendo maior degradação térmica da madeira.

Estudos destacam que o teor de cinzas para o carvão vegetal de várias espécies de eucalipto é consistentemente inferior a 1%, conforme evidenciado por Lima *et al.* (2011), Neves *et al.* (2011), Santos *et al.* (2011), Oliveira *et al.* (2010), Botrel *et al.* (2007) e Trugilho *et al.* (2005), o que está em concordância com os resultados encontrados nesta pesquisa. Diversos fatores podem influenciar o teor de cinzas, incluindo possíveis contaminações que podem ocorrer após a abertura dos fornos, como a presença de barro ou areia. Não houve efeito da posição do forno no teor de cinza dos carvões vegetais.

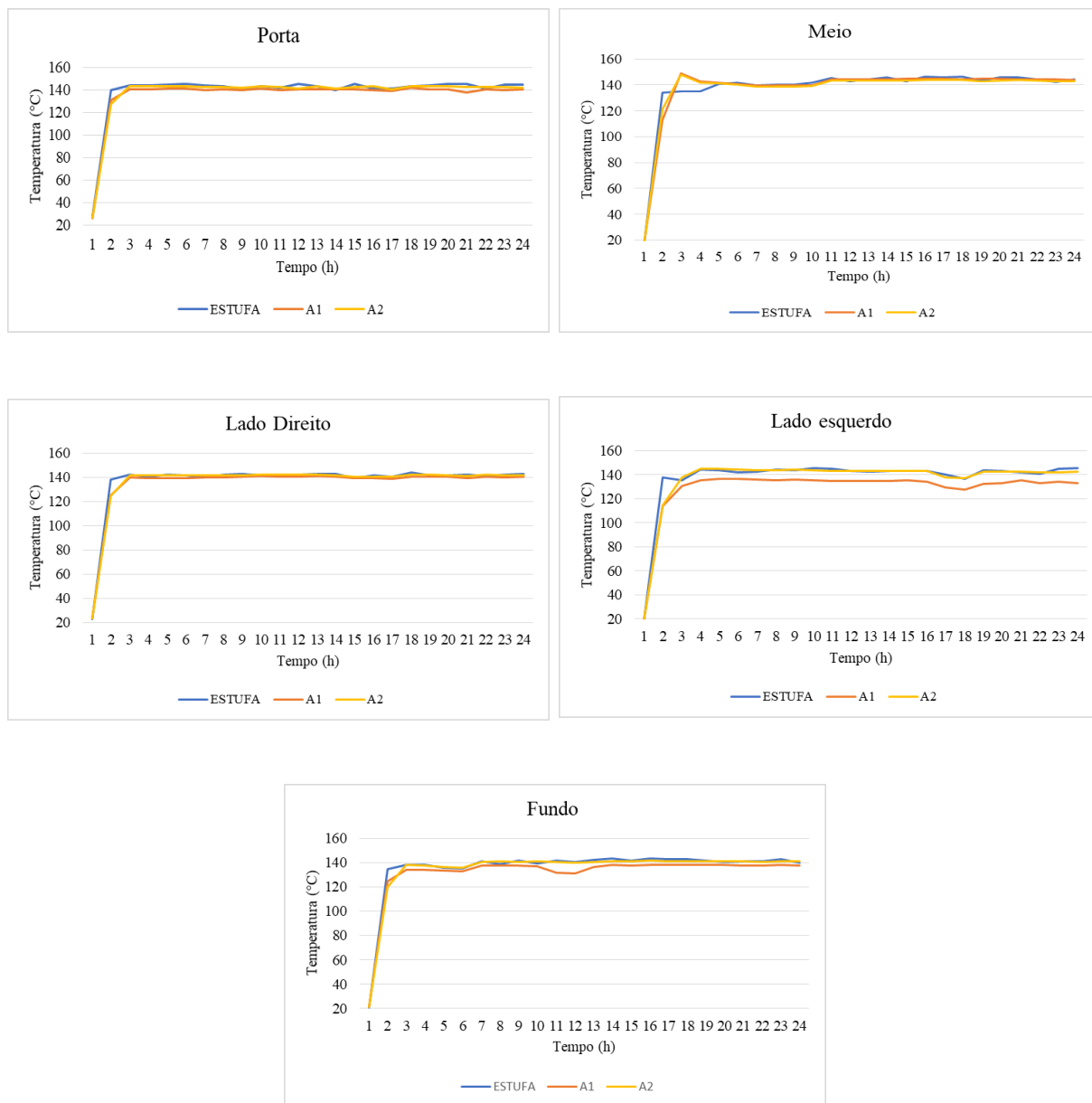
O teor de carbono fixo do carvão vegetal é uma das características mais importantes no procedimento de qualificação, uma vez que está diretamente correlacionado com o poder calorífico desse combustível (BATAUS *et al.*, 1989) e quantidade de carbono por unidade de volume dentro do alto forno. Verifica-se que os teores médios de carbono fixo tiveram valores satisfatórios, visto que segundo Rosillo-Calle; Bezzon (2005), o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter teor de carbono fixo superior a 75%. Valores inferiores de carbono fixo afetam o consumo específico de redutor e, conseqüentemente, a produção de ferro-gusa.

Na Figura 2 são apresentados os gráficos dos ensaios de não combustão espontânea do carvão vegetal em função da posição do forno.

Verifica-se que as temperaturas dos carvões vegetais, independentemente da posição do forno, permaneceram em torno de 140 °C, evidenciando o não incremento da temperatura ao longo do tempo de ensaio, sistema em equilíbrio, ou seja, não houve ocorrência de autocombustão (Figura 2).

Nesse sentido, a combustão espontânea é um fenômeno químico que resulta da interação entre materiais combustíveis e oxigênio, desencadeando uma gradual liberação de calor. Esse calor interno, gerado por reações exotérmicas, eleva a temperatura dos materiais, levando-os a atingir níveis superiores aos do ambiente (ANTT, 2004). A autoignição do carvão vegetal pode ocorrer durante a carbonização, principalmente devido à falta de controle do operador. Isso pode ocorrer após o ciclo de carbonização, se o resfriamento não for feito corretamente, ou devido ao manuseio inadequado, como colocá-lo em caminhões enquanto ainda está quente (DIAS *et al.*, 2002; ROHDE, 2005).

Figura 2. Teste de autocombustão do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp., coletados em diferentes posições dentro do forno circular (Onde: A1 = repetição 1 e A2 = repetição 2).



Fonte: O próprio autor

4. CONCLUSÃO

Os pontos de coleta das amostras dentro do forno influenciaram na qualidade do carvão vegetal, tendo as posições laterais menor teor de materiais voláteis e maior teor de carbono fixo.

Independentemente da posição de coleta das amostras dentro do forno, não houve combustão espontânea do carvão vegetal.

5. AGRADECIMENTOS

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), à Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e à EMBRAPA Fibras Florestais.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Resolução Nº 420, de 12 de fevereiro de 2004.** Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/transporte/documentos/Resolucao-ANTT-420.pdf>. Acesso em: 26 abril 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9165:** carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6922:** Carvão vegetal – Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel). 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:** Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:** Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BATAUS, Y. S. de L. *et al.* **Carbonização integral de frutos de palmáceas.** Brasília: IBAMA, LPF, 1989. (Série Técnica, 2).

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

CASTELLS B.; AMEZ I.; MEDIC L; TORRENT J. G. Particle Size Influence on the Transport Classification Labels and Other Flammability Characteristics of Powders. **Applied Sciences**, v. 10, 8601, 2020.

CETEC - **Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Produção e Utilização de Carvão Vegetal.** Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 393 p. 1982.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade.** Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 173 p. 1982.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual Ibá 2023.** São Paulo. 2023. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-compactado.pdf>> Acesso em: 22 abril. 2024.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011.

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. 319-330, 2011.

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

ROHDE, G. M. **Evidências Científicas da Impossibilidade da Combustão Espontânea do Carvão Vegetal Produzido no Estado do Rio Grande do Sul.** Série Técnica Especial. CIENTEC, Porto Alegre, 2005.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. **Produção e uso industriais do carvão vegetal.** In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SOARES, J. D. **Parâmetros para determinar a resistência mecânica de carvão vegetal em prensa hidráulica.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

UNITED NATIONS – ONU. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. **Manual of tests and criteria.** Seventh revised edition. New York and Geneva, 2019.