

Variação radial de temperatura durante o resfriamento do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Dandara Paula da Silva Guimarães¹; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro¹; Evanderson Luis Capelete Evangelista¹; Samuel Fernandes de Souza¹; Raquel Júlia Cipriano dos Santos¹; Geisianne de Carvalho Almeida¹

¹Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, Brasil – lapem@ufv.br

Resumo: O objetivo da pesquisa foi avaliar o perfil radial de temperatura do carvão vegetal no resfriamento em função do diâmetro e das propriedades físicas e químicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Utilizou-se toretes de 30 cm de comprimento em três classes de diâmetro (9, 11 e 13 cm) e o monitoramento da temperatura foi feito por meio de termopares dispostos longitudinalmente e radialmente na madeira. O resfriamento ocorreu mais rapidamente em peças de menor diâmetro e de maior densidade. A maior área de troca térmica entre o reator e o ambiente externo favoreceu o fluxo de calor. As variáveis com maior influência no tempo de resfriamento foram a densidade, o diâmetro da madeira e a porosidade do carvão vegetal. O clone do gênero *Corymbia* teve a menor diferença radial de temperatura ao final do resfriamento, proporcionando um fluxo de calor mais homogêneo na peça de carvão vegetal.

Palavras-chave: Fluxo de calor, Porosidade, Densidade, Classe diamétrica.

Radial temperature profile of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones during charcoal cooling

Abstract: The objective of the research was to evaluate the radial temperature profile of charcoal during cooling process as a function of the diameter and the physical and chemical properties of wood from *Eucalyptus* and *Corymbia* clones. Wood logs 30 cm in length were used in three diameter classes (9, 11, and 13 cm), and the temperature was monitored using thermocouples placed longitudinally and radially in the wood. Cooling occurred more rapidly in smaller diameter pieces and in denser wood. The larger heat exchange area between the reactor and the external environment favored the heat flow. The variables with the greatest influence on cooling time were density, wood diameter, and charcoal porosity. The *Corymbia* clone showed the smallest radial temperature difference at the end of cooling, providing a more homogeneous heat flow in the charcoal piece.

Keywords: Heat flow, Porosity, Density, Diameter class.



Engenharia
Industrial
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA

1. INTRODUÇÃO

A madeira, principal biomassa utilizada na cadeia produtiva do carvão vegetal, tem inúmeras variáveis capazes de afetar todo o ciclo de carbonização, desde a degradação da madeira até o resfriamento do carvão vegetal e a sua posterior aplicação (Fortaleza et al., 2019; Protásio et al., 2021).

Um dos maiores obstáculos enfrentados na produção de carvão vegetal é a etapa de resfriamento, fase crítica que pode representar mais de 70% de todo o tempo do ciclo de produção. Esta etapa, influenciada pelas características da matéria-prima, controle de processo e manutenção adequada dos fornos, é fundamental para garantir a o rendimento e a qualidade do carvão vegetal (Oliveira et al., 2015).

Considerando a importância do resfriamento e o impacto das características da madeira no ciclo de carbonização, entender a dinâmica desse processo em função dessas variáveis é essencial para a assertividade da indústria na produção de carvão vegetal. Posto isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação radial de temperatura na etapa de resfriamento do carvão vegetal em função do clone, da classe diamétrica e das propriedades da madeira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização das carbonizações foram utilizadas madeiras de 3 clones, um híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* (Clone A) e um *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp (Clone B) e um clone de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* (Clone C), seccionados em toretes 30 cm comprimento, umidade base seca inferior a 20% e em três classes de diâmetro (9, 11 e 13 cm \pm 1 cm). Foram inseridos seis termopares tipo J com revestimento de fibra em malha trançada, diâmetro de 2 mm e haste de ferro + constantan ao longo do comprimento dos toretes em três profundidades (raio, raio/2, (raio/2)/2) no sentido radial, denominadas central, intermediária e superficial. Em seguida, os toretes foram inseridos em um container metálico com dimensões nominais de 0,430 m x 0,160 m x 0,160 m e as carbonizações foram realizadas em forno elétrico do tipo mufla, modelo GP Científica-2000.

Foram definidos parâmetros de carbonização e de resfriamento para a condução do experimento (Tabela 1) e ao final, foi obtido o perfil radial de

temperatura da peça de carvão vegetal, no sentido superfície-centro.

Tabela 1. Parâmetros de processo utilizados na condução do experimento

Parâmetros de processo	
Temperatura final de carbonização (°C)	400
Temperatura final de resfriamento (°C)	≤ 45
Carbono fixo (%)	75 ± 3
Intervalo de monitoramento da carbonização (h)	0,5
Intervalo de monitoramento do resfriamento (h)	1

O perfil de temperatura radial foi analisado utilizando-se a equação 1.

(Equação 1)

Em que, PTR: Perfil de temperatura radial; T_{central}: Temperatura no centro da peça de carvão vegetal; T_{superficial}: Temperatura na superfície da peça de carvão vegetal.

As propriedades da madeira e do carvão vegetal (Tabela 2) foram determinadas para análise das variáveis que mais influenciaram no processo.

Tabela 2. Propriedades da madeira, do carvão vegetal e metodologias utilizadas

Propriedade	Metodologia
Densidade básica	ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984).
Densidade aparente	ABNT NBR 9165 (ABNT, 1985)
Porosidade	ABNT NBR 9165 (ABNT, 1985)
Análise Química Imediata	NBR 6923 (ABNT, 1981); NBR 8112 (ABNT, 1986).

O experimento foi analisado segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial, comparando-se os 3 clones e 3 classes de diâmetro em 2 repetições, totalizando 18 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de *Lilliefors* e de *Cochran* e à análise de variância (ANOVA). Observando-se diferenças significativas, aplicou-se teste de Tukey a 5% de significância. Para a análise estatística dos dados foi utilizado o software Sisvar, versão 5.6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

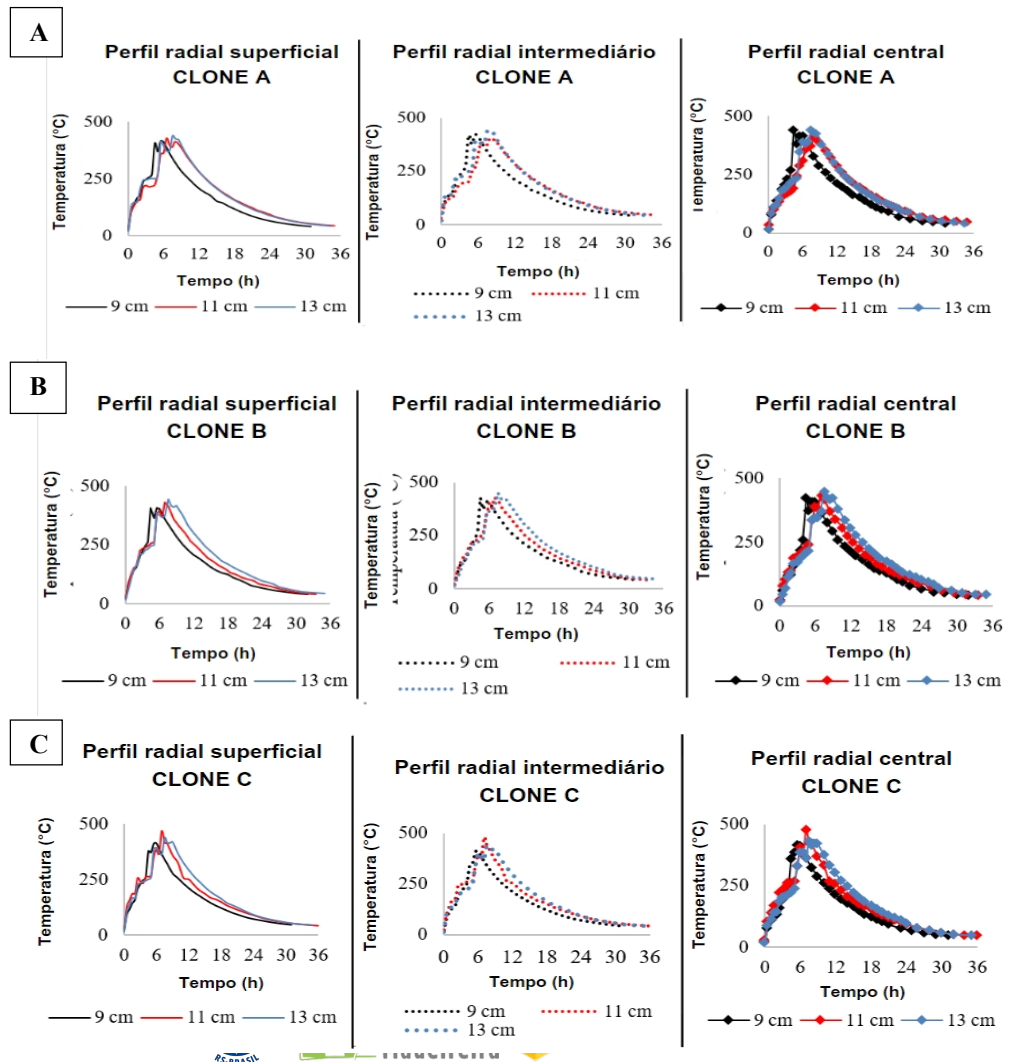
Os perfis radiais superficial, intermediário e central de temperatura durante a carbonização e o resfriamento foram obtidos para os três clones e as três classes diamétricas (Figura 1)

Para todas as posições radiais, independente do material genético, a menor classe de diâmetro resfriou mais rapidamente do centro para a superfície da peça

de carvão vegetal, com os menores tempos e as menores temperaturas de resfriamento, visto que menores diâmetros exigem menos tempo para que a energia térmica migre da região central da madeira para a região superficial (Shen et al., 2009; Jesus et al., 2019).

A maior área de troca térmica disponível entre o carvão vegetal, o interior do contêiner metálico e o ambiente externo favoreceu o fluxo de calor, permitindo maior remoção de energia térmica dos carvões produzidos com madeiras de menor diâmetro.

Figura 1. Perfil de temperatura em diferentes posições radiais de temperatura nas etapas de carbonização e resfriamento em função do clone e da classe de diâmetro. A) Posições radiais do clone A; B) Posições radiais do clone B e; C) Posições radiais do clone C



A maior densidade do carvão vegetal nas menores classes diamétricas

favoreceu as trocas térmicas, devido à menor quantidade de espaços vazios na madeira, diminuindo o isolamento térmico radial e, conseqüentemente, contribuindo para a transferência de calor do meio interno para o meio externo, reduzindo o tempo de resfriamento (Pellegrini, 2019; Ramos et al., 2023).

À medida que o carvão vegetal perdeu calor para o meio, a diferença entre a superfície e o centro da peça de carvão vegetal diminuiu (Figura 2), devido à menor diferença de temperatura entre o meio externo e o carvão vegetal, reduzindo a velocidade da perda de calor ao longo do tempo. Ressalta-se que quanto maior a diferença de temperatura, maior será a força motriz para a transferência de calor durante o resfriamento e à medida que essa variação é reduzida, o fluxo de calor diminui (Incropera, 2014; Figueiró, 2022).

Em uma análise comparativa da diferença de temperatura do resfriamento no sentido radial, ou seja, da diferença de temperatura entre as superfícies e o centro da peça desde o fim da carbonização até o fim do resfriamento, observou-se que a diferença de temperatura do carvão vegetal do clone C foi 34,2% menor que a do clone A e 9,8% que a do clone B. A menor porosidade e maior densidade aparente do clone C fez com que a diferença radial de temperatura fosse menor ao final do resfriamento, proporcionando um fluxo de calor mais homogêneo na peça de carvão vegetal (Santos et al., 2020; Carrasco et al., 2016; Jesus et al., 2019).

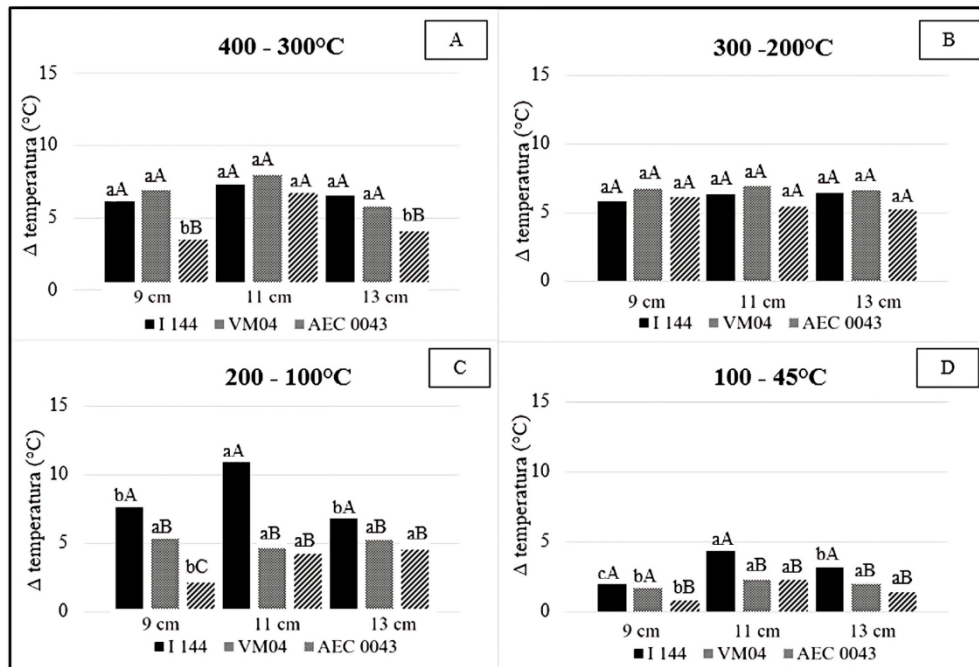
A porosidade teve grande impacto na perda térmica durante o resfriamento do carvão vegetal. Os poros são espaços vazios que acentuam a anisotropia na difusão da energia, desfavorecendo o fluxo de calor e se comportando como uma barreira extra, implicando em temperaturas mais elevadas na região central em relação à superfície do carvão vegetal (França e Campos, 2002; Figueiró, 2022).

Próximo às etapas finais do resfriamento, mais especificamente no intervalo de 200 a 100°C (Figura 2C), percebe-se maior resistência para a saída de calor, visto que a transferência de calor se dá pela diferença de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo e, quanto menor essa diferença, menor será a força e a velocidade de saída da energia térmica (Incropera, 2014).

Observou-se que para a classe 9 cm de diâmetro, houve diferença significativa entre os carvões vegetais dos clones A, B e C, com a maior diferença de temperatura da superfície para o centro da peça atribuída ao carvão vegetal do clone A (7,63°C) e a menor diferença atribuída ao carvão vegetal do clone C

(2,17°C), sendo a densidade, neste caso, a principal propriedade do carvão vegetal responsável por influenciar a transferência de calor. Destaca-se que o carvão vegetal do clone C foi 31,25% mais denso do que o carvão vegetal do A.

Figura 2. Diferença de temperatura (Δ) no sentido centro-superfície em função do clone e da classe de diâmetro durante o resfriamento



Teste de Tukey à 5% de significância. Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones.

Já no intervalo entre 100 e 45°C (Figura 2D), observou-se diferença estatística no carvão vegetal produzido a partir das madeiras de menor diâmetro, visto que as peças têm menor diferença de temperatura entre a superfície e o centro da peça de carvão. Na menor classe de diâmetro, há maior área de troca de calor entre o carvão vegetal e o contêiner metálico, além da menor massa de carvão nessa classe diamétrica, facilitando as trocas térmicas com o meio externo.

Ressalta-se que maior densidade na menor classe diamétrica (9 cm) também é um fator que colabora para a maior transferência de calor. A menor massa e a maior área de transferência de calor por convecção favorecem a etapa de resfriamento, que possui decaimento exponencial de temperatura. Ademais a condutividade térmica transversal em uma peça de madeira é de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ menor do que a longitudinal, portanto, quanto menor o diâmetro, maior será a facilidade de transferência de calor (Jesus et al., 2019; Figueiró, 2022).

4. CONCLUSÃO

O resfriamento do carvão vegetal no sentido radial ocorreu mais rapidamente em peças de menor diâmetro e de maior densidade.

Maiores áreas de troca térmica entre o reator e o meio externo, favoreceram o fluxo de calor, reduzindo o tempo de resfriamento.

As variáveis da madeira e do carvão vegetal que mais influenciaram no tempo de resfriamento foram a densidade da madeira, a porosidade do carvão vegetal e o diâmetro da peça.

A menor variação radial de temperatura ocorreu no clone C (*Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*), proporcionando um fluxo de calor mais homogêneo na peça de carvão vegetal.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), à Sociedade de Investigações Florestais.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 6923 **Carvão vegetal: amostragem e preparação da amostra**. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: **Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: 2003. 6p.

CARRASCO, E.V. M.; OLIVEIRA, A. L. O.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 389-400, 2016.

FIGUEIRÓ, C.G. **Secagem artificial de toretes de madeira de eucalipto para uso em retortas contínuas de carbonização**. 2022. 61 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.

FORTALEZA A. P.; FILHO J. J. P. N.; CERETTA R. P. S.; BARROS D. S.; SILVA S. S. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436–1451, jul. 2019.

FRANÇA, G.A.C.; CAMPOS, M.B. Análise teórica e experimental do resfriamento de carvão vegetal em forno retangular. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online**... Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100017&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 16 de julho de 2021.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 7ª Edição, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. 2023. **Relatório 2023**: ano base 2022. 2023, 87 p.

JESUS, M. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MARTINEZ, C. L. M.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. P. S.; ASSIS, M. R. Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. **Wood Science and Technology**, v.53, n.6, p.1353-1372, Nov. 2019.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; RODRIGUEZ, A. V.; AMARAL, B. M. N.; PEREIRA, B. L. C. Artificial cooling in rectangular kilns for charcoal production. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, n. 39, v. 4, p. 769-778, 2015.

PELLEGRINI, C. DE C. A busca pelo copo ideal: um estudo de otimização em transferência de calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. e20180234, 2019.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 64, p. 34 – 45, 2021.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; SIQUEIRA, H. F. de; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. e48302, 2023.

SANTOS, I.S.; MARTINS, M.A.; PEREIRA, E.G.; CARNEIRO, A.C.O.; Physical and thermal Properties of *Eucalyptus* wood charcoal. **Carne**, v. 26, n. 1, p.109-117, 2020

SHEN, J.; WANG, X. S.; GARCIA-PEREZ, M.; MOURANT, D.; RHODES, M. J.; LI, C. Z. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. **Fuel**, China, v.88, n.10, p. 1810-1817, jan. 2009.