

DANDARA PAULA DA SILVA GUIMARÃES

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES E DA CLASSE DIAMÉTRICA DE CLONES
DE *Eucalyptus* E *Corymbia* NA DINÂMICA DE RESFRIAMENTO DO CARVÃO
VEGETAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Coorientadores: Márcio Arêdes Martins
Ana Márcia M. Ladeira Carvalho
Laercio Antonio G. Jacovine

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

G963i
2023
Guimarães, Dandara Paula da Silva, 1995-
Influência das propriedades e da classe diamétrica de clones de
Eucalyptus e *Corymbia* na dinâmica de resfriamento do carvão vegetal
/ Dandara Paula da Silva Guimarães. - Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (95 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Referências bibliográficas: f. 83-95.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.575>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Carvão vegetal - Resfriamento. 2. Eucalipto. 3. *Corymbia*
(*Myrtaceae*). I. Carneiro, Angélica de Cássia Oliveira, 1974-. II.
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GDFC adapt. CDD 634.98675

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

DANDARA PAULA DA SILVA GUIMARÃES

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES E DA CLASSE DIAMÉTRICA DE CLONES
DE *Eucalyptus* E *Corymbia* NA DINÂMICA DE RESFRIAMENTO DO CARVÃO
VEGETAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 04 de julho de 2023.

Assentimento:



Dandara Paula da Silva Guimarães

Autora



Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Orientadora

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo cuidado, pela força, amor incondicional e por permitir que eu alcançasse os meus objetivos.

A minha mãe, Rosane Silva, por ser minha inspiração, meu exemplo e minha motivação, pela presença e por viver meus sonhos comigo, entregando tudo de si pela minha felicidade. A minha família pelas orações, carinho e apoio em todos os momentos da minha vida.

A minha orientadora e amiga, Cássia Carneiro, pela liderança, pelos conselhos, ensinamentos diários, pelas oportunidades de crescimento e por acreditar no meu potencial, sempre buscando me tornar uma pessoa e profissional melhor.

Aos professores e professoras da Universidade Federal de Viçosa pelas orientações, generosidade e apoio para que eu pudesse desenvolver a minha pesquisa. Em especial, ao Márcio Arêdes, Leonardo Bhering e Iara Demuner.

Ao San, pelo encorajamento, pela parceria e por não ter medido esforços para me apoiar na coleta de dados e em todo desenvolvimento do trabalho, além de todo apoio emocional, amor, carinho e paciência.

A toda equipe do LAPEM e LPM, meus estagiários, todos os funcionários e pesquisadores que contribuíram com o meu projeto e com o meu desenvolvimento, principalmente a minha equipe do Projeto Resfriamento e a equipe do Forno.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela infraestrutura, apoio e pelo trabalho de todos os funcionários, em especial, o Alexandre e o Dilson da secretaria da pós-graduação, pela dedicação, empatia e cuidado com os pós-graduandos.

A SIF e ao Grupo Temático em Carvão Vegetal Sustentável pela oportunidade de crescimento e pelos ensinamentos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação na melhor do Brasil.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

GUIMARÃES, Dandara Paula da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Influência das propriedades e da classe diamétrica de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* na dinâmica de resfriamento do carvão vegetal.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Márcio Arêdes Martins, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Laercio Antônio Gonçalves Jacovine.

O resfriamento dos fornos de carvão vegetal é crítico, pois pode consumir mais de 70% do tempo total do ciclo de carbonização. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência do diâmetro e das propriedades da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* (Híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp.) e *Corymbia* (*Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*) no processo de resfriamento. Para a carbonização foram utilizadas madeiras de 30 cm de comprimento em diferentes classes de diâmetro (9, 11 e 13 cm). O monitoramento da temperatura foi feito por meio de termopares dispostos longitudinalmente e radialmente na madeira. A madeira e o carvão vegetal do clone AEC 0043 tiveram os maiores tempos de carbonização e de resfriamento, resultando em um incremento médio de 14,52% no tempo total de ciclo com o aumento da classe de diâmetro. Em carvões vegetais mais porosos, a troca de calor tendeu a ser menor do que em carvões vegetais mais densos. Porém, maiores quantidades de massa no interior do reator de carbonização, ou seja, maiores quantidades de energia a ser removida, diminuíram a capacidade de dissipação da energia térmica. Independente do material genético ou do diâmetro, o resfriamento seguiu o mesmo comportamento de decaimento de temperatura em função do tempo, sendo explicado por um único modelo polinomial de segundo grau e obteve-se uma redução média de $89,5 \pm 0,5\%$ da energia térmica contida no carvão vegetal ao final da carbonização. Do início ao final do resfriamento, a diferença de temperatura no sentido radial foi 2,3 vezes menor do que no sentido longitudinal. As principais propriedades da madeira que afetaram as taxas de aquecimento e de resfriamento foram o teor de umidade, a densidade básica, a composição química estrutural, a relação cerne/alburno e a permeabilidade. Para o carvão vegetal, foram a porosidade e a densidade aparente. Assim, concluiu-se que os menores tempos de resfriamento ocorreram nas menores classes de diâmetro e para os clones de *Eucalyptus*.

Palavras-chave: Curvas de carbonização. Transferência de calor. Porosidade. Fluxo de energia.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Dandara Paula da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2023. **Influence of properties and diametric class of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones on charcoal cooling dynamics.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisors: Márcio Arêdes Martins, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho and Laercio Antônio Gonçalves Jacovine.

The cooling stage of charcoal kilns is critical because it can consume more than 70% of the total carbonization cycle time. Therefore, the objective of this research was to assess the influence of the diameter and properties of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones (spontaneous hybrid of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp.) and *Corymbia* (*Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*) on the cooling process. For carbonization, which was conducted in a muffle furnace, wood pieces measuring 30 cm in length with different diameter classes (9, 11, and 13 cm) were used. Temperature monitoring during carbonization and cooling was carried out using thermocouples placed longitudinally and radially in the wood. Wood and charcoal from clone AEC 0043 had the longest carbonization and cooling times, resulting in an average increase of 14.52% in the total cycle time with an increase in diameter class. In more porous charcoal, heat exchange tended to be lower than in denser charcoal. However, larger quantities of mass inside the carbonization reactor, meaning more energy to be removed, reduced the capacity to dissipate thermal energy. Regardless of the genetic material or diameter, cooling followed the same temperature decay behavior over time, explained by a single second-degree polynomial model, and an average reduction of $89.5 \pm 0.5\%$ of the thermal energy contained in the charcoal was obtained at the end of carbonization. From the beginning to the end of cooling, the temperature difference in the radial direction was 2.3 times smaller than in the longitudinal direction. The main wood properties that affected heating and cooling rates were moisture content, basic density, structural chemical composition, heartwood/sapwood ratio, and permeability. For charcoal, it was porosity and bulk density. Thus, it was concluded that shorter cooling times occurred in smaller diameter classes and for *Eucalyptus* clones.

Keywords: Carbonization curves. Heat transfer. Porosity. Energy flux.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema metodológico do experimento	30
Figura 2. Posição dos termopares inseridos no torete de madeira.....	32
Figura 3. Representação esquemática do sistema para carbonização e resfriamento da madeira Fonte: Autor (2023)	32
Figura 4. Curva de carbonização e de resfriamento dos clones em função da classe de diâmetro. (A) I 144; (B) VM04; (C) AEC 0043	43
Figura 5. Deposição de alcatrão no carvão vegetal do clone AEC0043 de 11 cm de diâmetro	48
Figura 6. Taxa de aquecimento da carbonização (°C/h) dos clones em função da classe diamétrica	49
Figura 7. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono	51
Figura 8. Tempo de transferência de calor da carbonização (°C/h) dos clones em função da classe diamétrica.....	54
Figura 9. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais; D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono	55
Figura 10. Taxa de resfriamento (°C/h) dos clones em função da faixa de temperatura	57
Figura 11. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono	59
Figura 12. Tempo de transferência de calor (min/°C) em função do clone e da classe de diâmetro durante o resfriamento.....	62
Figura 13. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono	63
Figura 14. Similaridade entre as curvas de resfriamento	66

Figura 15. 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 I 144; B) Posições radiais do clone VM04 e; C) Posições radiais do clone AEC 0043	68
Figura 16. Gradiente de temperatura no sentido radial em função da classe de diâmetro e dos clones. A) Carbonização; B) Resfriamento	70
Figura 17. Diferença de temperatura (Δt) no sentido centro-superfície em função do clone e da classe de diâmetro durante a carbonização	72
Figura 18. Diferença de temperatura (Δ) no sentido centro-superfície em função do clone e da classe de diâmetro durante o resfriamento	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplos de coeficientes de condutividade térmica	26
Tabela 2. Exemplos de valores de calor específico	27
Tabela 3. Exemplos de valores de difusividade térmica.....	28
Tabela 4. Valores de temperatura de ignição do carvão vegetal	28
Tabela 5. Informações sobre os clones utilizados no experimento	31
Tabela 6. Propriedades da madeira dos clones de Eucalyptus e Corymbia.....	38
Tabela 7. Tempos de carbonização em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira	45
Tabela 8. Tempos de resfriamento em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira	46
Tabela 9. Tempos totais de ciclo em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira .	47
Tabela 10. Resumo dos resultados do grau de ajuste dos modelos	66
Tabela 11. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal.....	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1. Gêneros <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i>	16
3.2. Processo de carbonização	16
3.3. Resfriamento do carvão vegetal.....	17
3.4. Efeito da densidade e da porosidade no resfriamento do carvão vegetal	18
3.5. Efeito da granulometria, do diâmetro da madeira e do carvão vegetal no resfriamento	20
3.6. Efeito da relação cerne/alburno no resfriamento do carvão vegetal	22
3.7. Efeito do teor dos materiais voláteis da madeira no resfriamento	22
3.8. Efeito da temperatura final de carbonização no resfriamento do forno.....	23
3.9. Efeito da umidade da madeira no resfriamento do forno.....	24
3.8. Propriedades térmicas da madeira e do carvão vegetal	25
3.8.1. Condutividade térmica	25
3.8.2. Calor específico	26
3.8.3. Difusividade térmica.....	27
3.8.4. Estabilidade térmica do carvão vegetal	28
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1. Esquema metodológico.....	29
4.2. Caracterização da matéria-prima	30
4.3. Carbonização da madeira e resfriamento do carvão vegetal.....	31
4.4. Propriedades da madeira.....	34
4.5. Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal.....	35

4.6. Caracterização do carvão vegetal	36
4.7. Análise de dados e delineamento estatístico.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Caracterização da madeira	37
5.2. Perfis de temperatura	42
5.2.1. Curva de carbonização e resfriamento do carvão vegetal.....	42
5.2.2. Taxa de aquecimento (TA) da madeira durante a carbonização.....	49
5.2.3. Tempo de transferência de calor (Ttc) durante a carbonização da madeira	53
5.2.4. Taxa de resfriamento (TR) do carvão vegetal	57
5.2.5. Tempo de transferência de calor (Ttc) durante o resfriamento do carvão vegetal	62
5.2.6. Curvas de resfriamento do carvão vegetal.....	65
5.2.7. Perfil de temperatura radial (PTr) da madeira e do carvão vegetal em função do clone e da classe de diâmetro.....	67
5.3. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal.....	77
6. CONCLUSÕES	81
7. RECOMENDAÇÕES.....	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas (IBÁ, 2022), é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, com uma participação de 12% na produção mundial, sendo o único a utilizar essa matéria-prima renovável no setor siderúrgico, produzido principalmente a partir de madeira do gênero *Eucalyptus*. Em 2020, um total de 12% da produção de madeira no Brasil foi destinada à siderurgia a carvão vegetal (IBÁ, 2021). Em 2021, os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, principais produtores de carvão vegetal, registraram um aumento de 9,4% da produção em relação ao ano de 2020, tendo as indústrias siderúrgicas e de ferroligas responsáveis por 82% do consumo (BEN, 2022), evidenciando a importância econômica do produto para o país.

Além de ser renovável e sustentável, há muito potencial de produção de carvão vegetal em termos de florestas e desenvolvimento no país, porém ainda existem inúmeros desafios que afetam o rendimento, a qualidade e a competitividade do produto final e do processo, como a tecnologia de produção, a adequação do processo, a organização da cadeia produtiva, a qualidade da matéria-prima e o tempo do ciclo produtivo (FORTALEZA et al., 2019; PROTÁSIO et al., 2021). Muitos desses desafios estão correlacionados à falta de investimentos no setor, à falta de incentivos governamentais, à ausência de políticas públicas adequadas e à imagem negativa que, por muito tempo, foi associada ao carvão vegetal e ainda está sendo combatida.

Um grande obstáculo enfrentado na produção de carvão vegetal, tanto pelas grandes empresas, quanto pelos pequenos e médios produtores é a etapa de resfriamento que representa a maior parte do tempo de ciclo de carbonização. A etapa de resfriamento é influenciada pelos materiais construtivos do forno, propriedades da biomassa, condições ambientais, condições do processo e estado de conservação e manutenção dos fornos. De acordo com Oliveira et al. (2013), o tempo médio de resfriamento pode representar mais de 40% do tempo total do ciclo de carbonização e para Arruda et al. (2011), o resfriamento pode chegar a 50% do tempo total do ciclo, afirmando quão extensa é essa fase do processo.

O resfriamento do carvão vegetal é um processo de troca térmica complexo, que sofre grande influência das características da matéria-prima e também está intimamente condicionado ao controle do processo de carbonização e à manutenção adequada dos fornos, porém segue um padrão de redução de temperatura.

Atualmente, os fornos de carvão vegetal resfriam de maneira natural com tempo de resfriamento médio de 4 e 10 dias, respectivamente para os fornos circulares e retangulares de grande porte. O resfriamento é uma etapa fundamental para garantir maximizar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal, mas quando é feito de forma inadequada pode haver aumento de índices de incêndio no forno e na pilha de carvão, redução na qualidade do produto final, aumento dos custos de manutenção dos fornos, perda de rendimento em carvão (gravimétrico), redução da produtividade física dos fornos e aumento no consumo de água para redução de focos de fogo (OLIVEIRA et al., 2015).

Uma prática comum para acelerar e facilitar o resfriamento de fornos de carvão vegetal é a aplicação de barrela (barro + água), uma mistura de argila e água nas paredes, cujo objetivo é vedar qualquer infiltração de ar que possa colaborar com as reações de pirólise e aumentar a taxa de transferência de calor entre as paredes e o ambiente. Dessa forma, a massa de carvão e os gases estagnados dentro do forno trocam calor com as paredes por condução, convecção e radiação, e estas, por sua vez, transferem calor para o meio ambiente por convecção natural e radiação. (BUSTOS-VANEGAS, 2019).

Uma tecnologia alternativa para a redução do tempo da etapa de resfriamento é a utilização de trocadores de calor, dispositivos que praticam a transferência de calor forçada entre o forno e o meio externo. Porém, esse tipo de tecnologia implica em custos adicionais na produção de carvão, sendo a sua implementação, muitas vezes, inviável do ponto de vista econômico devido aos custos de energia elétrica.

Outra alternativa já estudada por autores como Reis (2009) e Oliveira Filho et al. (2010) para o resfriamento do carvão vegetal é a injeção de vapor ou água na carga produzida, mas já foi comprovado, que apesar de reduzir o tempo de resfriamento, a qualidade química e física do produto é comprometida.

Logo, considerando os obstáculos e desafios ainda existentes, no uso de sistemas artificiais, uma alternativa é buscar entender a dinâmica de resfriamento na peça de carvão vegetal em função do material genético, visto que há diferenças observadas nas práticas quando se carboniza clones com propriedades físicas e químicas distintas, o que ocasiona, na maioria das vezes a necessidade de combater os focos de fogo, mesmo atendendo o pressuposto da temperatura de abertura dos fornos de 45°C.

A transferência de calor é influenciada pela condutividade térmica da madeira e do carvão vegetal, pelo diâmetro, umidade, densidade, composição química, porosidade, dentre outras variáveis (REIS, 2009; INCROPERA, 2014; CARRASCO et. al, 2016; JESUS et. al, 2019; SANTOS et. al, 2020; RAMOS et. al, 2021). Dessa forma, acredita-se que conhecendo

as propriedades da madeira e do carvão vegetal bem como a dinâmica do resfriamento em função dessas variáveis, a indústria será mais assertiva na abertura dos fornos após a etapa de resfriamento, reduzindo a necessidade de combater os focos de fogo.

Posto isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do diâmetro e das características da madeira de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* na dinâmica de resfriamento do carvão vegetal, visando melhores práticas e diretrizes para uma produção de carvão vegetal.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do diâmetro, das propriedades da madeira e propriedades do carvão vegetal na dinâmica de resfriamento.

2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar a caracterização física e química das madeiras em função dos clones.
- b) Obter as curvas de carbonização e resfriamento de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes classes diamétricas.
- c) Avaliar o impacto do clone e da classe diamétrica no tempo de carbonização da madeira e de resfriamento do carvão vegetal;
- d) Avaliar o efeito dos clones e da classe diamétrica da madeira na taxa de aquecimento e de resfriamento do carvão vegetal;
- e) Obter o tempo de transferência de calor nas etapas de carbonização e resfriamento em função da classe diamétrica e clone;
- f) Avaliar a variação radial e longitudinal de temperatura nas etapas de carbonização e resfriamento em função do clone e classe diamétrica da madeira;
- g) Obter o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal em função do clone e classe diamétrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As principais pesquisas publicadas dedicadas a estudar especificamente o processo de resfriamento do carvão vegetal surgiram a partir de 2002, com França e Campos analisando a etapa de resfriamento em forno retangular na empresa Vallourec Florestal, por meio de uma perspectiva teórica e experimental.

Desde então, outros importantes estudos focados no resfriamento do carvão vegetal vêm sendo realizados, como Reis (2009) e Oliveira Filho et al. (2010), que testaram a injeção de vapor d'água dentro do forno para redução da etapa de resfriamento, Santos (2013), Oliveira et al. (2015) que estudaram o resfriamento artificial de fornos de carbonização, além de outras pesquisas mais recentes realizadas por Lana (2018), que testou alternativas de resfriamento do carvão externo ao forno de alvenaria, o trabalho de Bustos-Vanegas (2019) que estudou o resfriamento a partir da ótica da fluidodinâmica computacional e de Gomes et al. (2020), que analisaram a qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor.

Sabe-se que a etapa de resfriamento é a mais longa em todo o ciclo de carbonização, fato afirmado por diversos autores, como Arruda et al. (2011), Oliveira et al. (2015), Damásio et al. (2015), Bustos-Vanegas (2019), Santos et al. (2020) e Gomes et al. (2020) e hoje ainda é um grande desafio a ser superado, principalmente em produções tradicionais com fornos de alvenaria (LANA, 2018). Dessa forma, se faz necessário mais estudos sobre o processo de resfriamento e sobre os fatores que o afetam, como as propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Segundo Antal Jr. e Grønli (2003), um carvão vegetal de melhor qualidade, com um menor teor de materiais voláteis, maior densidade, com menos radicais disponíveis para realizar ligações em sua superfície e com faixa granulométrica mais estreita reduz o risco de combustão, facilitando, portanto, o processo de resfriamento do carvão.

Casanova (2012) e Santos (2013) afirmaram que o conhecimento sobre as propriedades físicas dos materiais lignocelulósicos é fundamental para o estudo de processos baseados em tratamento térmico, como a etapa de resfriamento do carvão vegetal e o ciclo de carbonização.

Carrasco et al. (2016), Jesus et al. (2019) e Santos et al. (2020) afirmaram que algumas propriedades da madeira e do carvão vegetal, como a condutividade térmica, o calor específico, a densidade, o diâmetro, a umidade, a porosidade e a granulometria são fundamentais para compreender o comportamento da etapa de resfriamento da massa de carvão vegetal no interior do forno.

3.1. Gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*

As espécies do gênero *Eucalyptus*, pertencentes à família Myrtaceae são amplamente utilizadas no Brasil, devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação em diferentes condições edafoclimáticas, alta produtividade e versatilidade de utilização da madeira (WINK, et al., 2013; LIMA et al., 2020; GOODGER et al., 2021). No Brasil, as áreas cultivadas com espécies do gênero *Eucalyptus* somam 7,53 milhões de hectares, com destaque para os estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, que têm as maiores áreas plantadas (IBÁ, 2022). Normalmente, as madeiras das espécies mais utilizadas para a produção de carvão vegetal (*Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) possuem baixa densidade básica, propriedade de fácil determinação e de grande importância para a avaliação da qualidade da biomassa energética, com valores entre 450 e 500 kg/m³ (CARNEIRO et al., 2017; LIMA et al., 2020; LOUREIRO et al., 2021; LOPES et al., 2022; MASSUQUE et al., 2023).

As madeiras do gênero *Corymbia* (Myrtaceae) têm se destacado na produção de carvão vegetal devido à elevada densidade básica e ao alto incremento volumétrico que, associados, favorecem o seu potencial energético. Além disso, o gênero é tolerante a diversas pragas, doenças e estresses ambientais, contribuindo para a sua adaptação em diferentes sítios (LOUREIRO et al., 2021; MONTEIRO et al., 2021; LOPES et al., 2022).

3.2. Processo de carbonização

A carbonização da madeira ou pirólise lenta é o processo mais usual de conversão da biomassa em carvão vegetal, no qual a matéria-prima é submetida a uma taxa de aquecimento lenta e a um longo tempo de residência, favorecendo a formação do produto carbonáceo sólido (TRIPATHI et al., 2016). É um processo termoquímico que, além da produção do carvão vegetal, forma gases condensáveis e não condensáveis e é caracterizado pela decomposição térmica da biomassa em ambientes com limitação total ou parcial de oxigênio, com temperaturas finais entre 300 e 500 °C (DAMÁSIO et al., 2015; XIN et al., 2015; KAN et al., 2016; JIANG et al., 2017; VOLPE et al., 2017; PEREIRA et al., 2017; FIGUEIRÓ et al., 2018; KAJINA et al., 2019).

O principal objetivo da pirólise lenta é concentrar carbono por meio da ação do calor, eliminando a maior parte do oxigênio e do hidrogênio contidos na madeira. Na degradação térmica da madeira, ocorre uma série de reações químicas para a sua transformação em carvão

vegetal, após a remoção da água da livre ou de capilaridade, gerando produtos sólidos, líquidos e gasosos (PEREIRA et al., 2017). Além das reações químicas, ocorre a transferência de calor e massa e a evaporação da água na forma de vapor durante a secagem (PECHA; GARCIA-PEREZ, 2015).

A madeira é a principal biomassa utilizada para a produção de carvão vegetal (KAN et al., 2016) e sua decomposição inicia em 200 °C, sendo a lignina o componente químico estrutural mais importante para o rendimento em carvão, devido à complexidade de sua estrutura, tamanho e nível de aromaticidade que garantem maior resistência à degradação térmica quando comparada à celulose e às hemiceluloses, os outros componentes químicos estruturais da madeira (PEREIRA et al., 2013).

O processo de carbonização, bem como o rendimento e a qualidade do produto final são influenciados pelas propriedades da matéria-prima, pelo diâmetro ou tamanho da partícula, pelo teor de umidade, pelas condições do processo, como a temperatura final de carbonização, a taxa de aquecimento, o tempo de exposição da madeira ao calor, o tipo e as dimensões do reator (KAN et al., 2016; JESUS et al., 2019; DONATO et al., 2020).

3.3. Resfriamento do carvão vegetal

Durante o processo de carbonização, a estrutura do forno recebe calor proveniente das reações termoquímicas que ocorrem na madeira e após este processo, inicia-se a etapa de resfriamento, a partir do fechamento do forno, com restrição total da oxigenação para interromper a degradação térmica da madeira (DAMÁSIO et al., 2015). O principal fenômeno envolvido nesta fase é o de transferência de calor entre a massa de carvão, o forno e o ambiente externo, visando a dissipação da energia térmica do forno, envolvendo o resfriamento da massa de carvão vegetal, dos gases internos, das paredes e até mesmo do piso do forno (LANA, 2018; BUSTOS-VANEGAS et al., 2019).

A taxa de resfriamento depende da perda de calor por condução, convecção, radiação e do calor gerado nas reações de oxidação dentro do leito de carvão. O tempo demandado nessa etapa depende das características dos materiais construtivos do forno, das reações de oxidação exotérmica que continuam a ocorrer no leito de carvão durante o resfriamento, dependendo da concentração de oxigênio dos gases estagnados, da matéria-prima utilizada e das condições ambientais. Em função dos materiais construtivos que, normalmente, têm baixa condutividade

térmica (alvenaria), o processo de resfriamento natural tende a ser ainda mais demorado (BUSTOS-VANEGAS et al., 2019).

Em um experimento feito por Gomes et al. (2020) utilizando trocador de calor para avaliar o efeito da taxa de resfriamento sobre a qualidade do carvão vegetal, foi observado que o resfriamento por convecção natural teve a menor taxa de resfriamento, ou seja, a menor variação da temperatura do carvão em função do tempo, comparado ao resfriamento realizado com trocador de calor, evidenciando a maior resistência térmica dos materiais construtivos do forno, desejável durante a carbonização, mas não durante o resfriamento, pois aumenta o ciclo do processo, reduzindo a produtividade das unidades de produção.

A etapa de resfriamento consome a maior parte do tempo do ciclo de produção de carvão vegetal, pois a abertura do forno somente deve ser realizada quando a temperatura de segurança, por volta de 45°C, é alcançada para evitar a ignição de parte da massa de carvão. Segundo Oliveira et al. (2010), o tempo médio da etapa de carbonização em um forno retangular com 700 m³ de capacidade nominal é de aproximadamente 4 dias, enquanto o período de resfriamento natural varia entre 8 a 13 dias, a depender das condições ambientais. A partir de experiências de campo, a temperatura de abertura dos fornos recomendada se encontra abaixo de 40°C para a segurança dos trabalhadores (DAMÁSIO et al., 2015). De modo geral, na prática, as empresas do setor siderúrgico utilizam temperaturas de 45°C, como referência. Vale salientar que mesmo utilizando essa temperatura, muitas vezes ocorrem focos de fogo evidenciando a influência da madeira na dinâmica do resfriamento.

3.4. Efeito da densidade e da porosidade no resfriamento do carvão vegetal

A densidade à granel do carvão vegetal está intimamente associada à sua granulometria e, deste modo, a massa de carvão gerada durante a carbonização tende a ter menos espaços vazios, em decorrência das menores granulometrias que ocupam esses espaços, dificultando a passagem dos gases pela carga de carvão vegetal (FIGUEIRÓ, et al., 2019). Portanto, a granulometria interfere a movimentação dos gases nas pilhas de carvão, fundamental para ocorrência das trocas de calor entre o material e o meio externo que são necessárias para o resfriamento adequado.

De acordo com França e Campos (2002), a porosidade do leito de carvão vegetal está intrinsecamente relacionada à sua densidade. Quanto maior for a densidade à granel do carvão,

menor será o percentual de poros espaços vazios no leito, facilitando a troca de calor de calor com o meio.

A massa de carvão vegetal produzida ao final do processo possui uma granulometria diversa e, em consequência disso, a porosidade do leito é heterogênea (SANTOS, 2013; SANTOS et al., 2020). Na pilha de carvão vegetal, os espaços vazios entre as peças se comportam como uma resistência extra à troca de calor entre a massa de carvão e o meio externo, além de intensificarem a anisotropia da difusão do calor, favorecendo a movimentação no sentido longitudinal às fibras e, dessa forma, o interior da peça e da carga tendem a ter uma temperatura mais elevada do que a sua superfície. Logo, na etapa de resfriamento deve-se cessar a oxigenação para dentro do forno, pois com a penetração de ar atmosférico e, conseqüentemente, de oxigênio entre as peças, a massa de carvão vegetal pode entrar em ignição (FRANÇA; CAMPOS, 2002), dificultando a etapa de resfriamento e comprometendo a qualidade e o rendimento do produto formado.

Tratando-se da peça de carvão vegetal, a porosidade intrínseca tem grande impacto na perda térmica durante o resfriamento. Os poros do carvão vegetal são espaços vazios que acentuam a anisotropia na difusão da energia, favorecendo o fluxo de calor na direção longitudinal das fibras e se comportam como uma barreira extra à transferência de calor, implicando em temperaturas mais elevadas na região central em relação à superfície do carvão vegetal, implicando em diferenças de temperatura no sentido radial da peça, acentuando a heterogeneidade do resfriamento (FRANÇA; CAMPOS, 2002; JESUS et al., 2019; FIGUEIRÓ, 2022).

Segundo Carrasco et al. (2016), quanto maior for a massa específica da madeira, ou seja, menor quantidade de espaços vazios por unidade de volume, maior será a sua condutividade térmica e, conseqüentemente, do carvão vegetal, facilitando a transferência de calor.

A maior densidade da madeira está diretamente relacionada a uma maior densidade do carvão vegetal para um determinado volume (RAMOS et al., 2023), tendendo a maior facilidade e velocidade da transferência de calor durante a carbonização da madeira e o resfriamento do carvão vegetal, devido a maior quantidade de massa e menor número de espaços vazios que contribuem para um melhor fluxo de calor por condução no material (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2014; PELLEGRINI, 2019).

3.5. Efeito da granulometria, do diâmetro da madeira e do carvão vegetal no resfriamento

O diâmetro da madeira enfiada é a variável que mais influencia as trocas de calor entre a matéria-prima e o meio ao seu redor (SHEN, et al., 2009; JESUS et al., 2019). A resistência à transferência de calor aumenta com o incremento em diâmetro (BABU; CHAURASIA; 2004; RAAD, 2004) e, de acordo com Shen et al. (2009) e Jesus et al. (2019), quanto maior o diâmetro, maior o tempo para que o fluxo de calor atinja as regiões mais internas na madeira. Analogia semelhante pode ser feita para o processo de resfriamento do carvão vegetal e quanto maior for o seu diâmetro, mais tempo levará para que o fluxo de calor saia do interior da peça para o meio externo.

Em estudos realizados por Jesus et al. (2019) para avaliar o comportamento térmico da madeira submetida a tratamento termoquímico, observaram que a temperatura na superfície da madeira de *Eucalyptus* durante a pirólise lenta aumentou rapidamente, enquanto na porção central formou-se um platô. Temperaturas mais elevadas foram observadas na superfície das madeiras, onde a resistência térmica entre a madeira e a fonte de calor alotérmica, fornecida pela mufla, foi menor. No estudo foi observado que a diferença de temperatura entre a superfície e o centro da madeira aumentou, principalmente nas toras de maiores diâmetros e maiores teores de umidade. Na pirólise de toras de 6 cm de diâmetro e 20% de umidade, a diferença máxima de temperatura entre a superfície e o centro foi de 115°C, aumentando para 150°C para as amostras de 10 cm de diâmetro e 30% de umidade e para as amostras de 14 cm de diâmetro e 40% de umidade, a diferença de temperatura entre a superfície e o centro da amostra foi de 280°C.

A não uniformidade térmica entre a superfície e o centro da peça é acentuada com o aumento de diâmetro e no sentido da superfície da peça para o seu interior e, desta forma, quanto maior for o diâmetro da peça, maior será a dificuldade de dissipação da energia térmica, devido à diminuição do fluxo de calor com o aumento do diâmetro, que ocorre em função da diminuição do gradiente de temperatura que, por sua vez, diminui com o raio (JESUS et al., 2018; JESUS et al., 2019). Figueiró (2022), ao estudar a secagem artificial de toretes de madeira de eucalipto, observou que a condutividade térmica longitudinal em uma peça de madeira é de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ maior do que a transversal, portanto, maior será a facilidade de transferência de calor nesse sentido. Considerando o diâmetro da madeira e a maior dificuldade de transferência de calor no sentido transversal, quanto menor for o diâmetro, maior será a facilidade de entrada ou retirada de calor.

Em maiores diâmetros, há uma tendência de se formar maiores zonas carbonizadas na superfície em relação ao centro do torete de madeira, aumentando a resistência térmica e dificultando o fluxo de calor para o interior da madeira que, normalmente, são regiões mais úmidas em relação a superfície. Com o aumento da porosidade e diminuição da condutividade térmica do carvão em relação à madeira, as zonas carbonizadas formadas na superfície se comportam como barreiras ao fluxo de calor (BABU e CHAURASIA, 2004; JESUS et al., 2019).

O carvão vegetal possui uma característica física intrínseca, que é a sua capacidade de se fragmentar em pedaços, denominada friabilidade (SOMERVILLE et al., 2015; DELATORRE et al., 2020). A sua natureza friável, menos ou mais acentuada de acordo com a qualidade do material de origem e processo de produção, pode contribuir para a maior geração de finos, aumentando a área superficial e conseqüentemente potencializando o processo de combustão, prejudicando o resfriamento do material (ANTAL; GRØNLI, 2003).

Para haver uma dissipação adequada de calor durante a etapa de resfriamento na pilha de carvão vegetal é necessário que haja espaço para as trocas térmicas e, para isso, uma granulometria adequada é fundamental. Se a energia não é dissipada corretamente por meio da transferência de calor que se dá, principalmente, por condução e convecção, pode haver aumento de temperatura e aumento da taxa de oxidação da carga, podendo ocasionar a ignição. Desta forma, é importante que os gases circulem de maneira uniforme, permitindo o resfriamento e reduzindo a probabilidade de focos de fogo (ZHU et al., 2013).

Quanto maior for o diâmetro da peça de madeira, maior tende a ser a porcentagem de cerne, como mostrado por Pinheiro (2013) para madeiras de eucalipto, implicando em maior friabilidade do carvão vegetal produzido e maior geração de finos, que podem comprometer o resfriamento, devido à diminuição das trocas térmicas na pilha. No estudo de Pinheiro (2013), madeiras com diâmetro menor que 10 cm geraram carvões com 16,62% de finos, enquanto para os carvões oriundos de madeiras com diâmetros acima de 13 cm, o teor de finos chegou a quase 26%.

Quanto maior a granulometria e menor a porcentagem de finos, menor a ocorrência de focos de fogo e o processo de resfriamento é facilitado, devido à maior facilidade de trocas térmicas na massa de carvão vegetal (KATALAMBULA et al., 1997; JESUS et al., 2019).

A dificuldade de movimentação de fluidos, pelas obstruções e menor permeabilidade da madeira, resulta em um maior teor de finos, devido à formação de trincas e fissuras com o rompimento das células durante a saída de água (JESUS et al., 2019; RAMOS et al., 2023).

3.6. Efeito da relação cerne/alburno no resfriamento do carvão vegetal

A relação cerne/alburno representa a relação entre a proporção de cerne e de alburno numa árvore, tendo influência sobre diversas propriedades da madeira. O cerne, formado por células fisiologicamente mortas, possui tecido mais compacto e, quando comparado ao alburno, é uma região menos permeável, devido a presença de obstruções por deposições de extrativos, por exemplo. A madeira do cerne contém mais compostos fenólicos, compostos ácidos e menos amido que a madeira de alburno, formado por células fisiologicamente ativas (BURGER; RICHTER, 1991; TRUGILHO; SILVA, 2001).

No processo de carbonização, a relação cerne/alburno afeta principalmente a secagem da madeira e a geração de finos na produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013; RAMOS et al., 2023). Portanto, principalmente em função das obstruções presentes, quanto maior for a porção de cerne, maior será a dificuldade de movimentação da água e dos gases na madeira e maior será a sua pressão de saída, gerando trincas, fendas e rachaduras no carvão que está sendo formado, tornando-o mais friável, produzindo maior teor de finos ao final do processo, fator que pode comprometer o resfriamento, devido a formação de carvões de menores granulometrias e da diminuição dos espaços vazios nas pilhas, que comprometem as trocas térmicas (COUTINHO; FERRAZ, 1988; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; OLIVEIRA et al., 2005; PEREIRA et al., 2013).

A baixa permeabilidade do cerne causada, principalmente, pela presença de tiloses, causa obstrução dos vasos e, conseqüentemente, em maior dificuldade e maior pressão de saída dos vapores de água da madeira, em seus elementos anatômicos, causando o rompimento de células e produzindo um maior teor de finos, devido à formação de fendas e fissuras no interior do carvão vegetal (DONATO et al., 2020; RAMOS et al., 2023).

Em relação ao gênero *Eucalyptus*, material mais plantado no Brasil para a produção de madeira para fins energéticos (IBÁ, 2022), a região do cerne, normalmente, tem menor densidade básica do que a madeira de alburno (PEREIRA et al., 2013; COSTA et al., 2017; RAMOS et al., 2023), implicando em menor transferência de calor (JESUS et al., 2019).

3.7. Efeito do teor dos materiais voláteis da madeira no resfriamento

O processo de carbonização, além da produção de carvão vegetal, libera vapor d'água e outros gases condensáveis, além dos não condensáveis. Segundo Santos et al. (2020), os materiais voláteis têm relação inversa com o tempo e temperatura final de carbonização.

Um dos gases condensáveis da carbonização é o alcatrão (OLIVEIRA et al., 1982; SANTOS, 2008) e o seu ponto de fulgor, conforme divulgado na Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos elaborada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), apresenta temperatura maior ou igual a 71,2°C, enquanto no carvão vegetal essa temperatura está acima de 300°C (XIONG et al., 2014). Prauchner et al. (2001), ao caracterizarem o alcatrão de eucalipto, observaram que esses compostos são mais reativos por apresentarem maiores relações O/C e H/C e são mais sensíveis à degradação térmica.

Várias espécies da família Myrtaceae, como as pertencentes aos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, podem produzir exsudações em resposta à danos mecânicos e a ação de agentes biológicos (FERREIRA, 1989; BRANDÃO, 2019). Exsudatos comumente presentes em espécies do gênero *Corymbia* são bolsas de resina, conhecidas como kinos, caracterizadas, principalmente, pela presença de taninos e polifenóis (DE ASSIS, 2014; NOBAKTH et al., 2014), compostos de alta estabilidade térmica (PEREIRA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2021), que podem desencadear reações secundárias na madeira e elevar a temperatura final da carbonização.

3.8. Efeito da temperatura final de carbonização no resfriamento do forno

A temperatura final de carbonização é uma das principais determinantes da qualidade do carvão vegetal produzido, juntamente com as características da biomassa de origem. O papel exercido pela temperatura final do processo é fundamental para diversas reações de carbonização e, dependendo de qual temperatura for adotada, produtos com diferentes características físicas e químicas podem ser gerados (TRUGILHO; SILVA, 2001; RODRIGUES, 2019). Com o aumento da temperatura final de carbonização, a área superficial tende a aumentar e o rendimento gravimétrico tende a reduzir, favorecendo a formação de finos (NOVOTNY et al., 2015), que tem potencial de prejudicar o resfriamento da massa de carvão, afetando a dissipação de energia dentro da pilha devido à descontinuidade dos espaços vazios entre os grânulos de carvão.

O resfriamento inicia imediatamente após a vedação total do forno, tendo neste momento temperaturas de copa superiores a 300°C, a depender do forno, e geralmente finaliza

em temperaturas menores que 45°C, segundo experiências de campo. Brito (1992) e Bustos-Vanegas et al. (2019), afirmam que a temperatura ideal para abertura do forno sem risco de incêndio no carvão vegetal é abaixo de 60 °C, já para Santos (2013) e Oliveira (2012) e Damásio et al. (2015), a temperatura ideal é abaixo de 40 °C.

Uhart (1972) atestou que a temperatura de inflamabilidade está relacionada ao percentual de oxigênio (O₂) absorvido pelo carvão vegetal durante sua produção e este percentual é função da temperatura final de carbonização. Bustos-Vanegas et al. (2019) ao estudarem o comportamento do aquecimento do carvão vegetal de eucalipto, observaram que a concentração de oxigênio absorvido pelo carvão tende a aumentar com a temperatura, independente da concentração inicial de O₂. Portanto, adequar a temperatura final de carbonização e garantir uma boa vedação, implicam em maior sucesso da etapa de resfriamento. Normalmente, a temperatura final aplicada no processo de carbonização em fornos circulares de alvenaria está na faixa teórica de 380°C e 400°C, como a utilizada por Oliveira et al. (2013) e Donato et al. (2020).

A temperatura final de carbonização influencia a diferença de temperatura formada entre o carvão vegetal e o meio externo e quanto maior for o gradiente de temperatura formado, mais rápida será a troca de calor com o meio devido à maior força motriz formada pelo delta de temperatura entre os sistemas (ÇENGEL, 2012, INCROPERA, 2014).

3.9. Efeito da umidade da madeira no resfriamento do forno

A pressão exercida pelo vapor d'água no interior dos poros, ao sair da madeira com maior teor umidade, pode produzir mais trincas internas no carvão, contribuindo para a geração de finos (MENDES et al., 1982; JESUS et al. 2019), característica indesejável para a indústria siderúrgica e que influencia negativamente o resfriamento do carvão vegetal (BUSTOS-VANEGAS, 2019).

Durante a pirólise, a água diminui a variação de calor da superfície para o centro da peça de madeira. Em sistemas autotérmicos, o teor de umidade pode influenciar a produtividade do forno em até 12%, principalmente devido a capacidade da água de dissipar a energia da madeira durante o processo de pirólise (HASAN, et al., 2017; JESUS, et al.. 2019). Apesar da presença da água aumentar a condutividade térmica da madeira, o seu alto calor específico interfere negativamente no incremento da temperatura (BRYDEN et al., 2002; YU et al., 2011),

resultando em redução na taxa de aquecimento e conseqüentemente em aumento do ciclo de carbonização (JESUS et al., 2019).

De maneira geral, quanto maior o teor de umidade na madeira, maior a dificuldade de aumentar a temperatura do forno durante a fase inicial da carbonização, além de retardar o processo de troca de calor, devido ao movimento de convecção dos vapores de água. O aquecimento e a evaporação consomem energia térmica e o teor de umidade presente na madeira aumenta a inércia térmica da amostra (DI BLASI, 2001; RAAD, 2004; JESUS et al., 2018).

Para eliminar elevados teores de água na madeira, uma grande quantidade de energia é demandada e, até que toda água seja evaporada, a temperatura permanece constante. Portanto, maiores teores de umidade implicam em maior tempo de residência da madeira no interior dos fornos, afetando seu ciclo e produtividade (URKAN; ALKOL, 1994; JESUS et al., 2019).

No estudo realizado por Jesus et al. (2019) com madeiras de *Eucalyptus*, as amostras de 40% de umidade tiveram reações endotérmicas até 270°C. Nesta condição, a energia térmica, foi aproximadamente 6 vezes maior, em módulo, que a da amostra absolutamente seca, representando um gasto energético significativo para a fase de secagem quando comparado às condições de 20 e 30% de umidade, da qual a energia térmica requerida foi, respectivamente, 3 e 4 vezes maior do que a da amostra absolutamente seca. Portanto, quanto maior a umidade maior será a demanda de calor, maior será o tempo para a ocorrência das reações de pirólise e maior será o tempo gasto para a dissipação da energia, aumentando, por consequência, todo o ciclo de carbonização.

3.8 Propriedades térmicas da madeira e do carvão vegetal

3.8.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes de um material e é um parâmetro básico em atividades que envolvam transferência de calor (SANTOS, 2005). Em um corpo sólido e homogêneo, o fluxo de calor é constante em todas as direções e as propriedades térmicas independem da forma ou do volume do material. Porém, em meio poroso, como é o caso da madeira e do carvão vegetal, aspectos como a forma das partículas, a compactação do produto, o teor de água, a temperatura, a composição, a anisotropia, a densidade e a porosidade influenciam na quantidade de calor transferido por unidade de área,

influenciando as propriedades térmicas do material (REIS, 2009; SANTOS, 2013; CARRASCO et al., 2016).

Siau (1984) afirma que, em função da estrutura porosa da madeira, a sua condutividade térmica é baixa quando comparada a outros materiais (Tabela 1), fato explicado pela quantidade de ar contida em seu interior. O carvão vegetal, que também é um material poroso, apresenta baixa condutividade térmica e características ainda mais isolantes assim do que a madeira (PINTO; JUNIOR, 2006; CARRASCO et al., 2016), fatores que prejudicam o processo de resfriamento, pela dificuldade de dissipação da energia. O mesmo autor constatou que quanto maior a densidade, o teor de umidade, o teor de extrativos e a temperatura que o material está submetido, maior sua condutividade térmica.

Santos et al. (2020) encontraram valores de condutividade térmica entre $0,030 \pm 0,0027$ $W.m^{-1}.K^{-1}$ para carvão vegetal de *Eucalyptus*, demonstrando elevada resistência à transferência de calor.

Tabela 1. Exemplos de coeficientes de condutividade térmica

Material	Condutividade térmica	Fonte
Vácuo	0,0000	Moreschi (2010)
Ar	0,0216	Carrasco <i>et al.</i> (2016)
Madeira	0,1900	Incropera <i>et al.</i> (2014) e Çengel <i>et al.</i>
Carvão vegetal	0,0300	Santos (2013)
Tijolo	0,4000	Moreschi (2010)
Água	0,5000	Carrasco <i>et al.</i> (2016)
Alumínio	230,00	Moreschi (2010)
Ferro	330,00	Moreschi (2010)

Fonte: Autor (2022).

3.8.2. Calor específico

O calor específico de um material é a relação entre a capacidade de aquecimento deste material e a capacidade de aquecimento da água. A capacidade de aquecimento representa a quantidade de energia térmica necessária para elevar ou baixar a temperatura de uma unidade de massa do material em 1°C, sem mudança de estado (BARREIRA, 2008; SANTOS et al., 2020).

Em processos de aquecimento ou resfriamento de determinado material é imprescindível o conhecimento da quantidade de calor a ser fornecido ou retirado, sendo o calor específico uma propriedade decisiva para um material utilizado em aplicações com altas

temperaturas visto que só é possível determinar essa quantidade de calor quando se conhece esta propriedade (SANTOS, 2005; SANTOS, 2013; SANTOS et al., 2020).

Na madeira, o calor específico é influenciado pelo teor de umidade e pela temperatura, independente da densidade ou da espécie florestal e, em relação a outros materiais, seu valor é elevado, ou seja, aplicando uma certa quantidade de calor, a madeira aquecerá menos quando comparada a materiais com calor específico menor (MORESCHI, 2010), bem como demorará mais tempo para perder calor em processos de resfriamento. Na tabela 2 são apresentados exemplos de valores de calor específico.

Tabela 2. Exemplos de valores de calor específico

Material	Calor específico (kJ/kg K)
Água (líquida)	4,187
Madeira (pinho)	2,721
Carvão vegetal	0,837
Carvão mineral	1,298
Cobre	0,398
Chumbo	0,126

Fonte: Adaptado de Çengel et al. (2012) e Incropera et al. (2014).

Em um trabalho realizado por Santos et al. (2020) sobre as propriedades físicas e térmicas do carvão vegetal de *Eucalyptus*, foram encontrados valores de calor específico que variaram entre 891 a 1096 J.kg⁻¹.K⁻¹, com um valor médio 1017 ± 74 J.kg⁻¹.K⁻¹, valores próximos aos encontrados por Gupta et al. (2003) e Eltom e Sayigh (1994), 768-1506 J.kg⁻¹.K⁻¹ e 709 J.kg⁻¹.K⁻¹, respectivamente.

3.8.3. Difusividade térmica

A difusividade térmica é uma medida física da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material (SANTOS, 2005). Sua determinação se dá por meio de ensaios em laboratório ou indiretamente, por meio da relação entre a condutividade térmica do material, seu calor específico e massa específica. Essa propriedade se correlaciona com a velocidade com que as trocas de calor ocorrem através da massa de carvão e quanto maior a difusividade térmica, mais facilmente o calor dissipa através da pilha (REIS, 2009). Na tabela 3, são apresentados valores de difusividade térmica para diferentes materiais.

O conhecimento da dinâmica dos gases da carbonização que se movimentam através da massa de carvão presente no interior do forno é fundamental para a caracterização do processo de transferência de calor durante o seu resfriamento (SANTOS, 2013; SANTOS et. al, 2020).

Tabela 3. Exemplos de valores de difusividade térmica

Material	Difusividade térmica (m²/s)
Madeira (carvalho)	0,13 x 10 ⁻⁶
Água	0,14 x 10 ⁻⁶
Tijolo	0,52 x 10 ⁻⁶
Concreto	0,75 x 10 ⁻⁶
Ferro	22,8 x 10 ⁻⁶
Prata	149 x 10 ⁻⁶

Fonte: Adaptado de Çengel *et al.* (2012).

3.8.4. Estabilidade térmica do carvão vegetal

Na pirólise lenta da madeira, processo mais comum de produção do carvão vegetal, entender o seu comportamento térmico, sua resistência ao calor e transferência de massa para otimizar a produção do carvão é um grande desafio (LI et al. 2013; JESUS, et al., 2019).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), o carvão vegetal é classificado como um material passível de sofrer autocombustão em temperatura ambiente, mas estudos realizados por diversos autores e centros de pesquisa indicam que não é possível que esse fenômeno ocorra a temperaturas abaixo de 140°C (Tabela 4), temperatura que respeita os critérios estabelecidos no Manual de Testes da Organização das Nações Unidas (ONU) para avaliação da autocombustão de um material, atestando a estabilidade térmica do carvão vegetal.

Tabela 4. Valores de temperatura de ignição do carvão vegetal

Fonte	Data	Temperatura de ignição ou de oxidação do carvão
<i>Pacheco</i>	1943	360
<i>Hawley</i>	1944	500
<i>Browne</i>	1958	150-250
<i>Brocksiepe</i>	1986	200-250
<i>Oliveira Filho</i>	1987	240-400
<i>CIENTEC</i>	2005	450-460
<i>Van Blijderveen</i>	2010	> 150
<i>Xiong</i>	2014	> 300
<i>Bustos-Vanegas et al.</i>	2019	250-300

Fonte: CIENTEC (2005), Rohde (2011), Bustos-Vanegas et al. (2019) (adaptado).

Além da temperatura, a estabilidade térmica do carvão pode ser atestada a partir da análise das concentrações dos compostos gasosos durante testes de oxidação, como feito por Bustos-Vanegas et al. (2019) para o oxigênio. Os autores relacionaram o aumento da temperatura do carvão às reações de oxidação e aumento significativo do consumo de O₂, que se inicia a partir de 150°C e tem um aumento expressivo à medida que a temperatura é elevada.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Esquema metodológico

Na Figura 3, está apresentado o resumo da metodologia utilizada neste experimento.

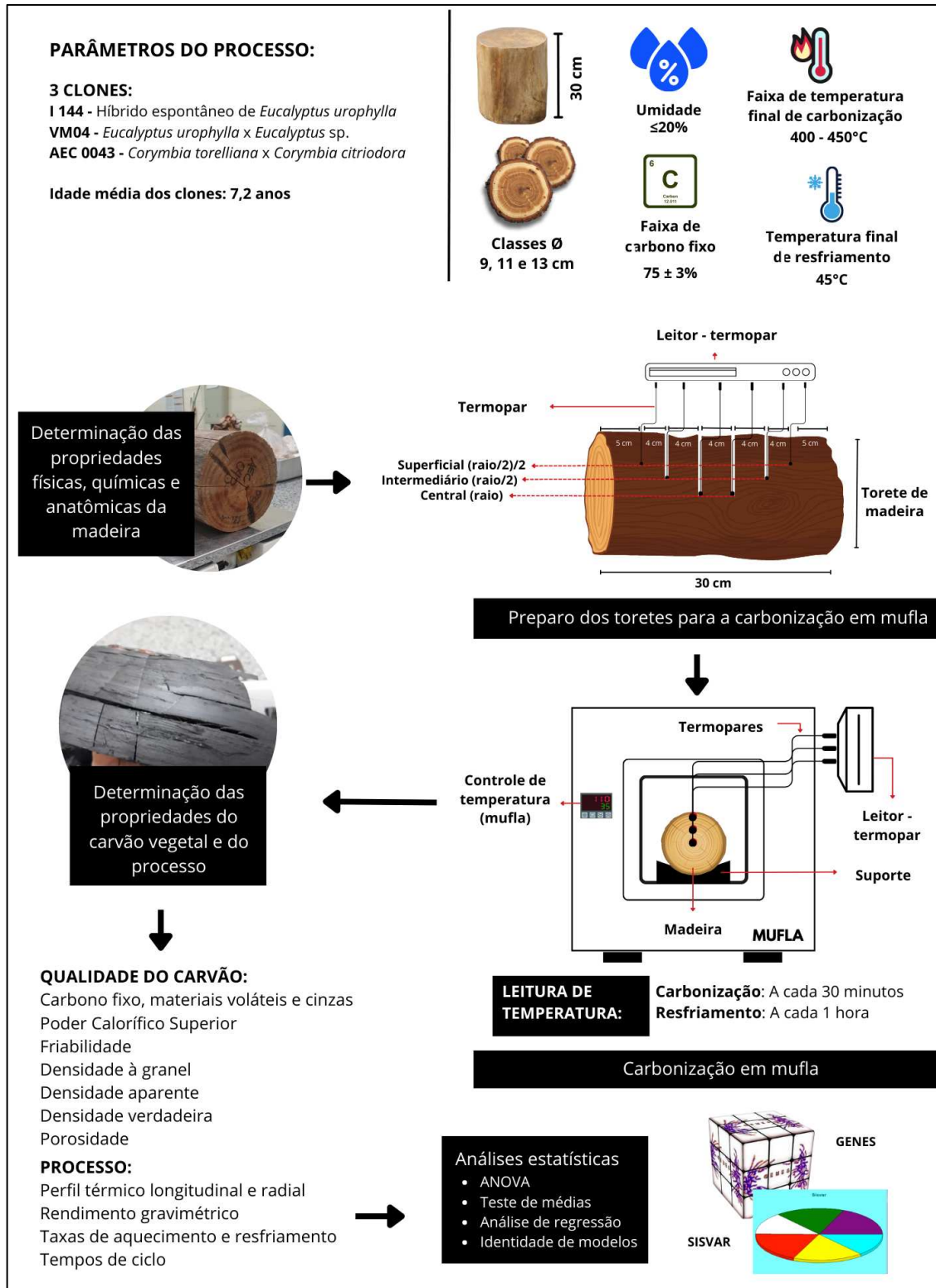


Figura 1. Esquema metodológico do experimento

4.2. Caracterização da matéria-prima

O experimento foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa – UFV, situada na cidade de Viçosa, Minas Gerais. O município apresenta altitude média de 650 m e clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo Cwa, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.200 mm e a temperatura média anual de 19,4°C, com mínima de 14,8°C e máxima de 26,4°C (TORRES et al., 2017).

Para a realização das carbonizações e análise do resfriamento do carvão vegetal foram utilizadas madeiras de 3 clones, I 144 e VM04 pertencentes ao gênero *Eucalyptus* e o clone AEC 0043, pertencente ao gênero *Corymbia*. As informações sobre os clones estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Informações sobre os clones utilizados no experimento

Clone	Material genético	Empresa	Espaçamento (m)	Idade (anos)	Local	Densidade (kg/m ³)
I 144	Híbrido espontâneo de <i>Eucalyptus urophylla</i>	Produtor local	3,0 x 3,0	7,0	Viçosa – MG	464,00
VM04	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus sp.</i>	Vallourec	3,0 x 2,0	7,5	Paraopeba – MG	547,72
AEC 0043	<i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i>	ArcelorMittal	4,0 x 1,8	7,0	Capelinha – MG	622,33

4.3. Carbonização da madeira e resfriamento do carvão vegetal

Para a análise da carbonização e do resfriamento do carvão vegetal foram utilizados toretes de madeira com 30 cm comprimento, umidade base seca inferior a 20%, adotando-se três classes de diâmetro (9, 11 e 13 cm ± 1 cm). Foram inseridos seis termopares tipo J com revestimento de fibra em malha trançada, diâmetro de dois milímetros e haste de ferro + *constantan* ao longo do comprimento dos toretes em três profundidades diferentes (superficial,

intermediária e central) (Figura 2), no sentido radial. 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* (Figura 3).

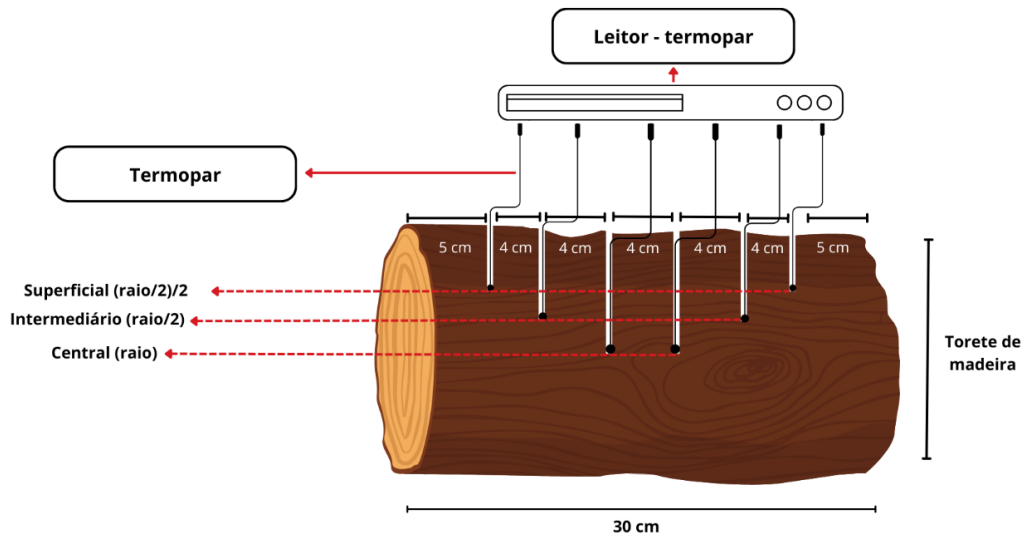


Figura 2. Posição dos termopares inseridos no torete de madeira

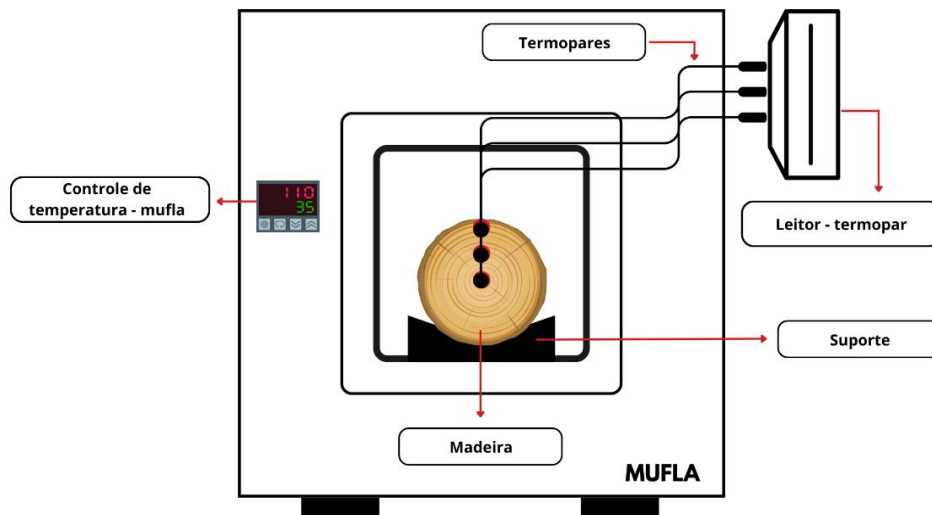


Figura 3. Representação esquemática do sistema para carbonização e resfriamento da madeira

Fonte: Autor (2023)

Para a inserção dos termopares, foram abertos orifícios com o auxílio de furadeira e a serragem gerada foi utilizada para determinação da umidade da madeira a ser carbonizada, pelo

princípio gravimétrico, utilizando uma balança determinadora de umidade da marca OHAUS MB35 *Halogen*.

A temperatura final de carbonização adotada foi de 400°C, a taxa de aquecimento foi controlada manualmente, sendo estabelecidas curvas de carbonização para obtenção de um teor de carbono fixo entre 72 e 78%. O monitoramento de temperatura dessa etapa foi feito manualmente, a cada 30 minutos.

Após a carbonização, toda a parte externa da mufla foi vedada com manta cerâmica e, em seguida, iniciou-se o monitoramento do processo de resfriamento, com coletas de temperatura em intervalos de 1 hora até atingir temperaturas menores ou iguais a 45°C. Ao final, foram obtidas as curvas de carbonização e de resfriamento em função do tempo e da temperatura monitorada nos termopares indicados na Figura 2.

As taxas de aquecimento do processo de carbonização e as taxas de resfriamento do carvão vegetal, foram determinadas conforme descrito nas equações 1A e 1B, respectivamente.

$$TA \left(\frac{^{\circ}C}{h} \right) = \frac{(T_f - T_i)}{t} \quad (\text{Equação 1A})$$

Em que, TA: Taxa de aquecimento (°C/h); T_f: temperatura ao final da carbonização (°C); T_i: temperatura no início do resfriamento, após a vedação do forno (°C); t: tempo, em horas (h).

$$TR \left(\frac{^{\circ}C}{h} \right) = \frac{(T_i - T_f)}{t} \quad (\text{Equação 1B})$$

Em que, TR: Taxa de resfriamento (°C/h); T_i: temperatura no início do resfriamento, após a vedação do forno (°C); T_f: temperatura ao final do resfriamento (°C); t: tempo, em horas (h).

O perfil de temperatura da peça de carvão vegetal foi avaliado nos sentidos longitudinal e radial a partir dos termopares instalados ao longo do comprimento do torete e seu diâmetro. A partir da análise dos perfis térmicos, foram determinados os pontos de maior e de menor resfriamento, bem como as suas amplitudes, de acordo com a distribuição de temperatura nos sentidos longitudinal e radial da peça. O perfil de temperatura radial (superfície – centro) foi analisado utilizando-se a equação 2.

$$PTr (^{\circ}C) = (T_{central} - T_{superficial}) \quad (\text{Equação 2})$$

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.

O tempo de transferência de calor, ou seja, o tempo gasto para que a peça ganhe ou perca 1°C durante a carbonização e o resfriamento, respectivamente, foram analisados conforme a equação 3.

$$T_{tc} \left(\frac{\text{min}}{^{\circ}\text{C}} \right) = \left[\frac{(t_i - t_f)}{(T_f - T_i)} \right] \cdot 60 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que, Ttc: Tempo de transferência de calor ti: tempo inicial (min); tf: tempo final (min); Ti: Temperatura inicial (°C); Tf: Temperatura final (°C).

4.4. Propriedades da madeira

Para determinar as propriedades da madeira foram selecionados toretes, de 30 cm de comprimento, representativos das classes diamétricas 9, 11 e 13 (± 1) cm. Destes toretes, foram retirados discos nas posições 25, 50, 75% do comprimento total. Cada disco foi dividido em quatro partes, retirando-se duas cunhas opostas para determinar a densidade básica e o teor de umidade, base seca. A madeira restante foi utilizada para determinação das demais propriedades.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das cunhas.

A umidade, em base seca, foi determinada seguindo-se o método de secagem em estufa descrito pela norma ABNT NBR 14929 (ABNT, 2017). As amostras foram colocadas separadamente em estufa com circulação forçada de ar, a 103 ± 2 °C, onde permaneceram até atingir massa constante. Ao obter a massa final, o teor de umidade médio, em base seca foi calculado conforme equação 4.

$$UBS(\%) = \frac{mu - ms}{ms} \cdot 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que, UBS (%): teor de umidade, em base seca; mu (g): massa úmida da amostra; e ms (g): massa seca da amostra.

Para a determinação da composição química estrutural da madeira, foi utilizada a fração da serragem retida na peneira com malha de 60 *mesh* (ASTM, 1982). O teor de umidade, absolutamente seco da madeira foi obtido conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Em duplicatas, foi determinado o teor de extrativos da madeira de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), havendo substituição do etanol/benzeno por etanol/tolueno.

A partir do método Klason modificado, o teor de lignina insolúvel foi obtido, de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Já a lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971). Para o teor de lignina total, os valores de lignina solúvel e insolúvel foram somados. O teor de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina totais, decrescido de 100.

A composição química imediata, para determinar o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira foi realizada de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura de 750 °C para 600 °C, segundo Pereira (2012).

A permeabilidade da madeira foi determinada pelo método do fluxômetro conforme a metodologia descrita por Teixeira (2015), adaptada de Baraúna (2010). O cálculo da permeabilidade foi feito conforme a equação 5.

$$Kg \text{ (cm}^3\text{/cm. atm. s)} = \frac{V. L. Pi}{t. A. \Delta P. Pm} \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que, Kg = permeabilidade ao gás (cm³/cm.atm.s); Q = volume do fluxo de gás que percorre o corpo de prova (cm³/s); L = comprimento da amostra (cm); Pi = pressão de entrada, a do ambiente (atm); t = tempo (s) A = área da seção transversal (cm²); ΔP: diferença de pressão (atm); Pm: média da pressão no corpo-de-prova (atm)

Para determinar as propriedades anatômicas da madeira, foram retirados frações de madeira das regiões do cerne e do alburno. O método de Dadswell (1972) foi utilizado para individualizar as fibras e, em seguida, foram montadas lâminas para a medição da largura e diâmetro das fibras através de microscopia ótica e do software Axio-Vision. A determinação da espessura da parede celular foi feita através da metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. A fração parede foi estimada conforme a equação 6, descrita por Foekel et al. (1975).

$$\text{Fração parede (\%)} = \frac{2 E_p}{L_f} \cdot 100 \quad \text{(Equação 6)}$$

Em que, E_p = Espessura de parede em μm; L_f = Largura da fibra em μm.

4.5. Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal

A massa de madeira e de carvão vegetal foi pesada antes e após a carbonização para cálculo do rendimento gravimétrico, calculado conforme a equação 7.

$$RG (\%) = \left(\frac{M_{s \text{ carvão}}}{M_{s \text{ madeira}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Em que, RG = Rendimento Gravimétrico (%); $M_{s \text{ carvão}}$ = Massa seca de carvão (kg); $M_{s \text{ madeira}}$ = Massa seca de madeira (kg)

4.6. Caracterização do carvão vegetal

Ao final de cada carbonização, a composição química imediata do carvão vegetal produzido foi analisada, determinando os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca. Para isto, foi utilizada a norma NBR 6923 (ABNT, 1981), em que as amostras de carvão vegetal foram moídas e peneiradas, classificadas em peneira de 60 *mesh* e posteriormente secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até massa constante. Os teores de materiais voláteis, teores de cinzas e teores de carbono fixo foram determinados segundo os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio de bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1983).

Para determinar a resistência mecânica (friabilidade) do carvão vegetal, foi utilizado um friabilômetro de bancada, que consiste em um tambor de formato cilíndrico de 30 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, possuindo uma tampa de 12 x 22 cm, cujo interior é ajustado um conjunto composto de dois anéis de aço de 19 mm x 3 mm suportando três cantoneiras longitudinais, de 16,5 cm x 1,9 cm x 0,3 cm, igualmente espaçadas. O carvão produzido na granulometria de 19 a 25 mm foi peneirado em peneiras de malha 9,5 mm, nos quais 20 g do material retido na peneira foram utilizados para o teste de friabilidade. A rotação utilizada foi de 35,5 rpm. O cálculo da friabilidade foi feito de acordo com a equação 8.

$$\text{Friabilidade } (\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Em que, m_i : massa inicial; m_f : massa final, após aplicação de pressão e peneiramento.

A densidade aparente, densidade verdadeira e porosidade foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR 9165.

A partir da densidade aparente e densidade verdadeira, a porosidade do carvão vegetal foi obtida, utilizando-se a equação 9.

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(1 - \frac{DA}{DV}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo, DA: densidade aparente e DV: densidade verdadeira

4.7. Análise de dados e delineamento estatístico

O experimento foi analisado segundo delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial, comparando-se os 3 clones (tratamentos) e 3 classes de diâmetro em 2 repetições, totalizando 18 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade e de Cochran para testar a homogeneidade das variâncias e, em seguida, submetidos à análise de variância (ANOVA). Observando-se diferenças significativas entre os dados qualitativos, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey a 5% de significância. Para a análise estatística dos dados foi utilizado o software *Sisvar*, versão 5.6.

Para os dados quantitativos das curvas de resfriamento, foi feito um teste de identidade de modelos através de regressão polinomial utilizando o software *GENES* (Cruz, 2013). Para a análise dos clones e diâmetros foram testados nove modelos (3x3), considerando o tempo de processo e a temperatura de resfriamento (variável resposta). Os modelos foram submetidos à uma análise de variância para verificar a igualdade das equações de regressão à um nível de 1%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da madeira

As propriedades físicas, químicas e anatômicas obtidas para os clones I 144, VM04 e AEC 0043 estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Propriedades da madeira dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Propriedades	I 144			VM04			AEC 0043		
	9 cm	11 cm	13 cm	9 cm	11 cm	13 cm	9 cm	11	13 cm
Densidade básica (kg/m ³)	468,4	459,4	464,2	571,2	547,3	524,6	631,2	628,3	607,5
Relação C/A	0,80	0,89	1,07	0,79	0,83	1,06	0,44	0,70	0,91
Umidade (%), base seca	11,36	19,98	11,39	11,19	10,33	10,34	9,49	11,27	11,54
Permeabilidade - Alburno (cm ³ /cm.atm.s)	347,90			228,10			448,99		
Permeabilidade - Cerne (cm ³ /cm.atm.s)	9,80			15,10			108,45		
Materiais voláteis (%)	86,44			86,49			87,20		
Cinzas (%)	0,11			0,17			0,35		
Carbono fixo (%)	13,45			13,35			12,45		
Extrativos totais (%)	5,61			5,20			6,48		
Lignina total (%)	29,09			26,43			21,28		
Relação Siringil/Guaiacil (SG)	2,80			2,50			2,60		
Holocelulose (%)	65,30			68,50			72,24		
Diâmetro de Poros (µm)	102,94			108,47			116,21		
Frequência de Poros	11,96			9,90			10,18		
Espessura de Fibra (µm)	4,43			4,54			4,75		
Comprimento de Fibra (µm)	0,91			0,94			0,94		
Diâmetro de Fibra (µm)	10,02			8,63			7,69		
Largura da Fibra - Cerne (µm)	17,74			14,93			11,19		
Largura da Fibra - Alburno (µm)	18,88			17,71			17,27		
Fração parede (%)	46,92			51,24			55,91		

A densidade básica é uma propriedade de grande impacto na produção de carvão vegetal e na etapa de resfriamento, principalmente quando se trata da transferência de calor entre o material e o meio externo (SANTOS, 2013; SANTOS et al., 2020). Observa-se que o clone I 144, em média, tem densidade básica 20,37% menor quando comparado aos demais (463,99 kg/m³). Já a madeira do clone VM04 tem densidade intermediária (547,72 kg/m³) e a madeira do clone AEC 0043 tem o maior valor de densidade entre os três clones (622,33 kg/m³). Dessa forma, as diferenças de densidade entre os materiais genéticos permitiram a análise da influência dessa característica na dinâmica de resfriamento para diferentes materiais genéticos.

A maior densidade da madeira está diretamente relacionada a maior densidade do carvão vegetal para um determinado volume (RAMOS et al., 2023), tendendo a maior taxa da transferência de calor durante a carbonização da madeira e o resfriamento do carvão vegetal, devido a maior quantidade de massa e menor número de espaços vazios que contribuem para uma maior condutividade térmica no material (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2014; PELLEGRINI, 2019).

Donato et al. (2020) obtiveram uma densidade básica de 460 kg/m³ para clones de eucalipto entre 7 a 12 cm de diâmetro, Zanuncio et al. (2014) encontraram valores próximos de densidade básica para o clone VM04 (552 kg/m³) e para clones de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* (684 kg/m³), enquanto Loureiro et al. (2019) encontraram densidades básicas de clones de *Corymbia* entre 545 e 641 kg/m³.

A maior densidade básica da madeira do clone AEC 0043 está estreitamente relacionada às suas características anatômicas. Observou-se que este clone possui a maior fração parede (55,91%), propriedade que se correlaciona positivamente com a densidade básica da madeira, isto é, quanto maior a fração parede, maior a densidade básica, devido ao menor número de espaços vazios (COSTA et al., 2017). Tais características contribuem para o resfriamento, dado que produzem um carvão vegetal com menor porosidade que, conseqüentemente, reduz o isolamento térmico deste material, facilitando a condução de calor (CARRASCO et al., 2016).

Os teores de umidade obtidos tiveram um valor médio de 10,86%, com exceção do torete do clone I 144 pertencente à classe de 11 cm de diâmetro (19,98%). A maior umidade da madeira do clone I 144 interfere significativamente na qualidade do carvão vegetal produzido, principalmente na sua resistência mecânica. Elevados teores de umidade estão relacionados à maior velocidade de expansão e à maior pressão dos gases, produzindo maior teor de finos em função da maior degradação do carvão vegetal (LANA, 2018; JESUS et al., 2019), fator que pode prejudicar o resfriamento do carvão por interferir na permeabilidade dos gases. Além disso, maiores teores de umidade da madeira exigem maiores tempos de secagem e maior consumo

de energia para a evaporação da água, interferindo em todo ciclo de produção do carvão vegetal (FIGUEIRÓ et al., 2019).

A relação cerne/alburno, que indica a proporção de madeira de cerne em relação ao alburno, variou de 0,44 a 1,07 para madeiras com idade média de 7,2 anos, valores próximos aos encontrados por Pereira et al. (2013) para clones de *Eucalyptus* aos 7,5 anos de idade, que obtiveram relação C/A entre 0,49 a 1,01. Para a carbonização, é recomendada uma baixa relação C/A, ou seja, uma menor proporção de madeira de cerne, região menos permeável que o alburno, para favorecer o transporte de água, a secagem da madeira e a movimentação dos gases (PEREIRA et al., 2013; FIGUEIRÓ, 2022; RAMOS et al., 2023).

Quintilhan et al. (2021), ao estudarem as propriedades de *Eucalyptus* e *Corymbia* para preservação de madeira, constataram que a madeira de *Corymbia citriodora* teve a maior proporção de alburno em relação aos clones *E. camaldulensis* e *E. grandis*, resultando em uma porcentagem de área tratada 55,6% maior do que das espécies de *Eucalyptus*, indicando a maior permeabilidade do alburno da madeira de *Corymbia*.

A permeabilidade da madeira indica a capacidade dos fluidos, principalmente da água, se deslocarem entre as suas estruturas (FIGUEIRÓ, 2022). Observa-se que, a permeabilidade do cerne é, em geral, menor que a do alburno, visto que essa região é formada por células fisiologicamente inativas que, frequentemente, apresentam obstruções totais ou parciais em seu interior, por tiloses ou outras substâncias (COSTA et al., 2017). A permeabilidade do cerne do clone I 144 foi 35,5 vezes menor do que a do alburno, enquanto a permeabilidade do clone VM04 foi 15,1 vezes menor do que a permeabilidade do alburno e a permeabilidade do cerne do clone AEC 0043 foi 4,1 vezes menor que a da região do alburno, se mostrando mais permeável do que a madeira do cerne dos clones de *Eucalyptus*, na medida que esse clone se mostrou com uma permeabilidade de cerne 11,1 vezes maior que a do clone I 144 e 7,2 vezes maior que a do clone VM04, apontando, portanto, maior facilidade de translocação de fluidos no clone de *Corymbia*.

As características da madeira, como o conteúdo de extrativos e a presença de tilos, além de diferenças entre gênero e a espécie podem influenciar a permeabilidade da madeira. (ACOSTA et al., 2023). Silva et al. (2010) compararam a permeabilidade de madeiras de *E. grandis* e *C. citriodora* e concluíram que a madeira de eucalipto teve permeabilidade 20% maior que a madeira de *Corymbia* devido ao maior diâmetro médio dos poros. Porém, neste estudo, observou-se que a madeira do clone AEC 0043 teve diâmetro de poro 12,9% e 7,1% maior do que as madeiras dos clones I 114 e VM04, respectivamente. Madihan et al. (2020); Rezende et al. (2018) e Emaminasab et al. (2015) comprovaram a relação positiva entre o diâmetro e a

permeabilidade da madeira em seus estudos, onde foi constatado que a movimentação de líquidos e gases na madeira ocorrem de forma mais eficaz em maiores diâmetros.

Para todos os clones, foi observado um aumento da relação C/A com o incremento em diâmetro, devido à maior proporção de madeira cernificada. A menor relação cerne/alburno média foi observada no clone AEC 0043 (0,68), 33,3% menor do que a relação C/A média encontrada para os clones de *Eucalyptus*. As menores proporções de madeira de cerne facilitam a movimentação de gases devido às menores obstruções das células por tilos e outras substâncias (PEREIRA et al. 2013).

Brito et al. (2019) ao analisarem a permeabilidade de madeiras de eucalipto, verificaram que o alburno foi duas vezes mais permeável do que o cerne devido às obstruções das células do cerne por substâncias resinosas, prejudicando a passagem de fluidos no interior dos elementos condutores da madeira (ACOSTA et al., 2023).

Os valores de lignina total (29,09%) e de holocelulose (65,30%) do clone I 144 são próximos aos observados por Ramos et al. (2023) para clones de eucalipto, exceto os valores encontrados para o teor de extrativos (5,61%) que foram inferiores aos encontrados pelo autor. O menor teor de lignina foi observado para o clone AEC 0043 (21,28%), valor abaixo do mínimo indicado para a produção de carvão vegetal (RAMOS et al., 2013), resultado associado ao seu maior teor de holocelulose (72,24%) e ao maior teor de extrativos (6,48%).

Os teores de lignina total observados para a madeira do clone AEC 0043 foram inferiores aos encontrados por Loureiro et al. (2019) para clones de *C. torelliana* x *C. citriodora* e os teores de holocelulose foram superiores aos encontrados pelos autores, bem como o teor de extrativos totais. Para a produção de carvão vegetal, recomenda-se o uso de materiais genéticos com menores teores de holocelulose, em função da menor resistência térmica desses componentes, resultando em menor contribuição para o rendimento gravimétrico (PEREIRA et al., 2013; RAMOS et al., 2023).

A lignina é a macromolécula de maior importância para a produção de carvão vegetal, pois possui maior resistência à degradação térmica quando comparada à celulose e as hemiceluloses, devido à sua estrutura química aromática, influenciando positivamente o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2016; RAMOS et al., 2023).

A relação S/G varia entre 0,51 a 5,2 dependendo da espécie de madeira (WALLIS et al., 1996; SANTOS et al., 2016) e os resultados observados para a relação S/G variaram entre 2,5 e 28 e foram condizentes com os valores médios obtidos por Pereira et al. (2013) para clones de *Eucalyptus* (2,64%). A qualidade da lignina para a produção de carvão vegetal está

relacionada a menores relações S/G, ou seja, a uma maior quantidade de lignina do tipo guaiacil em sua estrutura. As unidades guaiacil tem maior estabilidade durante a pirólise da madeira devido a maior quantidade de energia necessária para romper as suas ligações, em função da maior polimerização da molécula, implicando em maior rendimento gravimétrico do carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013).

A maior relação S/G foi observada para a madeira do clone I 144, indicando a menor proporção de lignina do tipo guaiacil em sua estrutura, tornando o material menos estável à degradação térmica da madeira. A madeira do clone AEC 0043 teve relação S/G intermediária (2,6), enquanto foi observada a menor relação S/G para o clone VM04 (2,5). É importante ressaltar que apesar dos clones VM04 e AEC 0043 serem termicamente mais estáveis do que o clone I 144 em função das menores relações S/G, eles possuem, respectivamente, teores de lignina total 10,1 e 36,7% menores do que o teor de lignina total da madeira do clone I 144. Além disso, apenas o clone I 144 atingiu teores de lignina acima de 28%, recomendado para a produção de carvão vegetal (29,09%) (PEREIRA et al., 2013; RAMOS et al., 2023).

Os teores de cinzas, fração inorgânica da madeira, dos clones I 144 (0,11%) e VM04 (0,17%) foram semelhantes aos encontrados por Pereira et al. (2013) e os teores obtidos para o clone AEC 0043 (0,35%) foram próximos aos encontrados por Loureiro et. al (2019) para um clone de *C. citriodora* x *C. torelliana* (CCxCt-3) avaliado.

Neste estudo, todos os clones avaliados tiveram teores de cinzas menores que 1%, valor recomendado para a produção de carvão vegetal. Os componentes inorgânicos não são degradados durante a carbonização da madeira, além de serem indesejáveis na indústria siderúrgica, prejudicando a produção de ferro-gusa e ligas, portanto baixos teores são desejáveis na produção de carvão vegetal (BARCELOS et al., 2005; PEREIRA et al., 2013; LOUREIRO et al., 2021).

5.2. Perfis de temperatura

5.2.1 Curva de carbonização e resfriamento do carvão vegetal

Na Figura 4, encontram-se as curvas de carbonização e de resfriamento para cada clone em função da classe diamétrica.

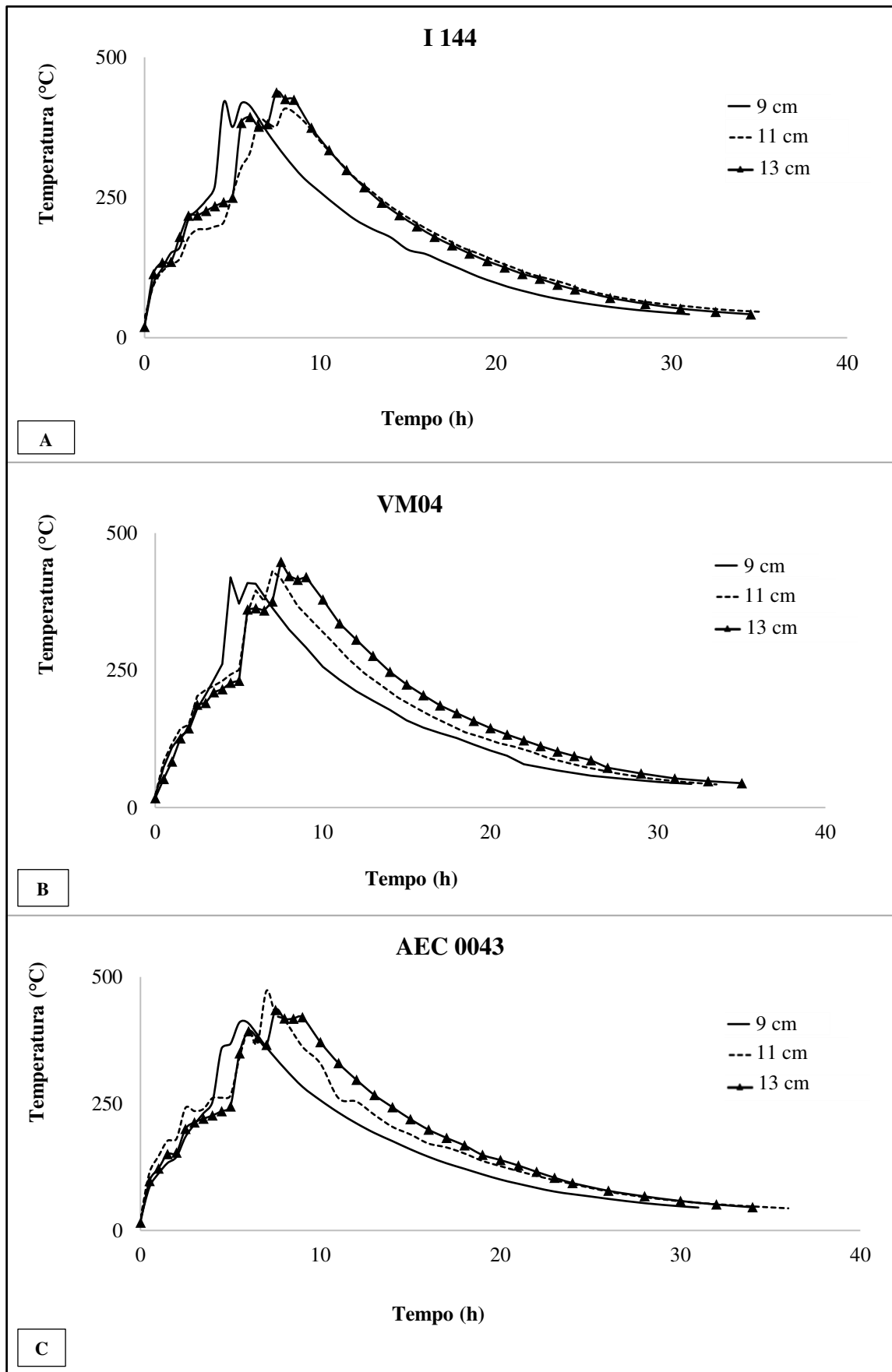


Figura 4. Curva de carbonização e de resfriamento dos clones em função da classe de diâmetro. (A) I 144; (B) VM04; (C) AEC 0043

A carbonização ou pirólise da madeira, caracterizada pela decomposição térmica de seus componentes estruturais, ocorreu até uma faixa de temperatura final entre 400°C a 450°C, como recomendado por Pereira et al. (2013) para a produção de carvão vegetal. O tempo de processo variou de acordo com o diâmetro da madeira, conforme mostrado nas Tabelas 7, 8 e 9. A carbonização é influenciada pelas propriedades da madeira e pelas características do processo, como o tipo de matéria-prima, a temperatura final, a taxa de aquecimento, o tempo de residência, o tipo de reator, dentre outras variáveis (JESUS et al., 2019).

Em geral, neste estudo, observou-se os picos endo e exotérmicos característicos da decomposição térmica da madeira durante a carbonização, principalmente nas fases iniciais de secagem ($\pm 150^\circ\text{C}$) e de degradação das hemiceluloses e parte da celulose (250 – 350°C), além de picos decorrentes da decomposição térmica dos intermediários da pirólise e liberação de gases em função de reações secundárias (PARK et al., 2010; BENNADJI et al., 2013; JESUS et al., 2019).

As curvas de resfriamento têm um comportamento exponencial característico (SANTOS, 2013). Até atingir temperaturas próximas à 100°C, tem queda acentuada, representando, em média, 75,4% da perda de calor ao longo do tempo. Em seguida, observa-se maior dificuldade de perda de temperatura ao longo do tempo até se aproximar da estabilização, devido à maior diferença de temperatura para a transferência de calor e do equilíbrio térmico iminente, visto que o sistema (carvão vegetal, contêiner metálico e mufla) estava próximo de atingir o balanço energético, ou seja, igualar a quantidade de calor que entrou no sistema com a quantidade de calor que saiu para o meio (ÇENGEL, 2012). Damásio et al. (2015) ao analisarem o perfil de temperatura da carbonização em forno circular, também verificaram que abaixo dos 100°C, a redução da temperatura interna do forno ocorreu de forma mais lenta.

O resfriamento, que é o processo de redução da temperatura do carvão vegetal para um nível de manuseio seguro, abaixo de 45°C, permite que o forno seja aberto e o carvão descarregado. Dessa forma, a probabilidade de focos de fogo, aumentada quando o ar atmosférico entra em contato com a massa de carvão vegetal é minimizada (BUSTOS-VANEGAS, 2019).

Ao analisar todo o ciclo, verificou-se que para a classe de 9 cm de diâmetro, o resfriamento representou 80,9% do tempo total. Para a classe diamétrica de 11 cm, o resfriamento representou 77,5% do tempo total e o tempo demandado para o resfriamento dos toretes de 13 cm de diâmetro correspondeu a 74,64% do tempo total de ciclo, comprovando que a etapa de resfriamento consome a maior parte do tempo do processo. O fato de o resfriamento do carvão vegetal de 9 cm de diâmetro representar a maior parte do tempo do ciclo se relaciona

ao menor tempo demandado para a carbonização da madeira em menores diâmetros (JESUS et al., 2019; DONATO et al., 2020).

Oliveira et al. (2013) encontraram um tempo médio de resfriamento, para forno circular de superfície com capacidade de 12 st de madeira, representando 42% do tempo total do ciclo de carbonização para uma temperatura média de copa de 40°C e para Arruda et al. (2011), utilizando fornos retangulares de capacidade 160 st de madeira, o resfriamento representou 50% do tempo total do ciclo, afirmando quão extensa é essa fase do processo. Em observações práticas de campo, para um forno de carbonização retangular de 700 m³, a etapa de resfriamento representa 62,25% de todo o tempo do ciclo. Em geral, para fornos retangulares, o resfriamento pode representar até 77,7% do tempo total de ciclo (OLIVEIRA et al., 2013).

Os tempos de carbonização em função dos clones e das classes diamétricas estão apresentados na Tabela 7. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

Tabela 7. Tempos de carbonização em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira

Diâmetro	Tempo de carbonização (h)			Média
	Material			
	I 144	VM04	AEC 0043	
9 cm	6,0 cA	6,0 cA	6,0 cA	6,00 C
11 cm	8,0 bA	7,5 bA	8,0 bA	7,63 B
13 cm	8,5 aA	9,0 aA	9,0 aA	8,83 A

Letras minúsculas na coluna comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas na linha comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha ou mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Durante a carbonização, observa-se um aumento significativo do tempo com o incremento em diâmetro para todos os clones (Tabela 7). Nota-se com o aumento da classe diamétrica de 9 para 13 cm um incremento médio de 47,17% no tempo de carbonização, assim como no estudo realizado por Jesus et al. (2019) e Donato et al. (2020). Madeiras de maiores diâmetros são mais resistentes à transferência de calor e demoram mais tempo para aquecer, prolongando o tempo de carbonização (PEREIRA et al., 2016; DONATO et al., 2020; FIGUEIRÓ, 2022).

Na Tabela 8, encontram-se os tempos de resfriamento em função dos clones e das classes de diâmetro. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

Tabela 8. Tempos de resfriamento em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira

Diâmetro	Tempo de resfriamento (h)			Média
	I 144	VM04	AEC 0043	
9 cm	25,0 cB	26,0 aA	25,0 cB	25,33 C
11 cm	27,0 aB	26,0 aC	28,0 aA	27,0 A
13 cm	26,0 bA	26,0 aA	26,0 bA	26,0 B
Média	26,0 B	26,0 B	26,33 A	

Letras minúsculas na coluna comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas na linha comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha ou mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Na classe diamétrica de 9 cm, observou-se que os carvões vegetais dos clones I 144 e AEC 0043 tiveram, significativamente, o menor tempo de resfriamento (25 h). Na classe de 11 cm de diâmetro, os maiores tempos de resfriamento foram observados para os carvões vegetais dos clones I 144 e AEC 0043, correspondendo a 27 e 28 horas, respectivamente. Na maior classe de diâmetro, os carvões vegetais de todos os clones demandaram o mesmo tempo para alcançar temperaturas menores ou iguais a 45°C (26 h). Para o clone VM04 não foi observado aumento no tempo de resfriamento com o incremento em diâmetro, gastando 26 horas para resfriar o carvão vegetal até temperaturas menores que 45°C.

Esperava-se que os maiores tempos de resfriamento fossem observados na classe de 13 cm de diâmetro, em função da maior distância a ser percorrida pelo calor do centro até a superfície do torete (PEREIRA et al., 2013; SIQUEIRA, 2021). Porém, para o clone I 144, ao analisar o seu perfil de temperatura, observou-se que o tempo total de ciclo foi impactado pelo maior tempo de secagem da madeira, devido à maior umidade nessa classe de diâmetro (19,98%) em comparação às outras classes que tiveram umidades próximas à 11%. Dessa forma, o incremento médio no tempo de resfriamento do carvão vegetal do clone I 144, na classe diamétrica intermediária, foi de 5,9% em relação ao carvão vegetal do mesmo clone nas demais classes de diâmetro. Por consequência, a curva térmica do clone I 144 de 11 cm de diâmetro foi deslocada para a direita (Figura 4.A), no sentido de aumento de temperatura e aumento do tempo de ciclo (Tabela 9), impactando o tempo de resfriamento em 1 hora e o tempo total do processo em 30 minutos.

Jesus et al. (2019), observaram que os maiores teores de umidade provocam maiores picos endotérmicos na carbonização da madeira, devido ao gasto energético para a evaporação da água, desfavorecendo a formação de carvão e estendendo o tempo total de ciclo e o mesmo comportamento foi observado neste estudo.

Para o clone AEC 0043, o tempo de resfriamento foi 9,85% maior na classe diamétrica de 11 cm, devido ao pico de reações secundárias da degradação térmica da madeira, em função do maior teor de materiais voláteis e, possivelmente, devido ao maior teor de holocelulose e de extrativos deste material, havendo maior liberação de energia acima de 350°C e deslocamento da curva para a direita, resultando em aumento da temperatura final de carbonização (472,58 °C) em comparação aos demais materiais genéticos e demais classes de diâmetro (Figura 4.C), estendendo, conseqüentemente, o tempo de resfriamento e o tempo total de ciclo, como mostram as Tabelas 8 e 9. Bilbao et al. (1996) e Jesus et al. (2019) afirmaram que, além do teor de umidade, o teor de hemiceluloses presente na madeira tem grande influência nas reações endotérmicas durante a pirólise, havendo maior consumo de energia nas fases iniciais de degradação térmica, entre 40 e 270°C, estendendo todo o tempo de processo.

Durante a degradação da holocelulose há uma elevada produção de gases condensáveis e não condensáveis, resultando em mais reações secundárias e em maiores picos exotérmicos ao final da carbonização, elevando a temperatura de pirólise da madeira do clone AEC 0043 (PEREIRA et al., 2012; LOUREIRO et al., 2019).

No resfriamento, salienta-se que houve deposição de kinos e de alcatrão no carvão vegetal do clone AEC 0043, o que pode ter promovido a maior resistência no decaimento da temperatura na 12ª e 17ª hora de resfriamento.

Os tempos totais de ciclo em função dos clones e das classes diamétricas são apresentados na Tabela 9. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

Tabela 9. Tempos totais de ciclo em função dos clones e da classe de diâmetro da madeira

Diâmetro	Tempo total (h)			Média
	Material			
	I 144	VM04	AEC 0043	
9 cm	31,0 cB	32,0 cA	31,0 cB	31,33 B
11 cm	35,0 aB	33,5 bC	36,0 aA	34,83 A
13 cm	34,5 bB	35,0 aA	35,0 bA	34,83 A
Média	33,5 B	33,5 B	34,0 A	

Letras minúsculas na coluna comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas na linha comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha ou mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Os tempos totais de ciclo foram significativamente menores na classe de diâmetro de 9 cm, independente do material genético utilizado para a produção de carvão vegetal. Sabe-se

que o diâmetro da madeira tem grande influência no fluxo de energia térmica e, em menores diâmetros, o tempo para que o calor atinja as regiões mais internas da madeira tende a ser menor (SHEN et. al, 2009; JESUS et. al, 2019).

O maior tempo total de ciclo foi observado no clone AEC 0043 na classe diamétrica intermediária (11 cm), representando um incremento médio de 9,49% no tempo total em relação às classes de 9 e 13 cm deste mesmo clone e um incremento médio de 5,16% em relação aos clones I 144 e VM04.

É importante ressaltar que a madeira de AEC 0043 na classe de diâmetro de 11 cm, além do maior teor de holocelulose e de extrativos comum à todas as classes diamétricas, apresentou elevada deposição de alcatrão na peça de carvão vegetal, como mostra a Figura 5.

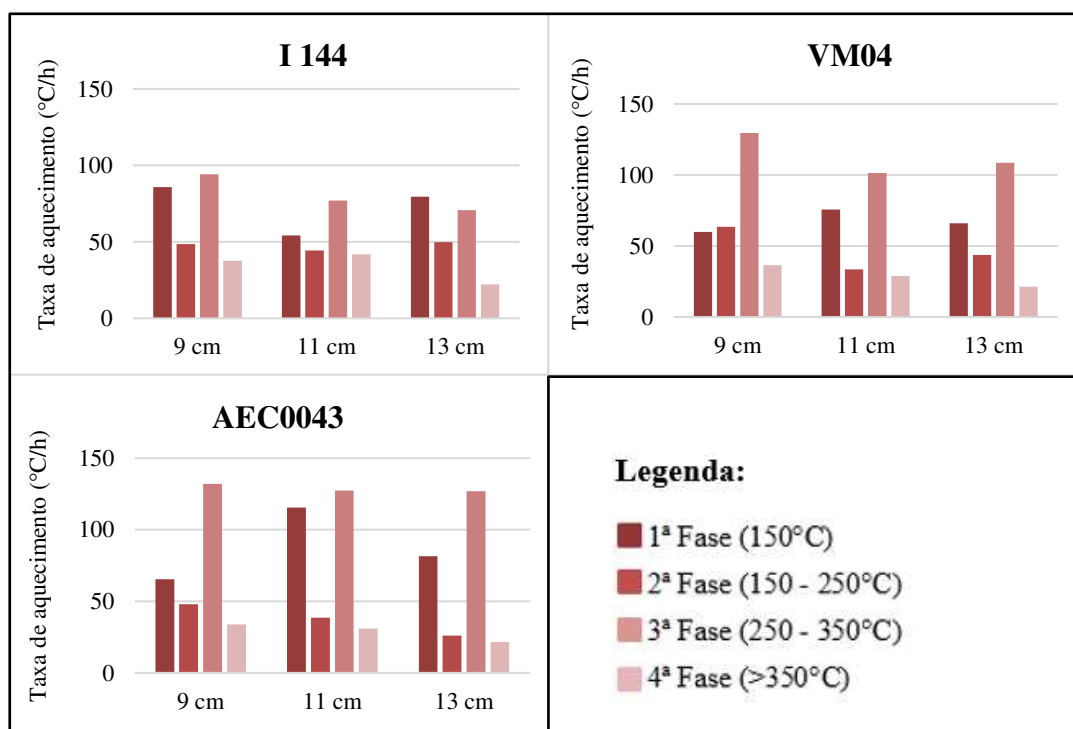


Figura 5. Deposição de alcatrão no carvão vegetal do clone AEC0043 de 11 cm de diâmetro

Os kinos e o alcatrão depositados sobre o carvão vegetal contribuem para a ocorrência de reações secundárias, elevação de temperatura e dificulta a circulação de gases na massa de carvão e, conseqüentemente, a troca de calor com o meio. Os kinos são exsudatos característicos em espécies do gênero *Corymbia* e caracterizados pelo alto teor de taninos e polifenóis (NOBAKTH et al., 2014; BRANDÃO, 2019). Prauchner et al. (2001), ao caracterizarem o alcatrão de eucalipto, observaram que esses compostos são mais reativos por apresentarem maiores relações O/C e H/C. Em função da maior densidade do carvão vegetal do clone AEC 0043, sugere-se também que devido a maior massa presente no contêiner metálico para uma mesma vazão durante a remoção dos gases nos tratamentos, o gás tende a ficar mais tempo no reator, favorecendo a deposição dos kinos e do alcatrão.

5.2.2. Taxa de aquecimento (TA) da madeira durante a carbonização

A taxa de aquecimento envolve o tempo de reação e a temperatura em que ocorre o processo de carbonização da madeira (SIEBENEICHLER et al., 2017). Na Figura 6 são apresentadas as taxas de aquecimento da madeira, por fase da carbonização, em função da classe diamétrica para cada clone.



Observou-se que, em geral, as maiores taxas de aquecimento corresponderam à primeira (150°C) e à terceira (250 – 350°C) fases da carbonização, que correspondem às fases de secagem e de degradação térmica dos principais componentes da madeira, respectivamente. Para a segunda e a quarta fases da carbonização foram observadas as menores taxas de aquecimento (Figura 6).

No início da carbonização, entre 100 e 200°C, está ocorrendo a secagem da madeira, havendo apenas a liberação de vapor d'água (CARNEIRO et al., 2013; CANAL et al., 2016; COSTA et al., 2020). Para que a secagem ocorra, é necessário um consumo da energia térmica gerada no processo e também a energia fornecida pela mufla, caracterizando essa fase como endotérmica. Dessa forma, quanto maior for o teor de umidade da madeira, maior será o gasto energético, retardando a liberação de calor e o aquecimento (JESUS et al., 2019). Neste estudo,

a primeira fase da carbonização ($\leq 150^{\circ}\text{C}$) abrangeu a maior parte da fase de secagem da madeira, havendo consumo energético para a liberação do vapor d'água, porém, maior taxa de aquecimento ($75,96^{\circ}\text{C/h}$) em relação à segunda e quarta fases da carbonização que se dá pela própria secagem, dado que, conforme a madeira seca, sua temperatura é elevada (SANTINI, 2000) até o início da degradação de seus componentes. A presença de água na madeira, na fase inicial da secagem, pode ter contribuído para o aumento da condutividade térmica, pois a água conduz o calor de forma mais efetiva do que a madeira (INCROPERA, 2014; CARRASCO et al., 2016).

A segunda fase da carbonização, também caracterizada como endotérmica, representa a fase final da secagem, até 200°C e o início da degradação das hemiceluloses (JESUS et al., 2019; COSTA et al., 2020), não havendo consumo ou liberação de calor significativos, resultando em uma taxa de aquecimento média de 44°C/h .

Acima de 200°C até temperaturas próximas a 400°C está ocorrendo a degradação das hemiceluloses e da celulose (SHEN et al., 2010; COSTA et al., 2020). Neste estudo, a terceira fase da carbonização (250 e 350°C) é marcada pelo fim das reações endotérmicas com a degradação das hemiceluloses ($220 - 315^{\circ}\text{C}$), além do início das reações exotérmicas, com a decomposição da maior parte da celulose ($> 315^{\circ}\text{C}$), elevando as taxas de aquecimento a valores médios de $107,57^{\circ}\text{C/h}$, principalmente devido à maior liberação de energia térmica (YANG et al., 2006; JESUS et al., 2019; COSTA et al., 2020).

Na quarta fase da carbonização ($>350^{\circ}\text{C}$), ainda há degradação de celulose e decomposição térmica da lignina que ocorre lentamente devido à sua elevada estabilidade térmica, não havendo um pico de degradação desse componente (YANG et al., 2007; PEREIRA et al., 2013; COSTA et al., 2020; RAMOS et al., 2023) e, conseqüentemente, não havendo a liberação de grandes quantidades de calor na fase final da carbonização, resultando em menores taxas de aquecimento ($30,53^{\circ}\text{C/h}$).

Na Figura 7 são apresentadas as taxas de aquecimento da madeira por fase da carbonização. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

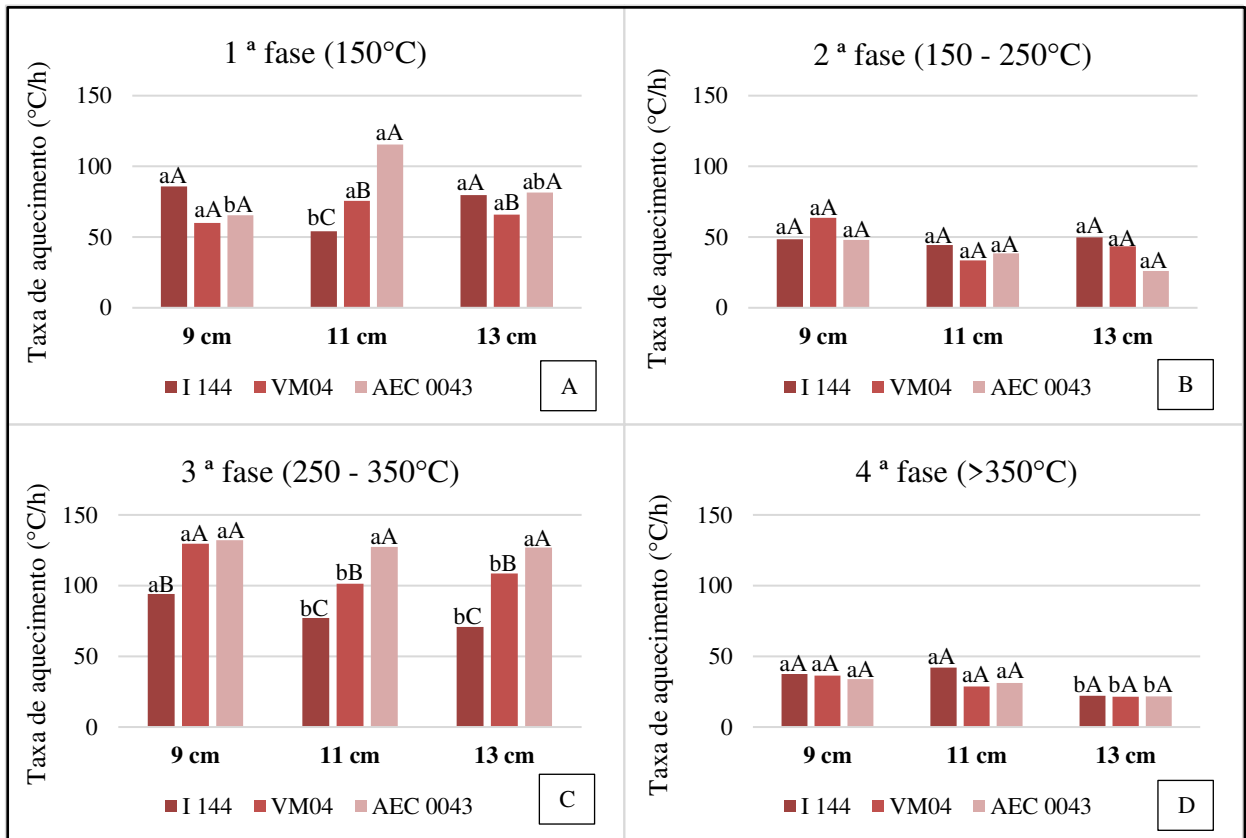


Figura 7. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Para o clone VM04, na primeira fase da carbonização (Figura 7.A), a taxa de aquecimento (TA) não foi influenciada pela classe diamétrica, tendo um valor médio de 67,2°C/h, que pode ser explicada pela baixa variação de umidade entre as classes de diâmetro, com média 10,62% ± 0,40, propriedade diretamente relacionada com o tempo e temperatura do processo de pirólise, ou seja, com a velocidade de aquecimento da madeira (JESUS et al., 2019). Houve diferença significativa na taxa de aquecimento da madeira desse clone nas classes de diâmetro de 11 e 13 cm, em virtude da menor permeabilidade do alburno, sendo 52,52 e 96,80% menor do que a permeabilidade do alburno dos clones I 144 e AEC 0043, respectivamente. Além disso, a relação C/A da madeira na classe de 13 cm de diâmetro foi de 1,06, indicando maior quantidade de cerne na madeira. A menor permeabilidade do alburno associada à maior

proporção cerne dificultam a secagem, pois comprometem a passagem de fluidos na madeira (PEREIRA et al., 2013; FIGUEIRÓ, 2022).

Na classe diamétrica intermediária, o clone I 144 diferiu significativamente dos demais na primeira fase da carbonização, tendo uma TA de 54,13 °C/h (Figura 7.A), sendo 34,47% menor em relação às outras classes, resultado explicado pelo maior teor de umidade desse material, acarretando em menor taxa de aquecimento, devido à maior energia utilizada para a secagem, delongando a sua fase endotérmica (JESUS et al., 2019). Durante a pirólise da madeira, a umidade diminui a taxa de aquecimento devido ao consumo de energia térmica para aquecimento e vaporização da água, além de aumentar a inércia térmica da madeira (HASSAN et al., 2017; JESUS et al., 2018).

Para o clone AEC 0043 na classe de 11 cm de diâmetro, a TA foi significativamente maior (115,52°C/h) em comparação às outras classes diamétricas e aos demais clones, em decorrência da maior permeabilidade média do alburno (448,99 cm³/cm.atm.s) e do cerne (108,45 cm³/cm.atm.s), respectivamente, 1,6 e 9,1 vezes maior, do que a permeabilidade do alburno e do cerne dos clones de *Eucalyptus*. Madeiras mais permeáveis e com menor quantidade de cerne são favoráveis para o processo de secagem e de carbonização, em função do menor impedimento à movimentação de água do interior para a superfície da peça e da facilidade de movimentação de gases na madeira (BRITO et al., 2019).

Além disso, observou-se que a relação cerne/alburno da madeira do clone AEC 0043 na classe de diâmetro intermediária foi inferior (0,70) aos valores de relação C/A encontrados para as madeiras dos clones I 144 e VM04 nas classes diamétricas de 9 e 11 cm, indicando maior quantidade de alburno e, conseqüentemente, maior permeabilidade desse material. Para fins energéticos, menores relações C/A são desejáveis na fase de secagem da madeira pela maior proporção de alburno, região fisiologicamente ativa, com maior permeabilidade e maior facilidade de movimentação dos fluidos (PEREIRA et al., 2013; BRITO et al., 2019).

Durante a terceira fase da carbonização (Figura 7.C), a TA foi significativamente maior para as madeiras dos clones de *Eucalyptus* na menor classe diamétrica (111,89 °C/h) e nas demais classes, não houve diferença significativa no aumento de temperatura por hora (89,48 °C/h). Neste estudo, foram encontradas as menores relações C/A para a classe diamétrica de 9 cm, indicando menor quantidade de madeira cernificada, menos obstruções e maior facilidade de movimentação de gases. Brito et. al (2019) encontraram correlações significativas entre o diâmetro e a porcentagem de cerne na madeira, atestando a influência positiva do aumento em diâmetro na quantidade de cerne. Os autores também observaram que os valores de permeabilidade e de relação C/A foram inversamente proporcionais.

Ainda na terceira fase da carbonização, observou-se diferença significativa entre os materiais genéticos nas classes de 11 e 13 cm de diâmetro, sendo as taxas de aquecimento significativamente menores para o clone I 144 (11 cm – 77,04 °C/h e 13 cm – 70,81 °C/h), intermediárias para o clone VM04 (11 cm – 101,45 °C/h e 13 cm – 108,61 °C/h) e significativamente maiores para o clone AEC 0043 (11 cm – 127,33 °C/h e 13 cm – 127 °C/h). Na classe de 9 cm de diâmetro, houve diferença significativa apenas para o clone I 144, sendo a taxa de aquecimento 38,9% menor do que as taxas de aquecimento das madeiras dos clones VM04 e AEC 0043.

As menores taxas de aquecimento da madeira do clone I 144 podem ser explicadas pelos maiores teores de umidade desse material na classe de diâmetro intermediária e pela maior dificuldade de remoção de água da madeira, devido à maior quantidade de cerne e a menor permeabilidade, tanto do cerne, quanto do albarno em relação aos demais materiais nas classes de 11 e 13 cm de diâmetro. Para a retirada da umidade, uma parte da energia do processo de carbonização é utilizada, diminuindo o fluxo de calor no interior da madeira e quanto menor for a permeabilidade do material, maior serão os obstáculos para a movimentação dos fluidos na madeira (DI BLASI et al., 2001; FIGUEIRÓ, 2022).

Na quarta fase da carbonização (Figura 7.D), fase de fixação do carbono, não se observou diferença significativa entre os materiais genéticos para a taxa de aquecimento, porém foi observada uma TA inferior na maior classe de diâmetro, com um aumento de temperatura médio de 21,76 °C/h, sendo 1,6 vezes menor do que a TA média das madeiras nas outras classes diamétricas. Ressalta-se que o diâmetro é uma das variáveis que mais afetam a transferência de calor na madeira (JESUS et al., 2019). Figueiró (2022), realizando estudos sobre a secagem artificial de toretes de madeira, também obteve as menores taxas de aquecimento para as madeiras de maior diâmetro, devido à maior resistência à transferência de calor por convecção.

5.2.3. Tempo de transferência de calor (Ttc) durante a carbonização da madeira

O tempo de transferência de calor na carbonização corresponde ao tempo necessário para que a madeira ganhe 1°C e varia conforme a matéria-prima e o controle do processo. Na Figura 8 são apresentados os tempos de transferência de calor durante a carbonização em função do clone e classe de diâmetro dos toretes.

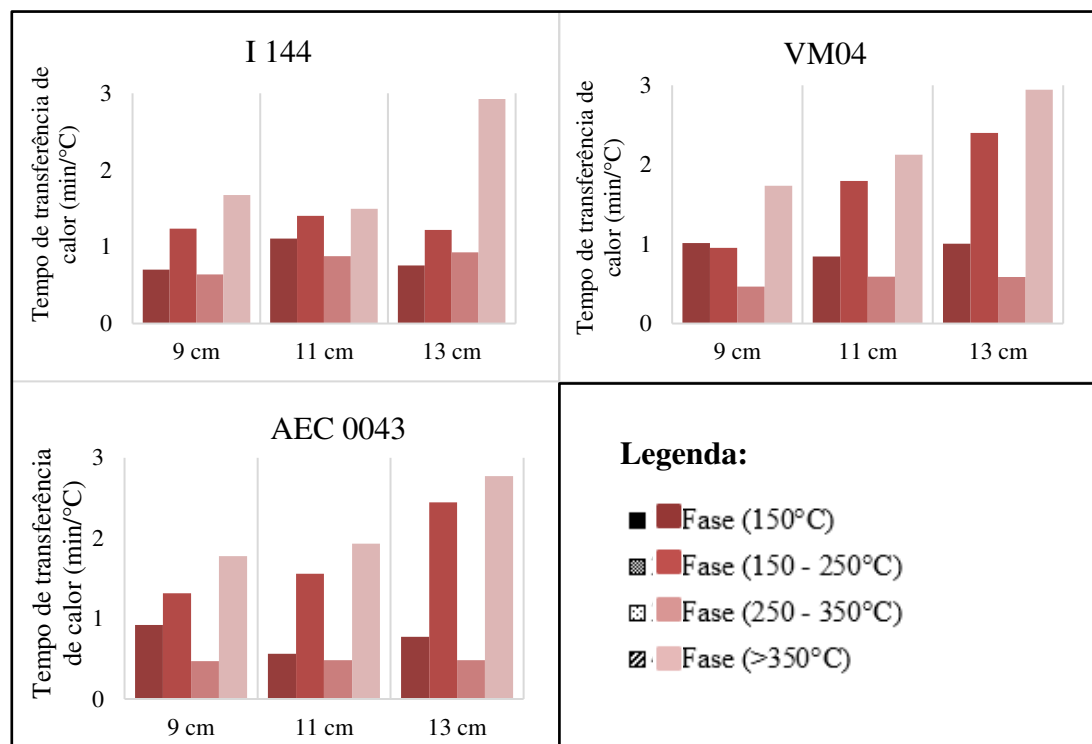


Figura 8. Tempo de transferência de calor da carbonização ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) dos clones em função da classe diamétrica

Como esperado, de maneira geral, os menores tempos de transferência de calor ocorreram na primeira e na terceira fases da carbonização, ou seja, nessas fases houve menor demanda de tempo para que a temperatura da madeira aumentasse em 1°C , corroborando com os resultados observados para taxa de aquecimento.

Na primeira fase da carbonização, o menor tempo de transferência de calor relaciona-se ao aumento de temperatura da madeira em função da liberação do vapor d'água durante a secagem, reduzindo a sua umidade (SANTINI, 2000). Além disso, a água presente na madeira na fase inicial da secagem, pode ter contribuído positivamente para o aumento da condutividade térmica, visto que a água possui maior valor de condutividade térmica do que a madeira, conduzindo o calor de forma mais eficiente (INCROPERA, 2014; CARRASCO et al., 2016). Porém, sabe-se que a água possui alto calor específico e tende a prejudicar o incremento em temperatura durante a carbonização (JESUS et. al, 2019), dessa forma, é importante ressaltar que a contribuição da água na condutividade térmica pode ser pequena e por um curto espaço de tempo.

Observou-se que na terceira fase da carbonização, fase exotérmica do processo, o tempo médio de transferência de calor é significativamente menor, devido à maior liberação de energia em um curto espaço de tempo, proveniente da degradação térmica dos principais componentes da madeira, principalmente das hemiceluloses e a celulose, além da liberação de energia

causada pelas reações secundárias (JESUS et al., 2019; COSTA et al., 2020). Assim como Jesus et al. (2019), foi observado neste trabalho que houve um maior aquecimento após a liberação de toda a água da madeira, devido ao início das reações exotérmicas.

Na Figura 9 são apresentados os tempos de transferência de calor por fase da carbonização. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

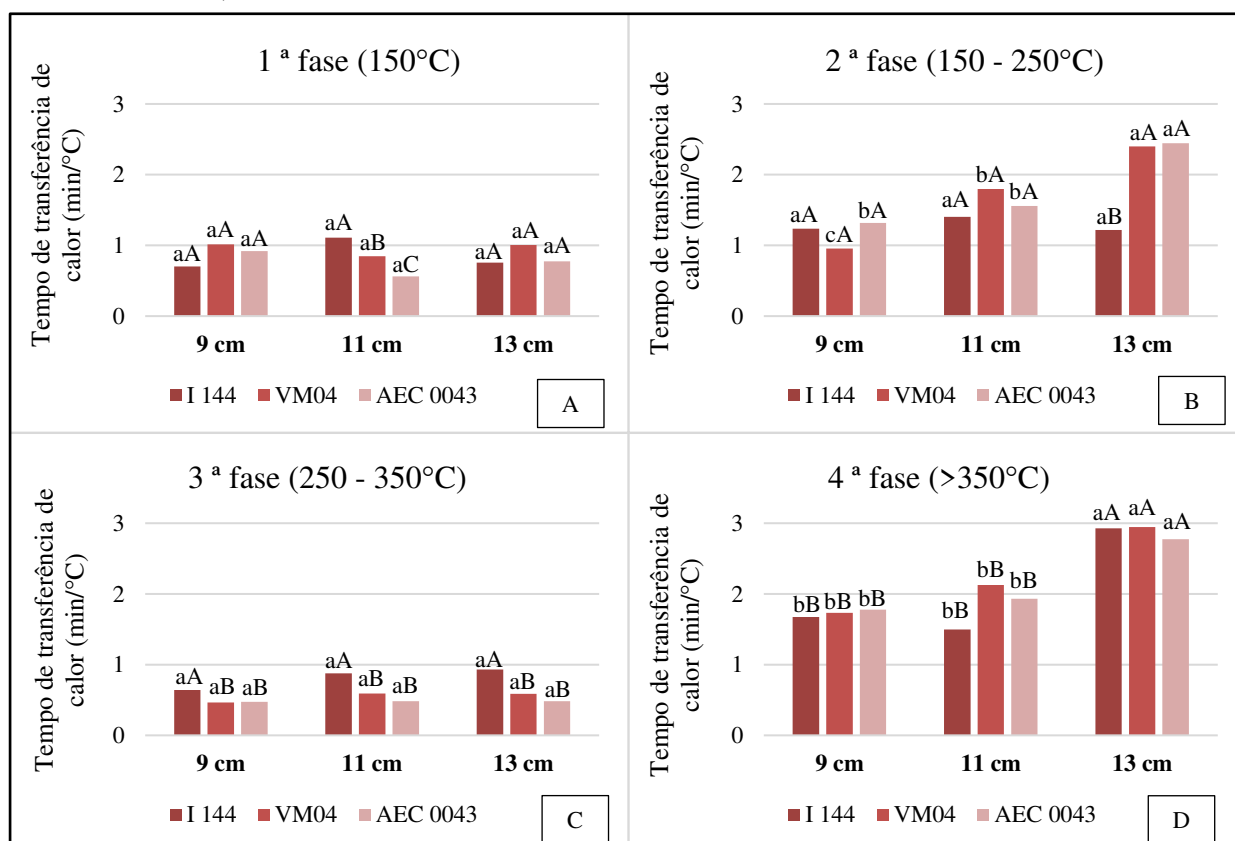


Figura 9. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais; D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Os tempos de transferência de calor na primeira fase da carbonização não tiveram diferença significativa entre clones, exceto na classe de diâmetro intermediária, na qual foi verificado o maior Ttc (1,11 min/°C) para a madeira do clone I 144 (Figura 9.A). Jesus et al. (2019) ressaltaram que abaixo de 11% de umidade, não há influência significativa da água na taxa de aquecimento, porém a madeira do clone I 144 na classe diamétrica de 11 cm teve um

teor de umidade elevado comparado aos demais (19,98%), sendo 93,42% e 77,28% maior do que o teor de umidade das madeiras dos clones VM04 e AEC 0043, respectivamente.

A presença de umidade na madeira reduz a taxa de aquecimento, aumentando o tempo para que a madeira aqueça 1°C, visto que parte da energia do processo precisa ser utilizada para a evaporação da água. Apesar da água ter a tendência de aumentar a condutividade térmica do meio, seu alto calor específico dificulta o aumento de temperatura da madeira, implicando em maiores tempos para a transferência da energia térmica (BRYDEN et al., 2022; YU et al., 2011;).

A madeira do clone de *Corymbia* atingiu, significativamente, o menor Ttc durante a carbonização (0,56 min/°C), devido à sua maior facilidade de secagem (Figura 9.A) e ao seu menor teor de umidade, dado que quanto maior a densidade da madeira, menor tende a ser a quantidade de água presente no material (SILVA et al., 2022). Além disso, a madeira do clone AEC 0043 teve maior permeabilidade no cerne e no alburno, além da menor relação C/A, favorecendo a movimentação de gases e a transferência de calor durante a carbonização (PEREIRA et al., 2013; FIGUEIRÓ, 2022).

Na segunda fase da carbonização (Figura 9.B) foi observada diferença significativa para os materiais genéticos apenas na maior classe de diâmetro (13 cm), sendo a madeira do clone I 144 com o menor Ttc (1,22 min/°C). Nesta fase está ocorrendo o final da secagem da madeira e o início da degradação das hemiceluloses, com liberação de voláteis (COSTA et al., 2020). O menor Ttc associado ao clone I 144 pode estar relacionado à sua menor densidade básica (464,24 kg/m³) e a sua menor fração parede (46,92%).

Durante a terceira fase da carbonização (Figura 9.C), observou-se diferença significativa no Ttc da madeira do clone I 144 em todas as classes de diâmetro, quando comparado às madeiras dos clones VM04 e AEC 0043, com tempos médios de transferência de calor sendo 36,17% maior para a classe de 9 cm de diâmetro, 66,24% maior para a classe diamétrica de 11 cm e 75,69% maior para a classe de 13 cm de diâmetro, evidenciando um aumento no tempo de transferência de calor com o aumento do diâmetro.

O comportamento do I 144 na terceira fase da carbonização pode estar associado ao seu maior teor de umidade médio (14,24%), retardando a fase exotérmica e impactando a elevação da temperatura da madeira para atingir a próxima fase da carbonização, além do maior teor de lignina deste clone, resultando em maior aumento de temperatura em função da degradação térmica da lignina e de suas reações secundárias (JESUS et al., 2019).

Na última fase da carbonização (Figura 9.D), de fixação do carbono, os maiores tempos de transferência de calor ocorreram na maior classe de diâmetro para todos os clones,

apresentando um valor médio de 2,88 min/°C, apontando uma maior demanda de tempo de transferência da energia térmica do centro para a borda da peça, em função do maior diâmetro, aumentando a espessura da camada isolante e reduzindo a transferência de calor convectiva (PELLEGRINI, 2019; FIGUEIRÓ, 2022). Jesus et al. (2019), ao estudarem toras em diferentes classes de diâmetro, constataram que a resistência à transferência de calor aumentou com o diâmetro da peça, observando que o diâmetro é a principal variável que interfere o fluxo de calor na madeira durante a carbonização.

5.2.4. Taxa de resfriamento (TR) do carvão vegetal

A taxa de resfriamento representa o decaimento de temperatura do forno de carvão vegetal ao longo do tempo e na Figura 10 são apresentadas as taxas de resfriamento em função do clone e da classe de diâmetro. Observa-se uma expressiva queda de temperatura no início do resfriamento quando comparado ao final do processo, entre 100°C e 45°C, portanto foi feita uma divisão do tempo de resfriamento por faixas de temperatura, possibilitando a análise do comportamento do resfriamento em diferentes estágios.

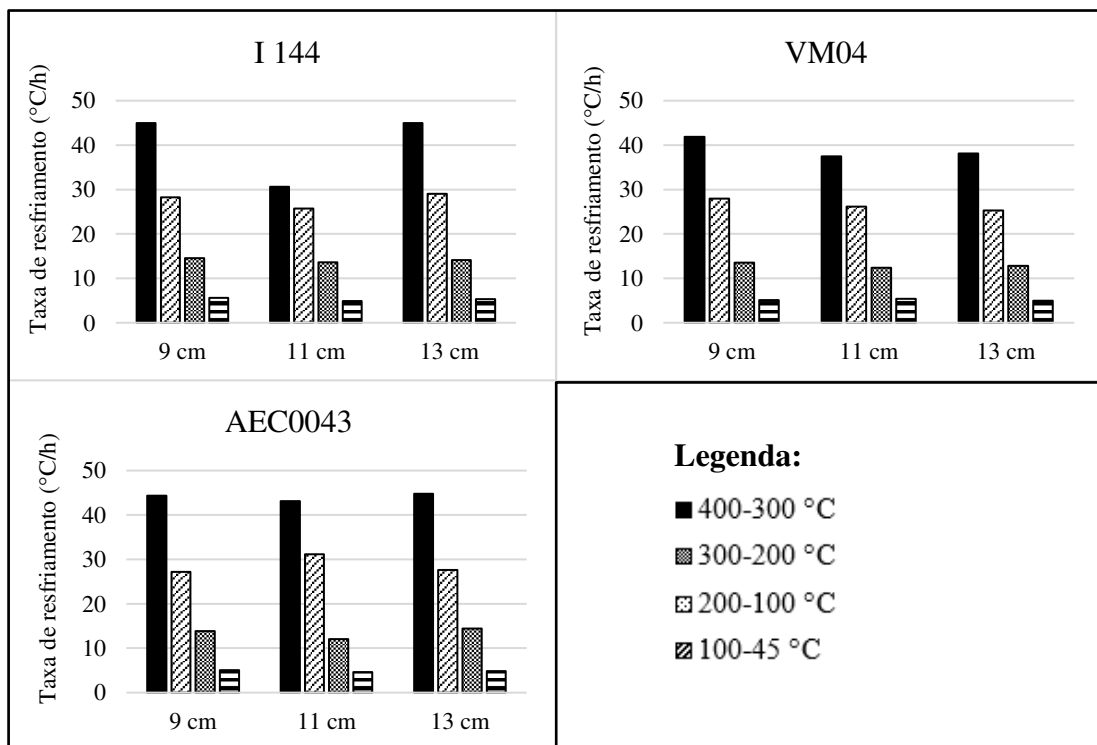


Figura 10. Taxa de resfriamento (°C/h) dos clones em função da faixa de temperatura

Durante o resfriamento, devido à variação de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo, há transferência de energia no sentido de redução da temperatura por condução, convecção e radiação (INCROPERA, 2014; FELIZARDO et al., 2016; PELLEGRINI, 2019).

O calor é uma forma de energia que se transfere entre diferentes sistemas ou entre um sistema (conjunto carvão vegetal, contêiner metálico e mufla) e o meio externo, devido à uma diferença de temperatura (ÇENGEL, 2012). Temperaturas mais elevadas representam maior agitação e energia de moléculas, e, desta forma, há uma transferência, por meio de choque entre moléculas vizinhas, bem como de movimentos moleculares aleatórios, movimentos globais e pela emissão de energia pela matéria, das moléculas mais energéticas para as menos energéticas, que apresentam menores temperaturas (INCROPERA, 2014; FIGUEIRÓ, 2022).

Em geral, as maiores taxas de resfriamento foram observadas na primeira faixa de decaimento de temperatura, entre 400 e 300°C (Figura 10), correspondendo às maiores quedas de temperatura por hora para os carvões vegetais, independente do clone e classe diamétrica, equivalendo a um decaimento médio de 40,17 °C/hora para o carvão vegetal do clone I 144, 39,14 °C/hora para o carvão vegetal do clone VM04 e 44,09 °C/h para o carvão vegetal do clone AEC 0043.

As taxas de resfriamento na primeira faixa de decaimento de temperatura para os carvões vegetais dos clones I 144, VM04 e AEC 0043 foram, respectivamente, 7,65, 7,63 e 8,39 vezes maior do que a última faixa de decaimento de temperatura analisada (100 – 45°C). Esse comportamento se deve a maior variação de temperatura entre o carvão vegetal, que estava com temperaturas superiores à 400°C no início do resfriamento e o meio externo, que se encontrava em temperatura média de 19,6°C (INMET, 2022), permitindo maior troca de calor e maior velocidade de decaimento de temperatura nas primeiras horas de resfriamento, devido à maior força motriz formada pelo maior delta de temperatura entre os sistemas (INCROPERA, 2014).

Devido à distribuição de temperatura desigual entre o meio externo e o conjunto mufla, contêiner metálico e carvão vegetal, o fluxo de energia ocorre da região de maior temperatura para a de menor temperatura (FIGUEIRÓ, 2022; PELLEGRINI, 2019) e maiores gradientes de temperatura aumentam a condutividade térmica da madeira, acelerando o decaimento de temperatura (HASSAN et al., 2017).

Na Figura 11 são apresentadas as taxas de resfriamento do carvão vegetal, por faixa de decaimento da temperatura. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

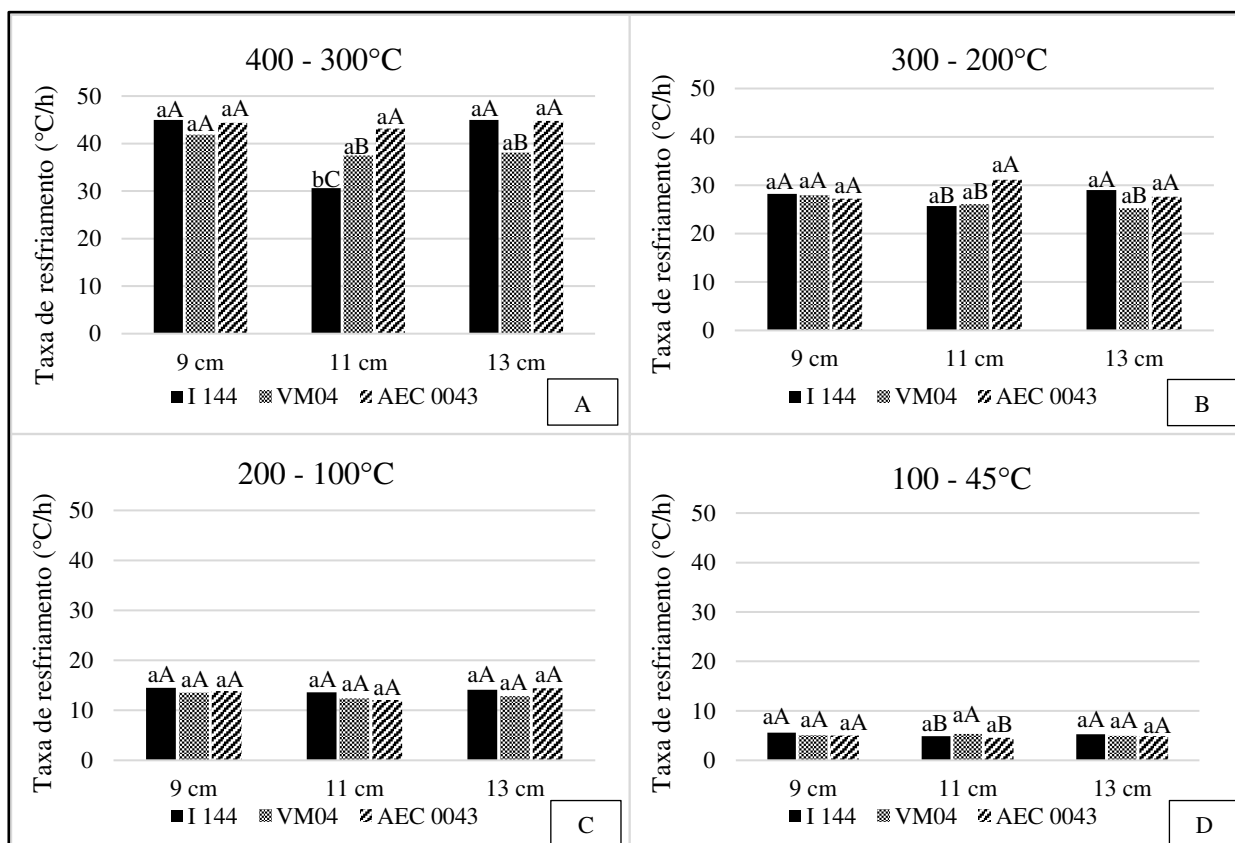


Figura 11. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Entre 400 e 300°C (Figura 11. A), faixa onde há o maior declínio de temperatura, houve diferença significativa para os carvões vegetais dos clones I 144 e AEC 0043 na taxa de resfriamento. O carvão vegetal do clone I 144 na classe de 11 cm de diâmetro teve maior porosidade (83,75%), ou seja, maior número de espaços vazios em sua estrutura (Tabela 9), o que dificulta o fluxo de calor da região mais quente para a região mais fria do carvão vegetal e para o meio externo, reduzindo a condutividade térmica e, por consequência, reduzindo o decaimento da temperatura (INCROPERA, 2014). A porosidade é uma característica que está diretamente relacionada à condutividade térmica de um material sólido, como o carvão vegetal (NUNES, 2013; RAMOS et al., 2021).

Para o clone AEC 0043, o carvão vegetal produzido teve, significativamente, a maior TR na classe intermediária de diâmetro (43,13 °C/h). Este resultado foi observado em função

de algumas propriedades da madeira (Tabela 6) e do carvão vegetal (Tabela 9) de *Corymbia* que favoreceram a transferência de calor, como a menor relação C/A da madeira, a menor porosidade (69,54%) e a maior densidade aparente do carvão vegetal (480,38 kg/m³). Quanto menor a porosidade do carvão vegetal, menor a resistência térmica e maior a condução do calor através do material, ou seja, a porosidade e a condutividade térmica têm relação inversamente proporcional (RAMOS et al., 2021).

Além disso, observou-se maior pico exotérmico da madeira do clone AEC 0043 na classe de 11 cm de diâmetro durante a carbonização, em função da degradação da holocelulose, que apresentaram os maiores teores para esse clone, bem como das reações secundárias, acarretando em uma temperatura final de carbonização elevada (472,58°C) e gerando, por consequência, uma maior variação de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo, acelerando a troca de calor com o meio (ÇENGEL, 2012) e o aumento a taxa de resfriamento na fase inicial do processo. O mesmo comportamento foi observado na faixa de decaimento de temperatura de 300 a 200°C (Figura 11.B).

A taxa de resfriamento depende da perda de calor por condução, convecção, radiação e do calor gerado nas reações de oxidação dentro do leito de carvão (BUSTOS-VANEGAS et al., 2019). É importante ressaltar que na faixa de decaimento de temperatura de 300 a 200°C, onde houveram diferenças significativas para os carvões vegetais de AEC 0043 da classe diamétrica de 11 cm, devido a reações secundárias que ocasionaram reações de oxidação na peça de carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2015).

Nas duas primeiras faixas de decaimento de temperatura, o carvão vegetal do clone VM04 na maior classe de diâmetro teve uma TR significativamente menor (25,25°C/h) em relação aos carvões vegetais dos clones I 144 e AEC 0043 (Figura 11.A e 11.B). A maior dificuldade para o decaimento da temperatura em relação aos demais clones pode estar relacionado à relação cerne/alburno da madeira acima de 1 (1,06), indicando a maior proporção de cerne em relação ao alburno, além da menor permeabilidade do alburno (228,10 cm³/cm.atm.s), dificultando a movimentação de gases (FIGUEIRÓ, 2022). A porosidade e a densidade aparente do carvão vegetal do clone VM04 tiveram valores intermediários em relação aos carvões vegetais dos clones AEC 0043 e I 144.

Entre 200 a 100°C não foi observada diferença significativa nas taxas de resfriamento dos clones nas classes de diâmetro, sendo a TR média de 13,49°C/h (Figura 11.C), três vezes menor do que a TR média da primeira faixa de decaimento de temperatura, entre 400 e 300°C, reforçando o comportamento exponencial característico na dinâmica de resfriamento do carvão vegetal.

No final do resfriamento, que corresponde à faixa de temperatura definida entre 100 e 45°C (Figura 11.D), houve diferença significativa na TR do carvão vegetal do clone VM04 da classe de 11 cm de diâmetro, que atingiu 5,37 °C/h, valor 13,4% maior, em média, do que as taxas de resfriamento obtidas para os carvões vegetais dos clones I 144 e AEC 0043 nessa mesma faixa de temperatura. A taxa de resfriamento média nessa faixa de decaimento de temperatura foi 8,1 vezes menor do que a primeira faixa de decaimento de temperatura no início do resfriamento.

A menor taxa de resfriamento do carvão vegetal de I 144 na classe de 11 cm de diâmetro está relacionada às propriedades do carvão, principalmente no que tange a sua maior porosidade e maior quantidade de cerne que dificultam a perda de calor do carvão vegetal para o meio externo. Carvões vegetais mais porosos possuem mais espaços vazios intercelulares que reduzem a transferência de calor, pois o fluxo de calor se dá em maior velocidade em meio sólido comparado ao vácuo ou ao meio gasoso (INCROPERA, 2014; RAMOS et al., 2021). Em meio poroso, características como a densidade, a composição e a porosidade interferem na quantidade de calor transferida por unidade de área (REIS, 2009; CARRASCO et al., 2016; SANTOS et al., 2020).

Para o carvão vegetal do clone AEC 0043 na classe de diâmetro intermediária, a maior resistência à saída de calor ao final do resfriamento pode estar relacionada à deposição de kinos e alcatrão no carvão vegetal e ao maior teor de cinzas, elevando a temperatura, dificultando a circulação de gases e a troca térmica, além de aumentar o risco de focos de fogo. Por ser um material heterogêneo, o fluxo de energia na madeira e no carvão vegetal varia conforme os diferentes planos anatômicos e as irregularidades presentes, como nós, fendas e a própria deposição de kinos e alcatrão na superfície do carvão vegetal (CARRASCO et al., 2016).

Prauchner et al. (2001), ao caracterizarem o alcatrão de eucalipto, observaram que esses compostos são mais reativos por apresentarem maiores relações O/C e H/C e são mais sensíveis à degradação térmica. Os kinos são exsudatos característicos em espécies do gênero *Corymbia* e caracterizados pelo alto teor de taninos e polifenóis (NOBAKTH et al., 2014; BRANDÃO, 2019). Ressalta-se que, em função da maior densidade do carvão vegetal do clone AEC 0043, a maior massa presente no contêiner metálico para uma mesma vazão durante a remoção dos gases nos tratamentos implica em maior tempo de residência do gás tende no reator, favorecendo a deposição dos kinos e do alcatrão.

Um estudo desenvolvido por Sujanti e Zhang (1999) indicaram que o teor de inorgânicos no carvão mineral pode favorecer a oxidação do carvão, dificultando o resfriamento e aumentando o risco de focos de fogo no carvão vegetal.

5.2.5. Tempo de transferência de calor (T_{tc}) durante o resfriamento do carvão vegetal

O tempo de transferência de calor durante o resfriamento indica quanto tempo é demandado para que o carvão vegetal perca temperatura. Na Figura 12 estão apresentados os tempos de transferência de calor durante o resfriamento do carvão vegetal em função do clone e da classe de diâmetro.

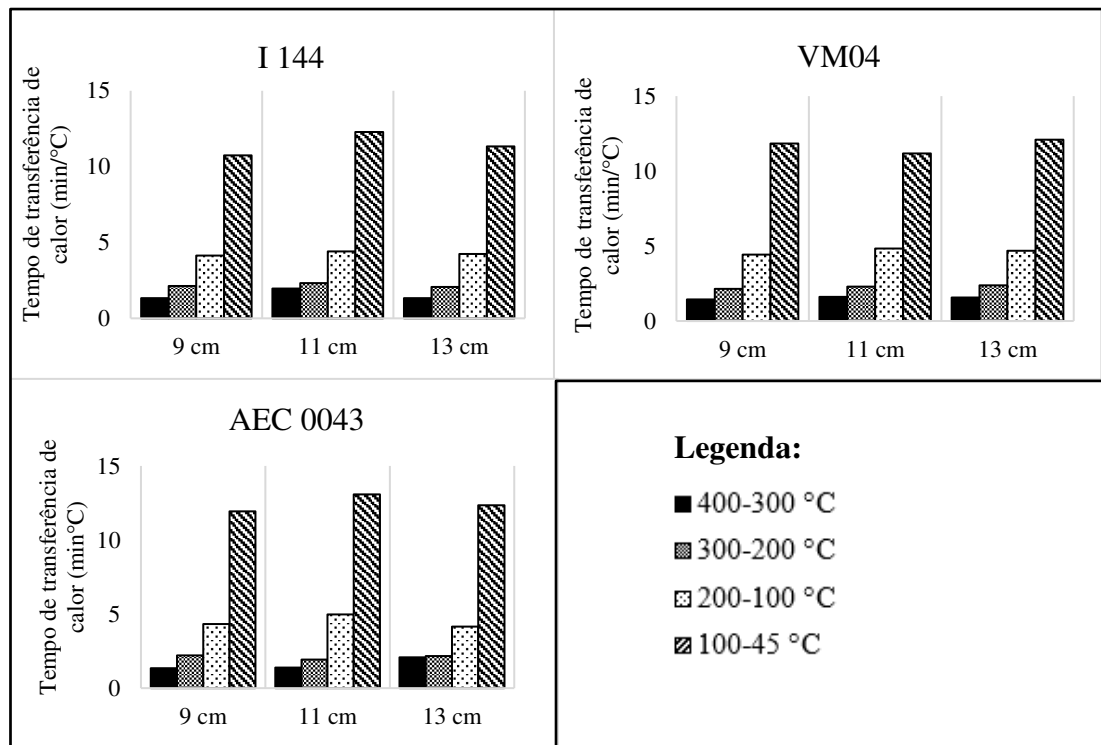


Figura 12. Tempo de transferência de calor (min/°C) em função do clone e da classe de diâmetro durante o resfriamento

O tempo de transferência de calor durante a etapa de resfriamento segue uma tendência crescente com o decaimento da temperatura do carvão vegetal (Figura 12), uma vez que se aproxima da temperatura ambiente e do equilíbrio térmico com o meio externo (ÇENGEL, 2012; OYEDUN et al., 2012; JESUS et al., 2019).

Em média, o maior tempo de transferência de calor se dá na última fase do resfriamento (11,87 min/°C), que compreende a faixa de temperatura de 100 a 45°C, sendo 7,6 vezes maior que o tempo demandado nas primeiras horas de resfriamento para o decaimento da temperatura do carvão vegetal. O T_{tc} abaixo dos 100°C, onde se observa maior resistência para a transferência de energia, representa 59,12% do tempo total demandado para resfriar o carvão vegetal até temperaturas próximas a 45°C. A maior dificuldade para a perda de calor está

relacionada à menor força motriz da condutividade térmica, dado que o gradiente de temperatura formado entre o carvão vegetal e o meio externo é menor abaixo dos 100°C (INCROPERA, 2014).

Na Figura 13 são apresentados os tempos de transferência de calor durante o resfriamento do carvão vegetal, por faixa de decaimento de temperatura. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

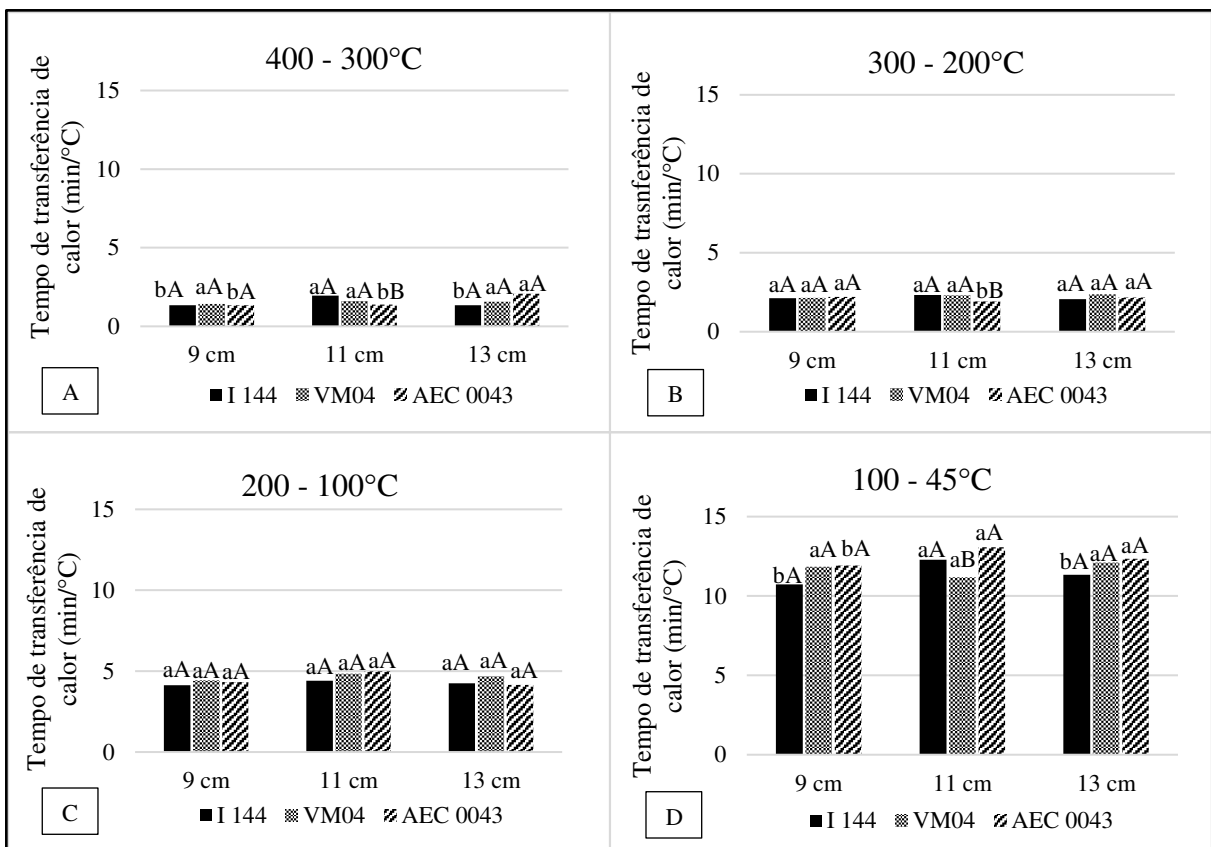


Figura 13. Taxa de aquecimento (°C/h) por fase de carbonização. A) Primeira fase (150°C) – Secagem da madeira; B) Segunda fase (150 a 250°C) – Liberação de vapor d’água, materiais voláteis e degradação das hemiceluloses; C) Terceira fase (250 a 350°C) – Degradação dos componentes estruturais D) Quarta fase (> 350°C) – Fixação de carbono

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

No início do resfriamento (400 - 300°C), o Ttc do carvão vegetal do clone I 144 foi significativo na classe diamétrica de 11 cm, havendo maior gasto de tempo (1,96 min) para perder 1°C em comparação aos carvões vegetais deste mesmo clone na menor e na maior classe de diâmetro, que gastaram 1,33 min para reduzir 1°C (Figura 13.A). Devido ao maior teor de

umidade da madeira do clone I 144 na classe de diâmetro intermediária, houve deslocamento da curva de carbonização no sentido de maior consumo de tempo delongando, conseqüentemente, a etapa de resfriamento em relação às outras classes, havendo também uma maior dificuldade na perda de temperatura do carvão vegetal. Nesta classe diamétrica, também houve a menor temperatura final de carbonização e, desta forma, a diferença de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo foi menor comparado às outras classes, reduzindo a velocidade da troca de calor, em função do menor delta de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo (INCROPERA, 2014).

Younsi et al. (2015), ao estudarem a análise transitória de calor e massa durante o tratamento térmico da madeira, observaram que as temperaturas de processo foram menores com madeiras de maior teor de umidade devido ao maior efeito de resfriamento durante a vaporização da água na superfície da madeira, implicando em temperaturas finais de processo mais baixas.

O carvão vegetal do clone AEC 0043 na classe de 11 cm de diâmetro gastou, significativamente, menos tempo (1,39 min) para perder 1°C na fase inicial do resfriamento (Figura 13.A), em função da maior diferença de temperatura entre o meio ambiente e o carvão vegetal, devido a maior temperatura final de carbonização, bem como pelas propriedades do carvão vegetal de *Corymbia* que favoreceram a condutividade térmica, como a menor porosidade e a maior densidade aparente, tornando o material mais maciço e mais favorável à transferência de calor. Materiais com menos espaços vazios, transferem calor de forma mais efetiva e com maior velocidade (FELIZARDO et al., 2016; PELLEGRINI, 2019; SANTOS et al., 2020).

De 300 a 200°C (Figura 13.C), verificou-se diferença significativa apenas para o carvão vegetal do clone AEC 0043 da classe intermediária de diâmetro, apresentando um menor Ttc (1,93 min/°C), devido ao mesmo comportamento e características observadas para a faixa de temperatura de 400 a 300°C.

Não foi constatada diferença significativa no Ttc para os clones e para as classes diamétricas entre 200 a 100°C, o tempo médio de transferência de calor gasto para a perda de energia nessa faixa foi de 4,47 min/°C, quase três vezes mais que o tempo de transferência de calor médio demandado na primeira faixa de decaimento de temperatura (1,56 min/°C).

No final do resfriamento (Figura 13.D), em temperaturas abaixo de 100°C, houve diferença significativa no Ttc para o carvão vegetal do clone I 144 na classe diamétrica de 11 cm em relação aos carvões deste mesmo clone nas demais classes de diâmetro, atingindo valores de Ttc de 12,28 min/°C. Como já mencionado, o maior tempo utilizado para a secagem

da madeira do clone I 144 na classe diamétrica de 11 cm, na etapa de carbonização, impactou o tempo de resfriamento do carvão vegetal em 3,85% e na última faixa de decaimento de temperatura é possível observar a acentuação desse efeito pela maior resistência térmica causada pela menor variação de temperatura entre o carvão vegetal e o meio externo (FELIZARDO et al., 2016).

Entre clones, de 100 a 45°C, verificou-se diferença significativa para o carvão vegetal de VM04 na classe intermediária de diâmetro (Figura 13.D), onde foi gasto um menor tempo para o seu resfriamento (11,18 min/°C). As maiores demandas de tempo para a perda de calor nos carvões vegetais dos clones AEC 0043 e I 144 são explicadas pela qualidade do carvão vegetal produzido. O maior tempo utilizado para o resfriamento do carvão vegetal do clone I 144 se deu em função da maior porosidade do carvão e da maior quantidade de cerne na madeira e para o resfriamento do carvão vegetal do clone AEC 0043, o maior gasto de tempo para resfriamento ocorreu em virtude da deposição de alcatrão na superfície do carvão vegetal.

No trabalho realizado por Felizardo et al. (2016), no qual foram desenvolvidos geopolímeros de baixa condutividade térmica, os autores observaram que a condutividade dos materiais diminuiu com o aumento da porosidade. Quanto à deposição de alcatrão no carvão vegetal, por ser um material mais reativo e de menor estabilidade térmica, acredita-se que esse possa interferir negativamente na perda de calor do carvão vegetal (PRAUCHNER et al., 2001; PASA et al., 2008).

5.2.6. Curvas de resfriamento do carvão vegetal

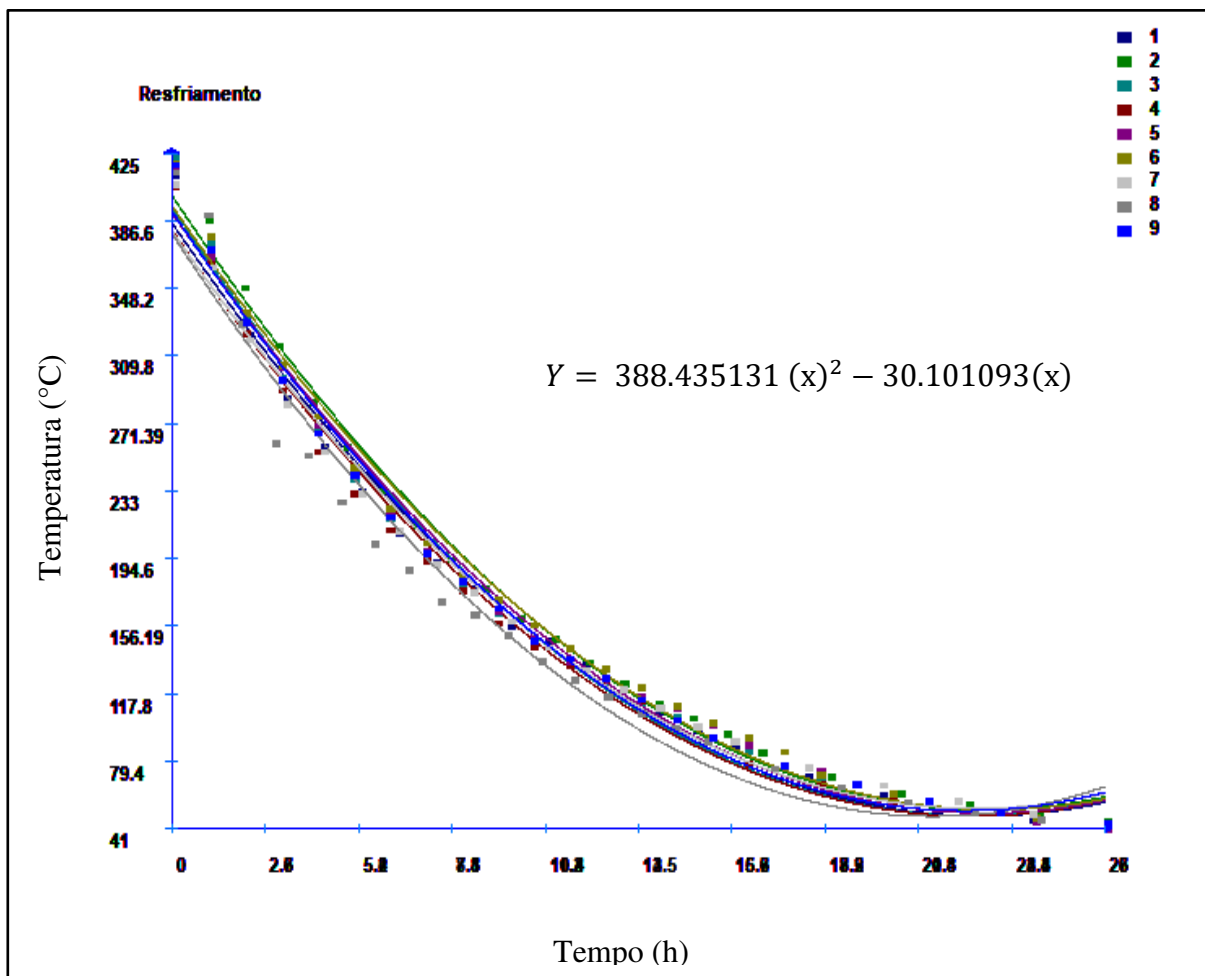
Observou-se que as curvas de resfriamento obtidas neste estudo tiveram comportamento semelhante às curvas de resfriamento por convecção natural obtidas por Gomes et. al (2020) ao estudarem a qualidade do carvão vegetal submetido à diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. Em geral, o decaimento de temperatura foi homogêneo assim como observado por Damásio et. al (2015) ao estudarem o perfil de temperatura da carbonização em forno circular.

Foi realizada uma análise de regressão polinomial para testar o grau de ajuste do modelo (Tabela 10) para cada uma das novas equações que explicam as curvas de resfriamento (Figura14). Observou-se que, para todos os modelos, o grau 2 foi significativo, ou seja, a análise de regressão identificou modelos polinomiais de segundo grau ($\beta_0x^2 + \beta_1x + \beta_2$) que explicam o comportamento das curvas de resfriamento do carvão vegetal.

Tabela 10. Resumo dos resultados do grau de ajuste dos modelos

Variável	Classe	Modelo	R ² (%)
I 144 x 9 cm	1	Grau 2	98.9954713
I 144 x 11 cm	2	Grau 2	99.4976093
I 144 x 13 cm	3	Grau 2	98.9164104
VM04 x 9 cm	4	Grau 2	98.9593864
VM04 x 11 cm	5	Grau 2	99.0793301
VM04 x 13 cm	6	Grau 2	99.0949006
AEC 0043 x 9 cm	7	Grau 2	98.9250854
AEC 0043 X 11 cm	8	Grau 2	96.9022622
AEC 0043 x 13 cm	9	Grau 2	99.0567331

Na Figura 14, percebe-se que as curvas de resfriamento dos nove modelos são muito semelhantes e, dessa forma, foi feito um teste de igualdade das nove equações de regressão.

**Figura 14.** Similaridade entre as curvas de resfriamento

Ao realizar a ANOVA para testar a igualdade das equações de regressão, não foi observada diferença significativa entre os modelos (Tabela 10), ou seja, os três parâmetros (β_0 , β_1 e β_2) de todos modelos são estatisticamente iguais, portanto, pode-se usar apenas um modelo para representar a temperatura de resfriamento do carvão vegetal em função do tempo, conforme descrito na equação 8.

$$\text{Temperatura de Resfriamento } (^{\circ}\text{C}) = 388.435131 (t)^2 - 30.101093(t) + 669073$$

(Equação 8)

Em que, T = Tempo (h)

5.2.7. Perfil de temperatura radial (PTr) da madeira e do carvão vegetal em função do clone e da classe de diâmetro

O perfil de temperatura em posições radiais distintas da madeira e dos carvões vegetais durante as etapas de carbonização e de resfriamento, foi obtido a partir de três posições das peças, a saber: região central, intermediária e a superficial (Figura 15).

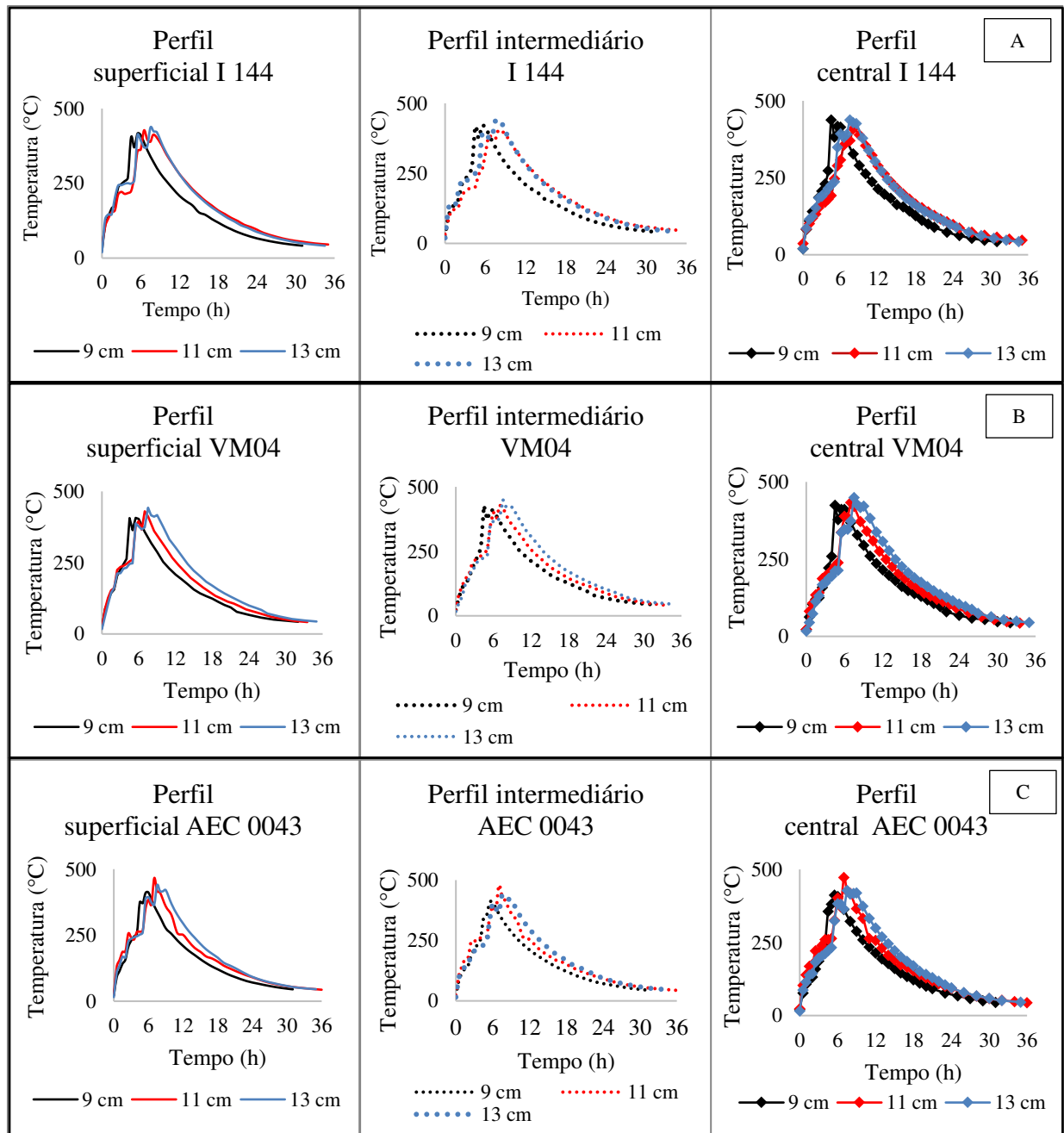


Figura 15. Perfil de temperatura em diferentes posições radiais de temperatura nas etapas de carbonização e resfriamento em função do clone e da classe de diâmetro. A) Posições radiais do clone I 144; B) Posições radiais do clone VM04 e; C) Posições radiais do clone AEC 0043

Considerando as três classes diamétricas, constatou-se que, 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, apresentando os menores tempos e as menores temperaturas de resfriamento. Esse comportamento pode ser explicado em função da maior área de troca térmica disponível entre o carvão vegetal e o interior do contêiner

metálico juntamente com o ambiente externo, na qual o arranjo favoreceu o fluxo de calor, havendo maior remoção de energia térmica dos carvões produzidos com madeiras mais finas.

Estudos comprovam que menores diâmetros exigem menos tempo para que a energia térmica alcance a região central da madeira (SHEN et al., 2009; JESUS et al., 2019). Ao estudarem o resfriamento do carvão vegetal em fornos retangulares, Oliveira et al. (2015) verificaram maior eficiência no resfriamento artificial do carvão vegetal ao utilizar um modelo de trocador de calor com maior área de troca entre a tubulação e o ambiente externo, demonstrando o efeito positivo da maior área de troca para a maior velocidade da transferência de calor.

Além do melhor arranjo do conjunto carvão vegetal e contêiner metálico, a densidade do carvão, umas das principais propriedades que influenciam a carbonização e resfriamento do carvão vegetal, favoreceu as trocas térmicas na menor classe de diâmetro, visto que quanto maior a densidade, maior será a quantidade de massa para um mesmo volume e menor será quantidade de espaços vazios na madeira. Conseqüentemente, o isolamento térmico radial diminui, contribuindo para a transferência de calor e para o resfriamento do carvão vegetal (RAMOS et al., PELLEGRINI, 2019).

Observou-se que os carvões vegetais do clone I 144 nas classes de 11 e 13 cm de diâmetro tiveram uma diferença média de 30 minutos no tempo de resfriamento, constatada pela proximidade das curvas nessas classes diamétricas (Figura 15.A), enquanto foi verificada uma diferença de 3 horas no tempo de resfriamento do carvão vegetal formado a partir das madeiras mais finas, independentemente da posição no perfil radial, dado que em menores diâmetros o aquecimento é maior (AYSU E KÜÇÜK, 2014; JESUS et al., 2019). A proximidade das curvas dos clones I 144 das classes diamétrica de 11 e 13 cm se deu em função do teor umidade da madeira do material da classe intermediária de diâmetro, que foi 75,4% maior do que a umidade da madeira mais grossa, prolongando o tempo de secagem.

Para os clones VM04 e AEC 0043, verificou-se maior distinção na curva de resfriamento dos carvões vegetais das classes diamétricas de 9, 11 e 13 cm (Figura 15.B e 15.C). Para o carvão vegetal do clone VM04 houve, em média, um aumento de 1,5 horas no tempo de resfriamento com o incremento em diâmetro e para o carvão vegetal do clone AEC 0043, observou-se um aumento de 2 horas no tempo de resfriamento com aumento do diâmetro. A tendência de aumento do tempo de processo com o aumento do diâmetro para que o fluxo de calor percorra a madeira ao longo do seu perfil radial também foi observada por Younsi et al. (2015) e Jesus et al. (2019), ao estudarem o perfil térmico de clones de *Eucalyptus* durante a pirólise da madeira.

Na Figura 16, estão apresentados os gradientes de temperatura no sentido radial durante a carbonização e o resfriamento do carvão vegetal.

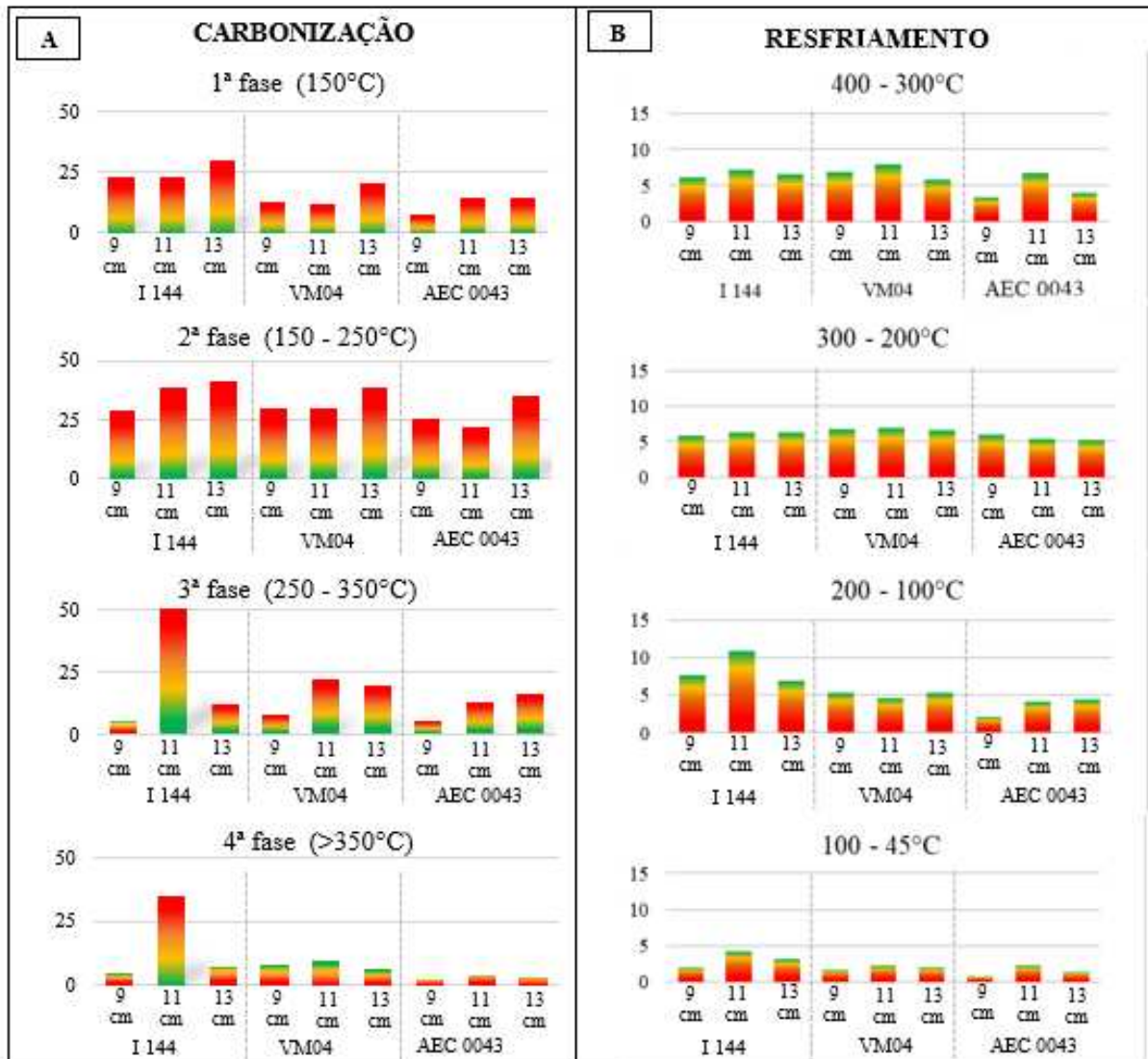


Figura 16. Gradiente de temperatura no sentido radial em função da classe de diâmetro e dos clones. A) Carbonização; B) Resfriamento

*No eixo y, o ponto 0 representa a porção central da tora

A Figura 16 representa a variação de temperatura (°C) entre a superfície e o centro das madeiras durante as quatro fases da carbonização e a variação radial de temperatura do carvão vegetal durante os diferentes estágios do resfriamento.

Durante a degradação térmica da madeira, observou-se que a porção central das madeiras nas duas primeiras fases da carbonização é mais fria quando comparada à superfície e a partir da terceira fase, principalmente para as menores classes diamétricas, essa diferença

de temperatura diminui e o centro da peça começa a aquecer, se tornando mais quente em relação à superfície, como observado na quarta fase da carbonização (Figura 16.A).

Assim como observado por Jesus et al. (2019), as temperaturas mais altas durante a pirólise da madeira foram observadas na superfície dos toretes, devido à menor resistência térmica entre a madeira e a fonte de calor e pela superfície das madeiras ser a região com maior exposição à fonte de calor do sistema alotérmico (forno elétrico).

Ao avaliar o PTr de resfriamento (Figura 16.B), verifica-se que a porção central das peças de madeira concentra maior quantidade de energia do que sua região superficial, comportamento associado ao elevado calor específico do carvão vegetal e a sua maior dificuldade de dissipar a energia concentrada no centro para superfície da peça, em função das altas temperaturas causadas pelas reações exotérmicas nas fases finais da carbonização. Além disso, a variação de temperatura entre a região superficial e a central sinaliza um comportamento não linear da taxa de aquecimento da madeira durante a sua degradação térmica, causada pela redução da transferência de calor quanto mais se aproxima do centro do torete (JESUS et al., 2019).

Assim como no trabalho realizado por Younsi et al. (2015), devido à baixa condutividade térmica da madeira e do carvão vegetal, as diferenças de temperatura entre a superfície e o centro são facilmente observadas.

Na Figura 17, é possível observar a diferença de temperatura no sentido centro – superfície para cada clone e classe de diâmetro durante a carbonização. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

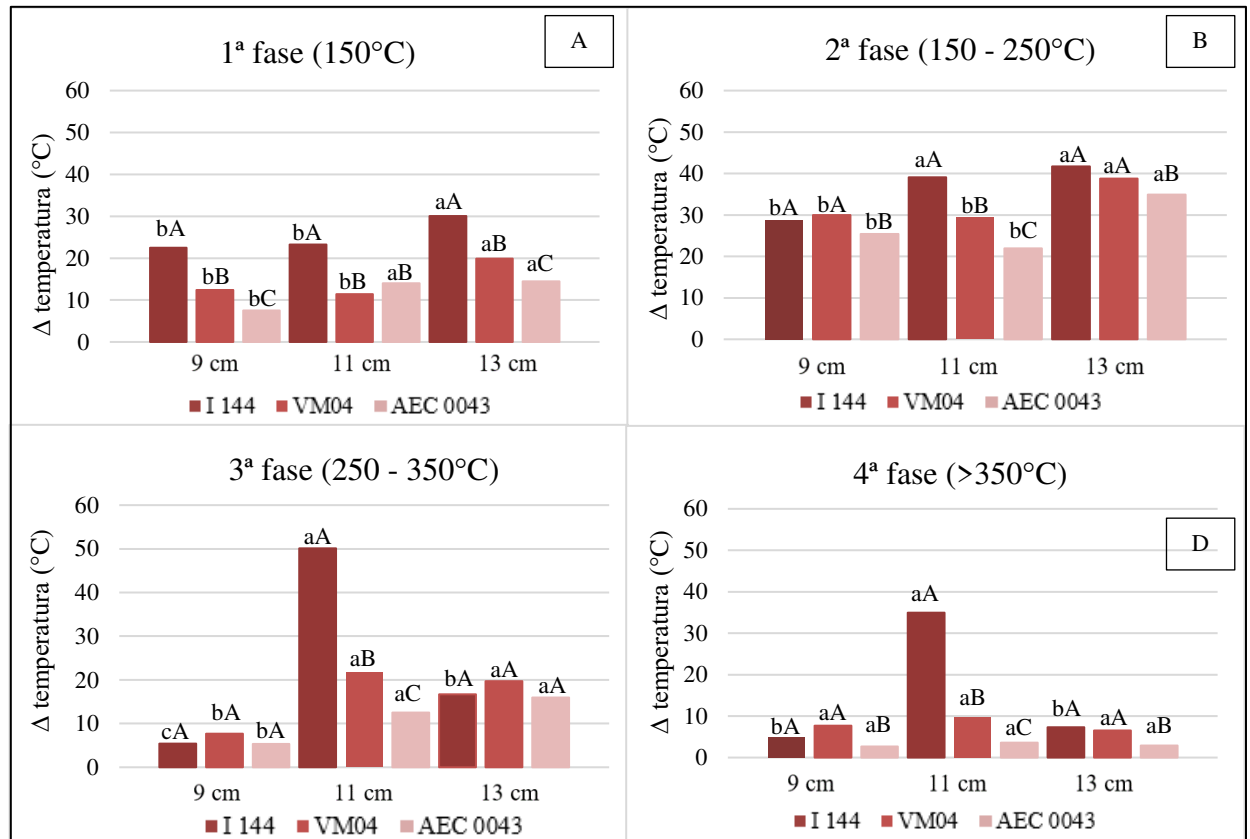


Figura 17. Diferença de temperatura (Δt) no sentido centro-superfície em função do clone e da classe de diâmetro durante a carbonização

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Houve diferença significativa na temperatura entre a superfície e o centro para o clone I 144 na classe de 11 cm de diâmetro em todas as fases da carbonização (Figura 17), influenciado pelo seu maior teor de umidade e a maior dificuldade de saída da água no sentido radial, resultando em uma região central mais fria em relação à superfície da madeira e a uma maior diferença de temperatura, quando comparado aos demais materiais genéticos e às outras classes de diâmetro. Nas últimas fases da carbonização, devido aos maiores picos de temperatura causados pelo início das reações exotérmicas, observa-se maior acentuação das diferenças entre o centro e superfície do carvão vegetal. Vale ressaltar que a carbonização terá um fluxo de calor reduzido enquanto houver água na região central da madeira (DI BLASI et al., 2001).

Na primeira fase da carbonização foram observadas diferenças significativas para o clone I 144 no PTr para todas as classes de diâmetro (Figura 17.A). As maiores diferenças entre a superfície e o centro da madeira ocorreram devido à sua maior relação cerne/alburno (0,92) e

a menor permeabilidade do cerne ($9,8 \text{ cm}^3/\text{cm}\cdot\text{atm}\cdot\text{s}$), que compreende a região central da madeira, causando maior dificuldade de saída da água e, conseqüentemente, maior dificuldade de aquecimento da madeira de forma homogênea. A permeabilidade do cerne da madeira do clone I 144 foi, em média, 1,54 vezes menor do que a permeabilidade do cerne do clone VM04 e 11,1 vezes menos permeável que o cerne do clone AEC 0043.

De maneira geral, madeiras com maiores teores de umidade têm mais resistência à elevação de temperatura, devido aos movimentos de convecção do vapor d'água, causando interferência no processo de transferência de calor, visto que uma grande quantidade de energia é necessária para evaporar a água (DI BLASI et al., 2001; JESUS et al., 2019).

Na primeira e na segunda fases da carbonização, a maior diferença de temperatura no sentido radial é observada na maior classe diamétrica (Figura 17.B). Em maiores diâmetros, o caminho a ser percorrido pela energia térmica da borda para o centro da peça de madeira é maior (SIQUEIRA, 2021), no sentido em que ocorre a carbonização por meio da condução de calor, portanto, quanto maior o diâmetro, maior tende a ser a diferença no perfil radial.

No estudo realizado por Jesus et al. (2019), os autores também observaram maior diferença de temperatura entre a superfície e o centro para toretes de madeira com os maiores teores de umidade e os maiores diâmetros, quase duplicando a diferença de temperatura entre a superfície e o centro da madeira com o aumento no diâmetro e no teor de umidade.

Em maiores diâmetros, há uma tendência de se formar maiores zonas carbonizadas na superfície em relação ao centro do torete de madeira, aumentando a resistência térmica e dificultando o fluxo de calor para o interior da madeira que, normalmente, são regiões mais úmidas do que na superfície. Com o aumento da porosidade e diminuição da condutividade térmica do carvão em relação à madeira, as zonas carbonizadas formadas na superfície se comportam como barreiras ao fluxo de calor (BABU e CHAURASIA, 2004).

Para a terceira fase da carbonização, foi observada a menor diferença de temperatura entre a região superficial e a região central apenas nas madeiras mais finas, de $6,1^\circ\text{C}$ (Figura 17.C), enquanto para as madeiras de maior classe diamétrica, a diferença de temperatura entre a borda e o centro da peça foi de $17,5^\circ\text{C}$.

O carvão vegetal tem baixíssima condutividade térmica, logo, apresenta características isolantes (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2014). Com aumento do diâmetro, há aumento da camada de isolamento térmico e redução da transferência de calor por condução e, conforme explicado por Pellegrini (2019), existe uma espessura ótima de isolamento na qual a transferência de calor é maximizada. Para este estudo, os carvões vegetais das madeiras da

classe de 9 cm de diâmetro apresentaram as menores diferenças no perfil radial pela maior transferência de calor por condução entre a superfície e o centro.

Na última fase da carbonização (Figura 17.D), com exceção do clone I 144 na classe diamétrica de 11 cm, observou-se, de maneira geral, maior homogeneidade do perfil radial. As menores diferenças entre o centro e a superfície da peça foram verificadas no clone AEC 0043, (3,1°C), por ser um material mais permeável que facilitou a saída de água e voláteis e também mais denso, favorecendo a condução de calor. (SANTOS et al., 2020; INCROPERA, 2014; FELIZARDO et al., 2016).

Na Figura 18, são apresentadas as diferenças de temperatura entre o centro e superfície do carvão vegetal durante o resfriamento. De acordo com a ANOVA, não houve efeito significativo da interação (clone x classe diamétrica), somente o efeito isolado de cada variável.

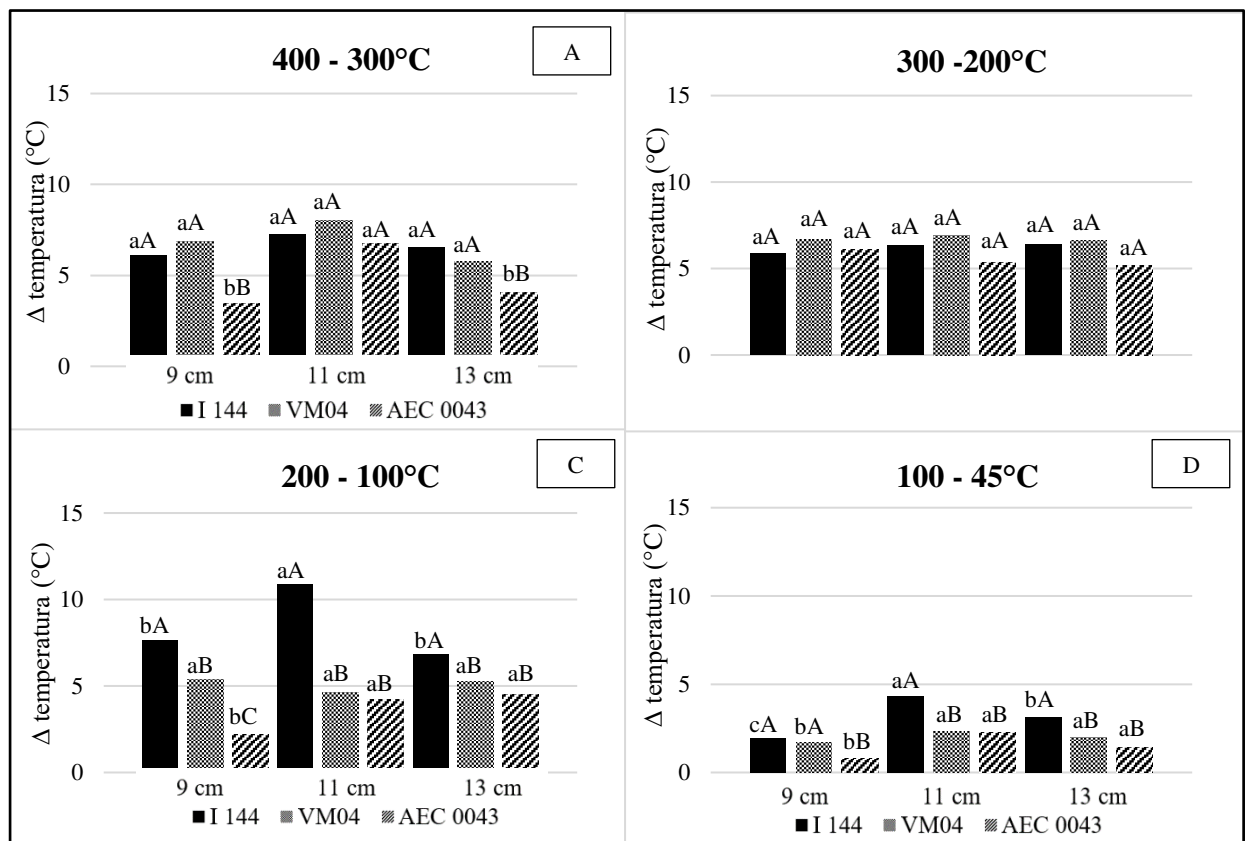


Figura 18. Diferença de temperatura (Δ) no sentido centro-superfície em função do clone e da classe de diâmetro durante o resfriamento

Letras minúsculas comparam as diferentes classes de diâmetro e letras maiúsculas comparam os diferentes clones. Médias seguidas de mesma letra minúscula entre os diâmetros da mesma letra maiúscula entre os clones não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Em média, à medida que o carvão vegetal perde calor para o meio, a diferença entre a superfície e o centro da peça de carvão vegetal diminuiu, devido à menor diferença de

temperatura entre o meio externo e o carvão vegetal, que reduziu a velocidade da perda de calor ao longo do tempo. Quanto maior a diferença de temperatura formado, 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 (FIGUEIRÓ, 2022).

Observou-se que do início ao final do resfriamento, a diferença de temperatura no sentido radial diminuiu 2,7 vezes para o carvão vegetal do clone I 144, reduziu 3,7 vezes para o carvão vegetal do clone VM04 e 4,1 vezes para o carvão vegetal do clone AEC 0043. A maior condutividade térmica do carvão vegetal do clone AEC 0043, devido à sua menor porosidade e maior densidade aparente 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 tem grande impacto na perda térmica durante o resfriamento do carvão vegetal. Os poros são espaços vazios que acentuam a anisotropia na difusão da energia, favorecendo o fluxo de calor na direção longitudinal das fibras e se comportam como uma barreira extra à transferência de calor, implicando em temperaturas mais elevadas na região central em relação à superfície do carvão vegetal (FRANÇA E CAMPOS, 2002; FIGUEIRÓ, 2022).

Entre 400 e 300°C, fase inicial do resfriamento (Figura 18.A), os carvões vegetais do clone AEC 0043 nas classes de 11 e 13 cm de diâmetro tiveram diferença significativa de temperatura entre a superfície e o centro da peça (3,46°C), sendo quase 2 vezes menor do que a diferença média de temperatura no perfil radial dos clones de *Eucalyptus* (6,49°C), devido às propriedades da madeira e do carvão vegetal mais favoráveis do clone de *Corymbia* à troca de calor, como a menor porosidade, a maior densidade aparente e o menor teor de finos, características que favorecem a condução de calor em meio poroso (SANTOS et al., 2020; CARRASCO et al., 2016). A mesma tendência não foi observada para a classe diamétrica intermediária, provavelmente, em virtude da deposição de alcatrão, que pode impedir a circulação dos gases durante o processo de troca térmica.

Na faixa de decaimento de temperatura de 300 a 200°C (Figura 18.B), não se observou diferença significativa na temperatura, independente do clone e do diâmetro, sendo a diferença média entre a superfície e o centro de 6,15°C.

No intervalo de 200 a 100°C (Figura 18.C), próximo da etapa final do resfriamento, 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).

Dessa forma, observou-se que para a classe de 9 cm de diâmetro, houve diferença significativa entre os carvões vegetais dos clones I 144, VM04 e AEC 0043, com a maior diferença de temperatura da superfície para o centro da peça atribuída ao carvão vegetal do clone I 144 (7,63°C) e a menor diferença atribuída ao carvão vegetal do clone de *Corymbia* (2,17°C), sendo a densidade, neste caso, a principal propriedade do carvão vegetal responsável por influenciar a transferência de calor. O carvão vegetal do clone AEC 0043 foi 31,25% mais denso que o carvão vegetal do I144 e 10,68% mais denso que o carvão formado a partir do clone VM04, clone de densidade intermediária.

Para as maiores classes de diâmetro (11 e 13 cm), houve diferença significativa na temperatura entre a superfície e o centro do carvão vegetal do clone I 144 em relação aos outros clones das mesmas classes (Figura 18.C). Também ocorreu comportamento semelhante para este clone na última fase do resfriamento (Figura 18.D), sendo importante ressaltar que, para a classe de diâmetro intermediária, houve aumento de 1,5 vezes na diferença de temperatura média do perfil radial das peças de carvão vegetal (Figura 16.B). A maior umidade da madeira do clone I 144 na classe diamétrica intermediária teve grande impacto no ciclo de produção do carvão vegetal, afetando o perfil térmico radial e a qualidade do carvão vegetal (JESUS et al., 2019; RAMOS et al., 2023). A menor densidade aparente e a maior porosidade do carvão vegetal dificultaram a perda de energia do carvão vegetal para o meio externo, devido à redução da condutividade térmica com o aumento dos espaços intercelulares (SANTOS et al., 2020; INCROPERA, 2014; FELIZARDO et al., 2016).

Na fase final do resfriamento, entre 100 e 45°C (Figura 18.D), observou-se que o carvão vegetal produzido a partir das madeiras de menor diâmetro tem menor diferença estatística 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 contêiner metálico, além da menor massa de carvão nessa classe diamétrica (0,2691 kg), sendo 1,97 vezes menor do que a massa dos carvões vegetais da classe de 11 cm de diâmetro (0,531 kg) e 2,5 vezes menor do que a massa dos carvões vegetais das madeiras mais grossas. A maior densidade nessa classe de diâmetro também é um fator que colabora para a maior transferência de calor (JESUS et al., 2019; FIGUEIRÓ, 2022).

Donato et al. (2020) observaram que ao utilizar madeiras de menores diâmetros, a massa seca enfiada foi menor, aumentando o espaço vazio dentro do forno, ou seja, a área para trocas térmicas. 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 (FIGUEIRÓ, 2022).

5.3. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

Os resultados de rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

Propriedade	I 144			VM04			AEC 0043		
	9 cm	11 cm	13 cm	9 cm	11 cm	13 cm	9 cm	11 cm	13 cm
Rendimento gravimétrico (%)	31,13	31,59	32,03	30,62	30,71	30,26	30,48	31,07	31,01
Carbono fixo (%)	74,56	76,06	74,45	74,62	74,90	75,13	74,49	74,40	74,95
Materiais voláteis (%)	25,41	23,92	25,77	25,33	24,57	24,85	25,25	24,88	25,01
Cinzas (%)	0,029	0,026	0,027	0,054	0,053	0,049	0,656	0,722	0,762
PCS (Kcal/kg)	6978,5	6945,1	6873,4	6760,4	6945,1	6873,4	6715,7	6751,6	6696,6
Teor de finos (%)	8,23	9,70	7,99	6,60	7,51	8,40	7,06	6,99	6,29
Densidade à granel (kg/m ³)	192,94	187,35	180,41	228,80	220,13	220,11	253,23	243,64	240,34
Densidade aparente (kg/m ³)	253,61	277,92	235,38	365,95	378,07	369,99	477,95	480,38	429,54
Densidade verdadeira	1,62	1,71	1,47	1,66	1,59	1,36	1,73	1,60	1,48
Porosidade (%)	84,37	83,75	83,96	77,90	76,29	72,75	72,33	69,54	70,92

O rendimento gravimétrico médio do carvão vegetal, influenciado pela condução da carbonização e pelas características da madeira (OLIVEIRA et al., 2013; CARNEIRO et al., 2016; GOMES et. al, 2020), foi de 30,98%, não havendo diferença significativa entre os materiais e as classes diamétricas. Os valores obtidos foram superiores ao da média nacional (26%), conforme dados publicados em 2015 pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2015) e condizentes com valores encontrados por Zanuncio et al. (2014) e Loureiro et

al. (2021) para clones de *Corymbia*, porém inferiores aos encontrados por Donato et al. (2020) e Ramos et al. (2023) para clones de *Eucalyptus*. Ressalta-se que, para uso siderúrgico um rendimento gravimétrico acima de 30% é satisfatório (PEREIRA et al., 2013).

As propriedades da madeira influenciam diretamente a qualidade e o rendimento do carvão vegetal, por influenciarem o processo de carbonização e de resfriamento. Apesar do clone AEC 0043 apresentar a maior densidade básica e esta característica ser intimamente relacionada à maiores valores de rendimento gravimétrico (PEREIRA et al., 2013; RAMOS et al., 2023), isso não foi observado para os carvões vegetais do clone de *Corymbia*, resultado associado ao seu maior teor de holocelulose (72,24%) e ao menor teor de lignina (21,28%).

Para a produção de carvão vegetal, materiais genéticos com baixo teor de holocelulose e alto teor de lignina ($\geq 28\%$) contribuem para a maior resistência à degradação térmica (FIALHO et al., 2019; PEREIRA et al., 2013). Loureiro et al. (2019) também encontraram valores abaixo de 28% para clones de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* (26,02%).

No estudo realizado por Pereira et al. (2013), os melhores desempenhos em produção de carvão vegetal foram atribuídos aos clones com maiores teores de lignina total e baixo teor de extrativos e, além disso, a autora afirma que a densidade básica não pode ser utilizada como parâmetro isolado para inferir sobre a qualidade do carvão vegetal, devido à influência de outras propriedades da madeira.

Os teores de carbono fixo variaram entre 74,40 a 76,06% e ficaram próximos aos teores recomendados para o uso do carvão vegetal na siderurgia, entre 75 e 80% (PEREIRA et al., 2013) e próximos dos valores encontrados por Gomes et al. (2020). O carbono fixo do carvão vegetal tem grande influência da temperatura de carbonização e neste estudo as temperaturas finais foram fixadas entre 400 e 450°C, conforme recomendado para a produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2016; GOMES et al., 2020; RAMOS et al., 2023).

Zanuncio et al. (2014) encontraram teores de carbono fixo variando entre 74,08 a 80,22% para híbridos espontâneos de *E. urophylla*, teores semelhantes aos obtidos para os carvões vegetais dos clones I 144 e VM04, entre 74,45 e 76,06%.

Os valores de carbono fixo encontrados para o carvão vegetal do clone AEC 0043, entre 74,40 e 74,95%, foram próximos aos valores encontrados por Loureiro et al. (2021) para diferentes clones do gênero *Corymbia*, porém os valores de rendimento gravimétrico foram menores do que os encontrados pelos autores.

O teor de cinzas (0,26%) e de materiais voláteis (24,99%) ficaram dentro dos valores médios recomendados pela indústria siderúrgica, sendo menores que 1% para o teor de cinzas

e menor que 25% para o teor de materiais voláteis (PEREIRA et al., 2013; ANDRADE et al., 2018). Gomes et al. (2020) encontraram valores semelhantes para os teores de cinzas do carvão vegetal eucalipto, variando entre 0,25 e 0,32% e Pereira et al. (2012), ao estudarem a qualidade do carvão vegetal de eucalipto para uso siderúrgico, obtiveram teores de materiais voláteis entre 24,2 e 26,7%, próximos os valores encontrados neste estudo.

Os teores de cinzas dos carvões vegetais do clone AEC 0043 foram maiores que os teores obtidos para os clones de *Eucalyptus*, como esperado. Porém, foram inferiores aos valores encontrados por Zanuncio et al. (2014), Loureiro et al. (2019) e Loureiro et al. (2021) que obtiveram, em sua maioria, teores de cinzas acima de 1% para híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana*. Salienta-se que quanto menor o teor de cinzas presente no carvão vegetal para uso siderúrgico, menor serão os desgastes do alto-forno e melhor será a qualidade do ferro-gusa produzido (CARNEIRO et al., 2013; GOMES et al., 2020; RAMOS et al., 2023).

Os teores de materiais voláteis ficaram muito próximos do limite recomendado para o uso siderúrgico, afetando negativamente o teor de carbono fixo, que foi, na maioria dos materiais, ligeiramente abaixo do limite mínimo adequado para a produção de carvão vegetal. É importante ressaltar que a relação entre essas características é inversa (SANTOS et al., 2016; RAMOS et al., 2023).

O poder calorífico superior ficou abaixo do sugerido para a produção de carvão vegetal utilizado na siderurgia (>7.500 kcal/kg), variando entre 6.696,6 a 6.978,5 kcal/kg (PEREIRA et al., 2013; ANDRADE et al., 2018). Essa propriedade do carvão vegetal tem relação direta com o carbono fixo e inversa com os materiais voláteis e teor de cinzas (GOMES et al., 2020, LOUREIRO et al., 2021). Menores valores de poder calorífico superior implicam em maior consumo de carvão vegetal no alto-forno para a redução do minério de ferro na indústria siderúrgica (NEVES et al., 2011; LOUREIRO et al., 2021).

O teor de finos variou de 6,29 a 9,70%, valores adequados para a produção de carvão vegetal (CETEC 1982; DONATO et al., 2020). Para a classe diamétrica de 11 cm, observou-se que o clone I 144 produziu um carvão vegetal mais friável (9,70%), em função do maior teor de umidade da madeira (19,98%), da menor permeabilidade do cerne (9,8 cm³/cm.atm.s) e da maior relação cerne/alburno (0,89) comparado aos clones VM04 (0,83 e AEC 0043 (0,70) da mesma classe de diâmetro. A baixa permeabilidade do cerne causada, principalmente, pela presença de tiloses, causa obstrução dos vasos e, conseqüentemente, em maior dificuldade e maior pressão de saída dos vapores de água da madeira, em seus elementos anatômicos, causando o rompimento de células e produzindo um maior teor de finos, devido à formação de fendas e fissuras no interior do carvão vegetal (DONATO et al., 2020; RAMOS et al., 2023).

O carvão vegetal do clone VM04 na classe diamétrica de 13 cm teve o segundo maior teor de finos (8,40%), que pode ser explicado pela relação C/A (1,06), indicando maior proporção de madeira cernificada, além de um cerne pouco permeável (15,18 cm³/cm.atm.s) e de um alburno 1,5 e 2 vezes menos permeável do que o alburno dos clones I 144 e AEC 0043, respectivamente. A dificuldade de movimentação de fluidos, pelas obstruções e menor permeabilidade da madeira, resultou em um maior teor de finos, devido à formação de trincas e fissuras com o rompimento das células durante a saída de água (JESUS et al., 2019; RAMOS et al., 2023).

A densidade à granel e a densidade aparente do carvão vegetal foi maior para o carvão oriundos do clone AEC 0043, enquanto o carvão do clone VM04 apresentou densidade intermediária e o carvão de I 144 apresentou o menor valor de densidade conforme esperado, devido à densidade básica da madeira desses clones, visto que existe uma correlação positiva entre essas propriedades (VALE et al., 2010; LOUREIRO et al., 2021). Os valores de densidade aparente obtidos neste trabalho para os carvões dos clones VM04 e AEC 0043 são semelhantes aos valores encontrados por Moutinho et al. (2017) para clones de *Corymbia* e de *Eucalyptus*. Já o valor de densidade aparente do carvão vegetal de I 144 foi inferior aos valores encontrados por Zanuncio et al. (2014), Moutinho et al. (2017) e Loureiro et al. (2021) e próximos aos valores encontrados por Damásio et al. (2015), entre 179 e 181 kg/m³.

Para uso na siderurgia, é recomendado uma densidade à granel maior que 200 kg/m³ (OLIVEIRA et al., 2013; RAMOS et al., 2023), visto isso, verificou-se que os carvões vegetais produzidos a partir dos clones VM04 e AEC 0043 se mostraram superiores a este valor, apresentando uma média de 223,01 e 245,74 kg/m³, respectivamente, sendo recomendados para a produção de carvão vegetal para fins siderúrgicos.

Valores de densidade aparente superiores a 300 kg/m³ são recomendados para carvões vegetais utilizados como redutores em alto-fornos (ANDRADE et al., 2018). Neste estudo, a densidade aparente média do carvão vegetal dos clones VM04 (371,34 kg/m³) e AEC 0043 (462,62 kg/m³) se mostrou satisfatória para uso na indústria siderúrgica, tais valores de densidade foram próximos aos encontrados por Zanuncio et al. (2014) para o clone VM04 e próximos aos valores de densidade aparente obtidos por Loureiro et al. (2021) para clones de *Corymbia*.

A menor densidade do carvão vegetal produzido a partir do clone I 144 pode ser explicada pela menor densidade básica da madeira, 20,37% menor que a densidade básica das madeiras dos demais clones e pelas suas características anatômicas, como a menor fração parede (46,92%).

Carvões vegetais de maior densidade contribuem positivamente para a transferência de calor, principalmente na etapa de resfriamento do carvão vegetal, visto que a maior quantidade de massa por unidade de volume torna o material mais maciço, facilitando as trocas térmicas e a condução de calor por condução.

A porosidade, obtida a partir da densidade aparente e verdadeira do carvão vegetal variou entre 69,54 e 84,37%, valores superiores aos encontrados por Santos et al. (2020) ao estudarem as propriedades térmicas e físicas do carvão vegetal de eucalipto. Porém, os autores ressaltaram que essa é uma propriedade variável por ser altamente dependente das propriedades da madeira e das condições do processo de carbonização, como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de carbonização, influenciando diretamente a condutividade térmica do carvão vegetal.

A menor porosidade do carvão vegetal favorece o fluxo de calor, aumentando a sua velocidade, visto que os poros se comportam como uma resistência à passagem da energia térmica (FRANÇA E CAMPOS, 2002; SANTOS et al., 2020). Neste estudo, os carvões vegetais mais porosos foram do clone I 144 (84,37 – 83,75%), enquanto os carvões vegetais do clone AEC 0043 tiveram os menores valores de porosidade (69,54 – 72,33%).

O carvão vegetal do clone AEC 0043 teve a menor porosidade média (70,93%), porém os maiores tempos de ciclo foram atribuídos a esse clone, devido a maior quantidade de massa por unidade de volume no reator, comprovada pela maior densidade básica da madeira de AEC 0043 (622,33 kg/m³) e maior densidade aparente do carvão vegetal (462,62 kg/m³) (DONATO et al., 2020). A maior quantidade de massa para uma mesma área de troca no reator, reduz a transferência de calor, devido à maior quantidade de energia a ser removida.

6. CONCLUSÕES

Em geral, os menores tempos de resfriamento ocorreram na menor classe de diâmetro. O tempo total de ciclo aumentou com o incremento em diâmetro, interferindo a transferência de calor no sentido radial. Os clones de *Eucalyptus* tiveram os menores tempos de resfriamento e de ciclo de carbonização em relação ao clone AEC 0043, sendo 1,3 e 1,49% menores, respectivamente.

Independentemente do material genético ou da classe diamétrica, o resfriamento seguiu o comportamento de decaimento de temperatura em função do tempo, sendo explicado por um único modelo polinomial de segundo grau.

Na fase inicial do resfriamento, o decaimento de temperatura foi 7,9 vezes maior do que no fim do processo. Ao final do resfriamento, houve redução média de $89,5 \pm 0,5\%$ da energia térmica contida no carvão vegetal ao final da carbonização, independente do clone e do diâmetro.

Do início ao final do resfriamento a diferença de temperatura do perfil radial foi 2,3 vezes menor do que no sentido longitudinal.

Em relação à madeira, as principais variáveis que afetaram as taxas de aquecimento e de resfriamento foram o teor de umidade, a densidade básica, a composição química estrutural, a relação cerne/alburno e a permeabilidade. Para o carvão vegetal, foram a porosidade e a densidade aparente.

Dessa forma, entender as variáveis que interferem nessa dinâmica cria insumos e uma robusta base de dados para o desenvolvimento de boas práticas, tecnologias e inovações capazes de otimizar o processo de resfriamento e de descarregamento dos fornos, atuando em uma fase crítica da produção de carvão vegetal e, conseqüentemente, possibilitando o impulsionamento da sua cadeia produtiva.

7. RECOMENDAÇÕES

Dada a influência do teor de umidade no fluxo de energia e no tempo total de ciclo, recomenda-se o estudo do efeito dessa variável na transferência de calor e o impacto no processo de resfriamento.

Recomenda-se um estudo sobre a influência do alcatrão na dinâmica de resfriamento e na qualidade do carvão vegetal para verificar o impacto desse composto nas reações de oxidação e na ocorrência de focos de fogo no carvão vegetal.

Recomenda-se realizar um estudo do efeito do diâmetro da madeira enforada no leito e na granulometria final do carvão vegetal, visto que madeiras de maiores diâmetros tendem a quebrar mais durante a carbonização, reduzindo a granulometria final do carvão produzido.

Por fim, recomenda-se avaliar se as características favoráveis nas madeiras do gênero *Corymbia*, tanto para transferência de calor como para qualidade do carvão vegetal, compensam o maior tempo consumido no ciclo produtivo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, A.P.; BARBOSA, K.T.; DA SILVA, A.A.X.; GATTO, D.A.; DELUCIS, R.A.; AMICO, S.C. Vacuum infusion as a novel method to determine wood permeability. **Eur. J. Wood Prod.** 81, 33–44, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01887-3>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.

ANDRADE, F. W. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of wood physical properties on charcoal from Eucalyptus spp. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, 25, n. 3, 2018.

ANTAL JR., M. J.; GRØNLI, M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 42, n. 8, p. 1619-1640, 2003.

ARRUDA, T. P. M. D.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 949–955, ago. 2011.

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. **NBR 8633 Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984. 13 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 14929: Madeira: Determinação do teor de umidade de cavacos**. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.

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

AYSU, T.; KÜÇÜK, M. M. Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. **Energy**, v.64, p. 1002-1025, Jan. 2014.

BABU, B. V.; CHAURASIA, A. S. Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle. **Chemical Engineering Science**, Australia, v. 59, n. 10, p. 1999-2012, May. 2004.

BARCELOS, D.C.; COUTO, L.C.; MULLER, M.D.; COUTO, L. The state of the art of eucalypt timber quality for energy production: a focus on silvicultural treatments. **Biomassa & Energia**, 2 (2), 141 – 158, 2005.

BARREIRA, L. **Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira**. 2008. 82 f. Dissertação (Ms.C), Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão. Bragança, Portugal. 2008.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.

DAMACENA, Michelle Brandão. **Melhoramento para redução de kino em clones híbridos de *Corymbia sp.* e *Eucalyptus sp.***. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

BENNADJI, H.; SMITH, K.; SHABANGU, S.; FISHER, E.M. Low-temperature pyrolysis of woody biomass in the thermally thick regime. **Energy Fuels** 27(3):1453–1459, 2013.

BRITO, A. S.; VIDAURRE, G.B.; OLIVEIRA, J.T.S.; DA SILVA, J.G.M.; RODRIGUES, B.P.; CARNEIRO, A.C.O. Effect of planting spacing in production and permeability Of Heartwood And Sapwood Of Eucalyptus Wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. spe1, p. e20180378, 2019.

BRITO, J. O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 1992. 83 f. Tese (Doutorado), Departamento de Ciências Florestais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

BRYDEN, K.M.; RAGLAND, K.W.; RUTLAND, C.J. Modeling thermally thick pyrolysis of wood. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v.22, p. 41–53, jan. 2002.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
BUSTOS-VANEGAS. **Charcoal cooling kinetics: computational simulation and technological applications**. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2019.

BUSTOS-VANEGAS, J. D.; MARTINS, M. A.; FREITAS, A. G.; MELLMANN, J. Experimental characterization of self-heating behavior of charcoal from *Eucalyptus* wood. **Fuel**, v.244, p.412-418, 2019.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; MAGALHÃES, M. A.; CÂNDIDO, W. L.; FIALHO, L. F. Comportamento térmico e emissão de gases não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 261- 267, 2016.

CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; FREDERICO, P.G.U.; FIGUEIRÓ, C.G.; FIALHO, L.F.; SILVA, C.M.S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Brazilian Journal of Wood Science**, v.8, n.3, p.127-135, 2017. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135>.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia & Biorrefinaria – Cana-deAçúcar & Espécies Florestais**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. p. 429-458.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema forno-fornalha para combustão de gases na carbonização da madeira**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

CARRASCO, E.V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; 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.

CASANOVA, T. P. **Propriedades físicas, aerodinâmicas e térmicas de frutos de café (*Coffea canefora*)**. 2012. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

CENGL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática**, 4ª Edição, Editora McGraw Hill, 2012.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, “Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia”. Brasília, 2015.

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.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Ficha de Informação de Produto Químico. Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=COAL%20TA R%20-%20CREOSOTO. Acesso em: 09 de agosto de 2021.

COSTA, J.M.N.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; ARAÚJO, S.O.; CANAL, W.D. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimento e densidade do carvão vegetal. **Brazilian Journal of Wood Science**. 11(1): 53-62, 2020 DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p53-62

COSTA, A.C.S.; LEAL, C.S.; SANTOS, L.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017.

COUTINHO, A.R.; FERRAZ, E.S.B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal. Em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, Piracicaba, n.38, p. 33-37, jan. 1988.

CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013

DAMÁSIO, R. A. P; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A.C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, M. S. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 11–22, 2015.

DE ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: desafios e perspectivas.

Encontro Brasileiro de Silvicultura. **Anais...**Nova Lima, MG: Embrapa Florestas, 2014.

DE OLIVEIRA, L.P.; CARNEIRO, A.C.O.; LUCAS, B.D.V.; VIEIRA, T.S.; JORGE, F.J.; DEMUNER, I.F. Composição química elementar e resistência térmica dos kinos da madeira de *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora*. CONDEQUI. **Anais...**, 2021. Disponível em: <https://eventos.congresse.me/condequi/edicoes/iv-condequi-4-edicao/anais>. Acesso em: 18 de junho de 2023.

DELATORRE, F. M.; CUPERTINO, G. F. M.; SANTOS JUNIOR, A. J.; SILVA, Á. M.; SILVEIRA, M. P. R. Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia. **Agropecuária Científica no Semiárido**. Patos-PB, v.16, n.2, p.138-144, agosto-setembro, 2020.

DI BLASI, C.; BRANCA, C.; SANTORO, A.; HERNANDEZ, E.G. Pyrolytic behavior and products of some wood varieties. **Combustion and Flame**, Italy, v. 124, n. 2, p. 165–177, Jan. 2001.

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R., MILAGRES, E. G.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 2, 2020.

DOS SANTOS, W. N. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I-o método de pulso de energia. **Cerâmica**, v. 51, p. 205-213, 2005.

EMAMINASAB, M.; TARMIAN, A.; POURTAHMASI, K Permeability of poplar normal wood and tension wood bioincised by *Physisporinus vitreus* and *Xylaria longipes*. **Int Biodeterior Biodegrad**, 105:178–184, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.09.003>

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FELIZARDO, V.; NANDI, V.S.; DONADEL, K.; NOVAIS, R.; LABRINCHA, J.; ZACCARON, A. Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutividade térmica. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 21, n. 2, p. 429–436, abr. 2016.

FERREIRA, F.A. (1989). **Patologia florestal; principais doenças florestais no Brasil**. Viçosa: SIF, 570p.

FIALHO, L.D.F.; CARNEIRO, A.C.O; CARVALHO, A.M.M.L; FIGUEIRÓ, C.G.; SILVA, C.M.S.; MAGALHÃES, M.A.; PERES, L.C. Produção de biocarvão com biomassas agroflorestais no Brasil. **Madeiras, Cienc. technol.**, Conceição, v. 21, não. 3, pág. 357-366, jul. 2019.

FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; da SILVA, C. M. S.; PERES, L. C. Energetic valorization of sawmill waste through slow pyrolysis. **Revista Floresta**, v. 49, p. 109-116, 2018.

FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, G. R.; CANEIRO, A. P. S.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; DA SILVA, C. M. S.; DE CASTRO, V. R. Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.14, n.3, e5659, 2019.

FIGUEIRÓ, Clarissa Gusmão. **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 ENERGIANO 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.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. v. 1.112 p.

GOODGER, J.D.; SARGENT, D.; HUMPHRIES, J.; WOODROW, I. E. Monoterpene synthases responsible for the terpene profile of anther glands in *Eucalyptus polybractea* R.T. Baker (Myrtaceae), **Tree Physiology**, v. 41, n. 5, p. 849-864, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa161>

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V. LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G.; SANTOS, I. S.; CARNEIRO, A. C. O. Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência Florestal**., Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 677-687, jul.-set. 2020.

GOMIDE, J., L., DEMUNER, B., J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HASAN, M.; HU, X.; GUNAWAN, R.; LI, C. Pyrolysis of large mallee wood particles: Temperature gradients within a pyrolysing particle and effects of moisture content. **Fuel Processing Technology**, Australia, 158, p. 163–171, Apr. 2017.

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. Ano base 2019. **Relatório anual**. 176 p. Brasília: IBÁ, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Banco de dados meteorológicos. Estação A510 (2022). Viçosa - MG, 2022.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de Silício Metálico**. 2014. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

JESUS, M. S.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F.; ABREU JÚNIOR, Á. A.; MARTINEZ, C. L. M.; FREITAS, T. P. Energy and mass balance in the pyrolysis process of eucalyptus wood. **Cerne**, Lavras, MG, v.24, n.3, p.288-294, 2018.

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.

JIANG, S.; HU, X.; SHAO, X.; SONG, Y.; XIA, D.; LI, C. Z. Effects of thermal pretreatment and ex situ grinding on the pyrolysis of mallee wood cylinders. **Fuel Processing Technology**, v. 159, n. 1 p. 211-221, 2017.

KAJINA, W.; JUNPEN, A.; GARIVAIT, S.; KAMNOET, O.; KEERATIISARIYAKUL, P.; ROUSSET, P. Charcoal production processes: an overview. **Journal of Sustainable Energy & Environment**, v.10, p.19-25, 2019.

KAN, T.; STREZOV, V., EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, n. 1, p. 1126-1140, 2016.

KATALAMBULA, H.; HAYASHI, J. I.; CHIBA, T., KITANO, K.; IKEDA, K. Dependence of single coal particle ignition mechanism on the surrounding volatile matter cloud. **Energy & fuels**, v. 11, n. 5, p. 1033-1039, 1997.

LANA, A. Q. **Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo do carvão vegetal**. Tese (Doutorado em Ciências). 2018. 87 p. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2018.

LI, L.; ROWBOTHAM, J. S.; GREENWELL, C. H.; DYER, P. W. An introduction to pyrolysis and catalytic pyrolysis: versatile techniques for biomass conversion. **New and Future Developments in Catalysis**, v.1, p.173-208, 2013.

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; FIGUEIREDO, I. C. R.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3302, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>

LOPES, E. D.; GONÇALVES, J. F.; MARTINS, N. S.; PENNA, C. A. A.; COELHO, D. A. F.; LAIA, M. L. Energy potential of wood from clones of *Eucalyptus* and *Corymbia* in different spacings. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.17, n.3, e1278, 2022. DOI: 10.5039/agraria.v17i3a1278 - Protocol 1278

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M.A.; MELO, I.C.N.A.; OLIVEIRA, A.F.F.; TRUGILHO, P.F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, jan. 2021.

LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T.A.S.; COSTA, L.J.; SILVA, A.B.; ASSIS, M.R.; TRUGILHO, P.F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, Concepción, v. 21, n. 4, p. 619-630, Aug. 2019.

MAHDIAN, M.; HUANG, L.Y.; KIRK, D.W.; JIA, C.Q. Water permeability of monolithic wood biocarbon. **Microporous Mesoporous Mater** 303:110258, 202. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110258>.

MASSUQUE, J.; SANCHEZ, J. Y. S. C.; LOUREIRO, B. A.; SETTER, C.; LIMA, M. D. R.; SILVA, P. H. M.; PROTÁSIO, T. P.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Evaluating the Potential of Non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for Bioenergy in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 16, p.1592–1603, 2023.

MENDES, M. G; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. Belo Horizonte: Produção e utilização de carvão vegetal, **CETEC**, 1982.

MME/EPE, 2021. Balanço Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; NETO, R. A.; FERREIRA, C. A. Importance of Pits in *Corymbia Citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson (Myrtaceae) Wood Permeability. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 1, e20200012, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0012>

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. **Apostila**, 4. ed., 194 p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

MOUTINHO, V. H. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; BRITO, J.O.; BALLARIN, A.W.; ANDRADE, F.W.C.; CARDOSO, C.C. Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, jul./set. 2017.

NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T. de 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, dez. 2011.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T de P.; TRUGILHO, P. T.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NOBAKHT, M.; GRKOVIC, T.; TRUEMAN, S. J.; WALLACE, H. M.; KATOULI, M.; QUINN, R.J.; BROOKS, P.R. Chemical constituents of kino extract from *Corymbia torelliana*. **Molecules**, v. 19, n. 11, p. 17862-17871, 2014.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.

NUNES, E. S. **Análise da condutividade térmica em rochas sedimentares**. Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais). 2013. 97p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

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.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PEREIRA, B. L.C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M.L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A.P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, n. 37, v. 3, jun., 2013.

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

OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; SILVA, J. D. E. S. E. Resfriamento rápido de fornos de carbonização. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 30, n. 6, p. 1023–1032, 2010.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 64f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, J. T. 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, n. 1, p. 115-127, 2005.

PARK, W.C.; ATREYA, A.; BAUM, H.R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. **Combust Flame**, 157(3):481–497, 2010.

PECHA, B.; GARCIA-PEREZ, M. Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: Oil, Char, and Gas. **Bioenergy**, p. 413-442, 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.

PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, Jul. 2013.

PEREIRA, E. G.; MARTINS M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O.; Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592 - 600, 2016.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

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**, [s. l.], v. 2012, p. 8, 2012.

PEREIRA, B.L.C; OLIVEIRA, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; SANTOS, L.C. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for iron master. **International Journal of Forestry Research** 2012; 2012(1): 1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/523025>.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. Curso de atualização em carvão vegetal. **Apostila**. 2000, 76 p. Universidade Federal de Viçosa.

PINHEIRO, Márcia Aparecida. **Influence of wood dimensions in drying and in the properties charcoal**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINTO, E. M.; CALIL JÚNIOR, C. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de *Eucalyptus* de uso estrutural exposta ao fogo. **Revista Minerva**, v. 3, n. 2, p. 131-140, 2006.

PRAUCHNER, M. J.; PASA, V. M. D.; OTANI, C.; OTANI, S. Characterization and Thermal Polymerization of *Eucalyptus* Tar Pitches. **Energy & Fuels**, v. 5, p. 449-454, 2001.

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.

QUINTILHAN, M. T.; OLIVEIRA, W.C.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C.; MÔRA, R. Physical properties and preservative treatment of *Eucalyptus* and *Corymbia* wood. **Floresta**, [S.l.], v. 51, n. 2, p. 410-418, mar. 2021. ISSN 1982-4688. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v51i2.69280>.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2004.

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.

DOI: 10.5902/1980509848302. Disponível em:
<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/48302>. Acesso em: 26 maio. 2023.

RAMOS, M.O.; PINHEIRO, I.G.; DE SOUSA JUNIOR, L.G. Influência da porosidade na condutividade térmica, resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 515-528, 2021.

REGAZZI, A.J.; SILVA, C.H.O. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. I. dados no delineamento inteiramente casualizado. **Revista de Matemática e Estatística**, 22:33-45, 2004.

REIS, H., O. **Resfriamento de fornos de carbonização por injeção de vapor d'água**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

REZENDE, R.N.; LIMA, J.T.; PAULA, L.E.R.; HEIN, P.R.G.; SILVA, J.R.M. Wood Permeability in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*. **Floresta e ambiente**, 25:1-7, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.022815>

RODRIGUES, T. **Modelo de desenvolvimento de soluções conceituais de forno de carbonização**. 2019. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

ROHDE, G. M. **Carvão vegetal no Estado do Rio Grande do Sul: evidências científicas da impossibilidade de combustão espontânea**. Porto Alegre: Fundação Gaúcha dos Bancos Sociais, 2011. 121p.

SANTINI, E. J. Temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem. **Cerne**, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2000.

SANTOS, R.C.; CARNEIRO, A.C.O; VITAL, B.R.; CASTRO, R.V.O.; VIDAURRE, G.B.; TRUGILHO, P.F.; CASTRO, A.F.N.M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, abr.-jun., 2016.

SANTOS, M. A. S. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In.: Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, UFMG, 2008.

SANTOS, I.S.; MARTINS, M.A.; PEREIRA, E.G.; CARNEIRO, A.C.O.; Physical and thermal Properties of *Eucalyptus* wood charcoal. **Cerne**, v. 26, n. 1, p.109-117, 2020. doi: 10.1590/01047760202026012699.

SANTOS, I.S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

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.

SIAU, J. F. Transport processes in wood. 1. ed. Berlin: **Springer-Verlag**, 1984. 245 p.

SIEBENEICHLER, E.A.; DA COSTA, L.M.; FIGUEREDO, N.A.; TRONTO, J.; ROCHA, P.A. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Brazilian Journal of Wood Science**, 8(2): 82-94, 2017 DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p82-94.

SILVA, T.B.; SILVA, R.C.; LIMA, N. S. B.; CARVALHO, L. A.; SARAIVA, K. F.; MENDES, J. G. N.; LOIOLA, P. L.; FRANÇA, M.C.; MORAES, C.B.; MARCHESAN, R. Elaboração de programas de secagem para madeiras de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*. **Engenharia Florestal: Contribuições, análises e práticas em pesquisa**, 1 ed., Guarujá -SP: Editora Científica Digital, p. 118 – 129, Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/artigos/elaboracao-de-programas-de-secagem-para-madeiras-de-eucalyptus-spp-e-corymbia-citriodora>. Acesso em 05 de junho de 2023.

SILVA, M.R.; MACHADO, G. O.; DEINER, J.; CALIL JUNIOR, C. Permeability measurements of *Brazilian eucalyptus*. **Mater Res** 13:281–286, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300002>

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS, SINDIFER. **Anuário Estatístico**. Ano base 2020. 27 p. 2021.

SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. **Renewable Energy**, v. 80, p. 471-478, ago. 2015.

SUJANTI, W.; ZHANG, D. A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size. **Fuel**, v. 78, p. 549–556, 1999.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi TechnologyPark, 1996. v. 1.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1998. v. 1.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA, S. N. D.; SOUZA, A. L. D.; CAMPOS, R. A.; SCHETTINI, B. L. S. TORRES. Análise fitossociológica e valor de importância em carbono para uma Floresta Estacional Semidecidual. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 5, p. 467-481, 2016.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p 104-114, 2001.

TRUGILHO PF, SILVA JRM, MORI FA, TARCISIO JL, MENDES LM, MENDES LFB. Yield and charcoal characteristics in relation of radial sampling position in *Eucalyptus* clones. **Cerne**, v. 11, n.2, p. 178-186, 2005.

UHART, E. A. Floresta amazônica – fonte de energia. **Relatório técnico** – Convênio Sudam-C.T.F.T./França. Belém: SUDAM, 1972, 144 p.

URKAN, M. K.; ALKOL, M. Burning times of volatiles from Turkish coals during fluidized bed combustion. **Fuel**, China, v. 73, n. 5, p. 768-772, jan, 1994.

VAN BLIJDERVEEN, M.; GUCHO, E. M.; BRAMER, E. A.; BREM, G. Spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab scale packed bed. **Fuel**, v.89, n.9, p. 2393-2404, 2010.

VITAL, B., R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim técnico, 1).

VOLPE, R.; MENENDEZ, J. M. B.; REINA, T. R.; MESSINEO, A.; MILLAN, M. Evolution of chars during slow pyrolysis of citrus waste. **Fuel Processing Technology**, v. 158, n. 1, p. 255-263, 2017.

XIN, S.; YANG, H.; CHEN, Y.; YANG, M.; CHEN, L.; WANG, X.; CHEN, H. Chemical structure evolution of char during the pyrolysis of cellulose. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 116, n. 1, p. 263-271, 2015.

XIONG, S.; ZHANG, S.; WU, Q.; DONG, A.; CHEN, C. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, Essex, v.152, p.86–92, 2014.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGTH, P.J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal**, Victoria, v. 49, n. 4, p. 258-262, 1996.

WHITE, R. H.; DIETENBERG, M. A. Fire safety. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as engineering material**. Madison, 2010, USDA, cap. 18, p. 405-426.
WINK, C.; REINERT, D. J.; MULLER, I.; REICHERT, J. M.; JACOMET, L. A idade das plantações de *Eucalyptus* sp. influenciando os estoques de carbono. **Ciência Florestal**, v. 23, n.2, p 333-343, 2013.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN H.; ZHENG, C.; LEE, D.H.; LIANG, D.T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy Fuels**, 20(1):388–393, 2006.

YOUNSI, R.; KADEM, S.; LACHEMET, A.; KOCAEFE, D. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation. **Thermal Science**, v.19, n.2, p.693-702, 2015.

YU, Z. T.; XU, X.; FAN, L. W.; HU, Y. C.; CEN, K. F. Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature, and moisture content. **Forest Products Journal**, v.61, n.2, p.130-135, jan. 2011.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 401-408, maio 2014.

ZHU, H.; SONG, Z.; TAN. B.; HAO, Y. Numerical investigation and theoretical prediction of self-ignition characteristics of coarse coal stockpiles. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 26, p. 236-244, 2013.