

Recebido: 02-05-2018 Aceito: 23-11-2019 Publicado: 27-07-2020

Editorado por: André Luiz Missio

Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal

Danilo Barros Donato, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Ana Marcia Ladeira Macedo Carvalho, Benedito Rocha Vital, Emerson Gomes Milagres, Wagner Davel Canal

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO O objetivo deste trabalho foi estudar a influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e nas propriedades do carvão vegetal. A carbonização foi realizada em forno circular de alvenaria com capacidade volumétrica de 12 st, acoplado a uma fornalha para combustão dos gases. Foi analisada a madeira de *Eucalyptus* sp., em duas classes de diâmetro, de 7-12 cm e 13-18 cm. Para a determinação das propriedades do carvão vegetal foram coletadas amostras em três posições equidistantes do forno, com distância de 1 metro entre os pontos de coleta, considerando o no sentido da porta para fundo do forno. As carbonizações realizadas com madeira de menor diâmetro apresentaram redução de 14,86% do tempo de carbonização. O rendimento gravimétrico em carvão vegetal para as classes de menor e maior diâmetro foram de 33,62% e 31,67%, respectivamente. Os valores obtidos para análise química imediata do carvão para ambas as classes estão de acordo com o desejável para uso siderúrgico. Os valores de friabilidade para ambas as classes foram classificados como pouco friáveis. Entretanto, o carvão produzido com madeira de menor diâmetro teve menor percentual de geração de finos. A carbonização utilizando madeira de menor diâmetro apresentou maior produtividade em carvão vegetal.

Palavras-chave: rendimento gravimétrico; tempo de carbonização; friabilidade.

Influence of diameter of eucalyptus wood in productivity and properties of charcoal

ABSTRACT The objective of this work was to study the influence of wood diameter on the productivity and properties of charcoal. In order to proceed to the carbonization, a circular masonry furnace with volumetric capacity of 12 st was used, coupled to a furnace for the combustion of gases. *Eucalyptus* sp. Wood was used in carbonization in two diameter classes, 7 to 12 cm and 13 to 18 cm. For the determination of charcoal properties, samples were collected in three positions equidistant from the kiln, with a distance of 1 meter between the collection points, towards the door at the bottom. The carbonization carried out with smaller diameter wood had a reduction of 14.86% of the carbonization time. The gravimetric yield in charcoal for the classes of smaller and larger diameter were 33.62% and 31.67%, respectively. The values obtained for immediate chemical analysis of coal for both classes were consistent with what is desirable for steel use. The friability values for both classes were classified as poorly friable. However, charcoal produced with smaller diameter wood had a lower percentage of fines generation. It was concluded that the carbonization using smaller diameter wood obtained a higher productivity in charcoal.

Keywords: yield; carbonization time; friability.

Introdução

A produção de carvão vegetal é uma atividade de grande importância para o Brasil, em especial para o estado de Minas Gerais, que detém o maior parque siderúrgico a carvão

vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético (IBÁ, 2017). Entretanto, a maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil, é proveniente de fornos rudimentares

de baixo rendimento gravimétrico, sem controle das características da madeira, do processo de carbonização e das emissões atmosféricas, tendo como consequência, um produto final com propriedades físicas e químicas variáveis, o que compromete a sua qualidade e produtividade.

A qualidade da madeira é fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada produtividade. Entretanto, as propriedades do carvão vegetal não são dependentes apenas das características intrínsecas da madeira, mas de outros fatores como a condução do processo, as dimensões do forno, o diâmetro da madeira e o seu teor de umidade.

Assim, um dos grandes problemas enfrentados pelas indústrias siderúrgicas é a heterogeneidade das propriedades do carvão vegetal, ocasionadas pelo grande número de variáveis que influenciam o processo, destacando-se o teor de umidade e a variabilidade da classe diamétrica da madeira enforada.

Salienta-se que a variação diamétrica da madeira é o parâmetro que mais está presente em todas as etapas do processo de produção do carvão vegetal (RAAD, 2004). Devendo ressaltar que além de influenciar nas propriedades e nas etapas do processo de produção do carvão vegetal, o diâmetro da madeira exerce forte influência no custo da madeira, diluído ao tempo de estocagem em campo, no transporte e no ciclo de carbonização.

Portanto, devido aos custos de produção do carvão vegetal aliado a perdas em rendimento e qualidade influenciadas por essa variável, torna-se importante que os produtores busquem parâmetros adequados para uma determinada finalidade, em busca a uma maior produtividade, em menores tempo e custo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência do diâmetro da madeira de eucalipto na

produtividade e nas propriedades do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha.

Materiais e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido na unidade de pesquisa de produção de carvão vegetal do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG.

Descrição do sistema utilizado para as carbonizações

Para proceder à carbonização da madeira foi utilizado um forno circular de alvenaria com capacidade volumétrica de 12 st, acoplado a uma fornalha para combustão dos gases. Optou-se por esse tipo de forno por ser de baixo custo, fácil construção e bastante difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, principalmente no Estado de Minas Gerais. Na Figura 1 é apresentada uma vista em perspectiva do sistema construído.

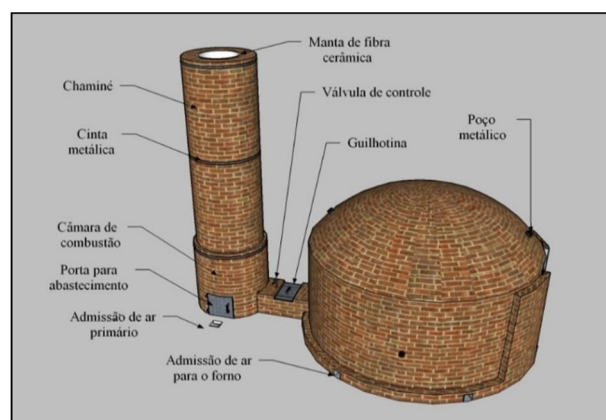


Figura 1. Vista em perspectiva do forno de alvenaria circular.
Figure 1. Perspective view of the circular brick oven.

O forno utilizado possui seis aberturas equidistantes distribuídas no seu perímetro, conhecida popularmente como “Tatus”, cujas dimensões são de 10 x 15 cm, para admissão de ar no sistema. A abertura e o fechamento dessas entradas controlam a entrada de ar para o sistema e,

consequentemente, as temperaturas do forno, auxiliando na condução da carbonização.

Utilizou-se uma fornalha para queima dos gases da carbonização, construída de tijolos de alvenaria com revestimento interno em manta cerâmica para melhorar o seu isolamento térmico do meio externo. A câmara de combustão da fornalha foi construída em formato cilíndrico e altura de 100 cm, diâmetro interno de 65 cm e externo de 110 cm.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante metálica revestida internamente por manta cerâmica, de 40 x 40 cm, para alimentação de combustível auxiliar (resíduos lignocelulósicos), responsável por aquecer a câmara de combustão e proceder à ignição dos gases advindos da carbonização.

No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão de ar primário para o interior da fornalha, advindo do meio externo, através de um duto subterrâneo de seção quadrangular.

Logo após a construção da câmara de combustão da fornalha foi feito um estrangulamento de 15 cm de diâmetro para aumentar o tempo de residência dos gases da carbonização na câmara de combustão e consequentemente aumentar a eficiência de combustão dos mesmos. A chaminé foi construída sobre a câmara de combustão, com 55 cm de diâmetro interno e altura total de 4 m.

A conexão entre o forno e a fornalha para condução dos gases foi feita por um duto de 38 cm de altura por 38 de largura e 70 cm de comprimento. O controle da vazão dos gases da carbonização para a fornalha foi realizado por meio da válvula de controle, operada manualmente, instalada ao centro do duto, aproximadamente a 40 cm de distância da parede do forno (Figura 1).

Para o controle da carbonização foram inseridos oito poços metálicos (cilindros metálicos com fundo fechado):

quatro localizados na copa a 1,70 m e quatro laterais a 60 cm em relação ao solo, distribuídos entre as aberturas para admissão de ar (tatus).

Carbonização da madeira

Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m, em duas classes de diâmetro, de 7 - 12 e de 13 - 18 cm. Foram realizadas seis carbonizações, sendo três por classe de diâmetro.

As carbonizações da madeira foram conduzidas utilizando as faixas teóricas de temperatura obtidas na copa do forno, conforme proposto por Oliveira et al. (2013), para madeira com teor de umidade entre 30 e 40% (Tabela 1). Sendo que o tempo final de carbonização foi adaptado em função da classe de diâmetro da madeira enforada, de modo a não comprometer a qualidade do carvão vegetal produzido.

Tabela 1. Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira.

Table 1. Theoretical temperature ranges to control wood carbonization.

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo de Temperatura
I	100 – 150 °C	15 – 16 horas
II	150 – 270 °C	11 – 12 horas
III	270 – 380 °C	23 – 24 horas
IV	380 – 400 °C	17 – 18 horas

Fonte: Oliveira *et al.* (2013)

Antes de cada carbonização determinou-se o teor de umidade da madeira, selecionando-se inicialmente amostras, em cada tora representativa das classes diamétricas da madeira a ser enforada, conforme estabelecido por Donato (2018). De cada tora foram retirados discos de aproximadamente 7 cm de espessura, nas posições de 25, 50 e 75% do comprimento total da tora. Utilizou-se o método gravimétrico, com secagem em estufa com circulação de ar forçado e temperatura de 103 ± 2 °C, até massa constante. De

posse da umidade média, determinou-se a massa seca da madeira enforada nas carbonizações. Além disso, foi determinada a densidade da madeira para ambas as classes de diâmetros de acordo a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984).

O controle da carbonização foi realizado pelo monitoramento da temperatura, e controle das entradas de ar (oxigênio) para o interior do forno, por meio da abertura ou do fechamento dos “tatus”, e pela “válvula borboleta”, que controlava a vazão de saída dos gases do forno.

As temperaturas do forno foram monitoradas nos oito cilindros metálicos com o auxílio de um sensor infravermelho, pirômetro, marca “Minipa” modelo “MT-350”, com capacidade de mensurar temperaturas entre - 30 e 550°C. O término da carbonização e a vedação do forno foram determinados pela chegada da frente de carbonização nos “Tatus” próximos ao duto, seguido pela redução do volume dos gases.

Logo após o resfriamento do forno foi realizado o descarregamento, de forma manual, com o auxílio de um garfo metálico apropriado, o qual consegue separar o carvão granular dos finos. O carvão vegetal foi pesado e separado das porções de finos e atijos (madeira parcialmente carbonizada), determinando-se os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGCV), rendimento gravimétrico em atijos (RGT) e o rendimento gravimétrico em finos (RGF), todos em relação à massa seca de madeira seca enforada.

Propriedades do carvão vegetal

Para a determinação das propriedades do carvão vegetal foram coletadas amostras em três posições equidistantes do forno, com distância de 1 metro entre os pontos de coleta, considerando o sentido da porta ao fundo do mesmo, correspondendo as amostras obtidas nas posições de amostragem 1, 2 e 3, respectivamente.

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada conforme a norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981), sendo realizada durante a etapa de descarregamento do forno.

Para a realização dos ensaios físicos e químicos, seguiu-se a preparação da amostra, baseada na norma ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981), com homogeneização e quarteamento de uma amostra de carvão vegetal representativa do forno e retirada de uma alíquota de 20 litros, por posição de amostragem no forno.

A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195 (ABNT, 1985).

Para determinação do poder calorífico superior e da composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram preparadas conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984). A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiram os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

A determinação da friabilidade do carvão vegetal, foi realizada por meio do teste de tamboramento, que consistiu em dispor uma amostra de 0,5 kg de carvão, classificado entre 60 e 20 mm, em um tambor rotativo de aço com 30 cm de diâmetro e aplicar 500 rotações a 30 rpm. A massa final da amostra, que se encontrava entre 60 e 20 mm foi medida. Após o teste, obteve-se a porcentagem com granulometria inferior a 20 mm, que foi comparada à escala de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982).

Delineamento experimental

Para avaliar o efeito do diâmetro da madeira nos rendimentos gravimétricos (carvão, finos e atijo) e nos parâmetros da carbonização (quantidade de madeira

enfornada e tempo de carbonização), o experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com duas classes de diâmetro da madeira, e três repetições (carbonizações), totalizando seis unidades amostrais.

As propriedades do carvão vegetal foram analisadas segundo um DIC disposto em esquema fatorial 3 x 2 (posição de amostragem no forno e classe de diâmetro da madeira), com 3 repetições, totalizando 18 unidades amostrais. Para ambos os casos, os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente.

Resultados e Discussão

Parâmetros e rendimentos gravimétricos das carbonizações

Observa-se que as carbonizações utilizando toras de menor diâmetro tiveram menor massa seca de madeira enfornada, tendo enfornado em média 4,45% a menos que a madeira de diâmetro maior, conforme a tabela 2.

Além disso, as carbonizações realizadas com madeira de menor diâmetro tiveram menor tempo de carbonização (63 horas), ou seja, 14,86% a menos que as realizadas com madeira de maior. Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, finos e atíços para ambas as classes de diâmetro foram considerados satisfatórios e apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Ao enfornar utilizando madeiras de menores dimensões tem-se uma maior quantidade de espaços vazios dentro do forno, sendo essa quantidade ainda maior quando o carregamento for mecanizado, gerando uma menor a massa de madeira enfornada (Tabela 2). Vale ressaltar que quanto menor a quantidade de madeira enfornada, menor será a produtividade do forno em carvão vegetal.

Tabela 2. Parâmetros e rendimentos gravimétricos das carbonizações, em função das classes de diâmetro da madeira.
Table 2. Parameters and gravimetric yields of the carbonizations, according to the diameter classes of the wood.

Parâmetros	Diâmetro da Madeira	
	7-12 cm	13-18 cm
Massa seca de madeira enfornada (kg)	3061,43 A (± 32,48)	3203,92 B (±45,22)
Teor de umidade da Madeira (%)	34,28 A (±1,92)	39,35 B (±2,36)
Tempo de carbonização (horas)	63,0 A (±1,00)	74,0 B (±0,82)
Rendimento Gravimétrico em carvão vegetal (%)	33,62 A (±0,96)	31,67 B (±0,17)
Rendimento Gravimétrico em finos (%)	1,89 A (±0,27)	1,96 A (±0,36)
Rendimento Gravimétrico em atíço (%)	0,23 A (±0,17)	0,46 A (±0,12)

* Médias seguidas da mesma letra nas linhas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F. Os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

A madeira de maior diâmetro apresentou maior teor de umidade (Tabela 2), proporcionando grande influência sobre o tempo final de carbonização, pois quanto mais elevado esse teor, maior será o tempo necessário para eliminação desta água, no início da carbonização, aumentando o tempo da fase endotérmica e consequentemente, o tempo total de carbonização.

Raad (2006) menciona que quanto maior for o teor de umidade da madeira, maior será a fase de secagem do processo, consequentemente, menor será o tempo de carbonização, reduzindo-se a produtividade do forno. De acordo com Pereira et al. (2016), as variáveis relacionadas ao controle do processo, e as características da matéria-prima, como diâmetro e teor de umidade, influenciam no tempo total de carbonização, na qualidade e fluxo de gases.

A degradação térmica da madeira ocorre da superfície para o seu interior na proporção que o calor é transferido de uma região para outra. Logo, conforme observado toras de maior diâmetro necessitaram de mais tempo para sua

completa transformação em carvão, o que eleva o tempo de carbonização.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal, independente da classe de diâmetro da madeira, foi considerado satisfatório, uma vez que a estimativa da média nacional está em torno de 26% de acordo com os dados do CGEE (2015), evidenciando a importância da técnica de pirometria para o controle adequado da temperatura de carbonização, auxílio no controle do processo e aumento do rendimento em carvão. Logo o controle da carbonização com auxílio de um pirômetro torna possível uma melhor conversão da madeira em carvão, evitando sua excessiva degradação, promovendo aumento de produtividade por fornada em função do maior rendimento gravimétrico, visto que esse é um dos fatores que mais influenciam a produtividade dos fornos.

Em relação ao rendimento gravimétrico, verifica-se que o rendimento médio em carvão vegetal para a madeira de menor diâmetro foi significativamente maior e isso se deve, além do menor teor de umidade, ao fato desta apresentar uma maior área superficial, o que promoveu uma carbonização mais homogênea, assim como uma maior taxa de aquecimento nas fases inicial e final do processo, resultando em uma menor degradação térmica em função do menor tempo de exposição da madeira ao calor nestas fases.

Nota-se que para ambas as classes de diâmetro os valores de rendimento em finos foram baixos (Tabela 2), provavelmente, devido ao controle adequado da temperatura de carbonização por pirometria. Segundo Damásio et al. (2015), a temperatura de carbonização acima de 480°C pode ocasionar maior degradação da madeira, elevando o teor de carbono fixo do carvão e conseqüentemente, diminuindo sua resistência, refletindo na maior geração de finos.

Apesar de não observar diferença significativa, a geração de finos nas carbonizações realizadas com madeira de menor

diâmetro foi numericamente menor, isso provavelmente se deve ao menor teor de umidade e menor proporção de cerne nessa madeira. Segundo Pereira (2013), quanto maior a proporção de cerne, maior será o caminho obstruído a ser percorrido pelos gases, conseqüentemente, maior o número de células rompidas e o teor de finos gerado.

Os valores médios de rendimento gravimétrico em atijo, independente da classe de diâmetro podem ser considerados baixos, o que demonstra que, quase, toda madeira foi convertida em carvão vegetal, evidenciando que a carbonização foi realizada de maneira adequada, de acordo com as faixas teóricas de temperatura previstas para condução do processo.

Propriedades do carvão vegetal

Não houve efeito dos tratamentos na densidade a granel e aparente do carvão vegetal, sendo os valores médios iguais a 156,41 e 355 kg/m³, respectivamente.

De acordo com Santos (2008) os valores encontrados para densidade a granel e aparente do carvão no presente estudo são inferiores ao desejado para uso siderúrgico. O autor menciona que os valores desejáveis para densidade a granel e a aparente são respectivamente de 200 Kg/m³ e 400 Kg/m³. Estes resultados podem ser explicados pelo menos em parte pela baixa densidade básica média da madeira utilizada, 460 kg/m³ para toras de 7-12 cm e de 470 kg/m³ para as de 13-18 cm.

Observava-se que os valores do poder calorífico superior (PCS) foram significativamente diferentes para as diferentes classes de diâmetro, conforme a Tabela 3. Não houve diferença significativa entre as posições porta e meio para ambas as classes de diâmetro, sendo a posição fundo do forno estatisticamente diferente, apresentando menor valor de PCS do carvão.

Tabela 3. Valores médios do poder calorífico superior (Kcal/kg) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus sp* em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Table 3. Mean values of the upper calorific value (Kcal / kg) of the charcoal of *Eucalyptus sp* wood as a function of oven position and diameter class.

Diâmetro da madeira	Posição no forno (Kcal/kg)		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	7307	7446	6946
	Kcal/kg aA	Kcal/kg aA	Kcal/kg bA
13 – 18 cm	7032	6909	6808
	Kcal/kg aB	Kcal/kg abB	Kcal/kg bB

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

A diferença obtida para o PCS entre as classes de diâmetro provavelmente se deve aos maiores valores de carbono fixo obtido para as toras de menor diâmetro e nas posições porta e meio do forno (Tabela 4). De acordo com Neves et al. (2011), Trugilho; Silva (2001), e Vale et al. (2001), o poder calorífico tem uma relação diretamente proporcional com o teor de carbono fixo.

Ressalta-se que a carbonização de madeira no sistema forno-fornalha utilizado, cuja tiragem dos gases é feita de forma inversa, ou seja, inicia-se no sentido da porta do forno para o fundo, sendo que à medida que a frente de carbonização avança, a madeira vai degradando termicamente, e seus constituintes primários vão sendo eliminados, principalmente hemiceluloses e celulose, resultando em uma maior concentração de carbono. Sendo assim, espera-se que os valores dessa variável sejam maiores na posição da porta em relação às demais.

Observa-se, na Tabela 4, que os teores de carbono fixo (CF) dos carvões produzidos com madeira de menor diâmetro foram significativamente diferentes ao longo das posições do forno. No entanto, o mesmo não foi observado para as toras de maior diâmetro em relação as posições meio e fundo.

Tabela 4. Valores médios do teor de carbono fixo (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus sp* em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Table 4. Mean values of the fixed carbon content (%) of the charcoal of *Eucalyptus sp* wood as a function of oven position and diameter class.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	84,25 % aA	78,66 % bA	74,82 % cB
13 – 18 cm	82,28 % aA	76,20 % cA	78,84 % bA

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Pela Tabela 4 verifica-se que os teores médios de CF para ambas as classes de diâmetro foram estatisticamente iguais, exceto na posição de fundo do forno, e que na média é condizente com as exigências para utilização do carvão vegetal na siderurgia. Segundo Rosillo-Calle; Bezzon (2005), o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter teor de carbono fixo superior a 75%, uma vez que valores inferiores afetam o consumo específico de redutor e consequentemente, a produção de ferro- gusa.

A diferença estatística observada no carvão de fundo do forno entre as duas classes diamétricas se deve, provavelmente, ao maior tempo de exposição à temperatura final do processo (400°C) nas toras de maior diâmetro, acarretando em maior teor de CF. Segundo Trugilho; Silva (2001), a temperatura final de carbonização é o principal fator que influencia o teor de carbono fixo do carvão vegetal, confirmando os valores obtidos no estudo.

Os valores médios obtidos para materiais voláteis (MV) foram inversamente proporcionais aos teores de CF como pode ser observado na Tabela 5.

Os teores de materiais voláteis para ambas as classes de diâmetros foram condizentes com os valores desejáveis para uso siderúrgico (Tabela 5). Segundo Santos (2008), os valores do teor de materiais voláteis no carvão vegetal desejáveis para

uso siderúrgico situam-se entre 20 e 25%; valores esses próximos aos encontrados nesse estudo.

Tabela 5. Valores médios do teor de voláteis (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Table 5. Mean values of the volatile content (%) of the charcoal of *Eucalyptus* sp wood as a function of oven position and diameter class.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	14,90 % cB	20,69 % bB	23,38 % aA
13 – 18 cm	17,08 % cA	23,06 % aA	20,44 % bB

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Observa-se que os valores médios obtidos para os teores de cinzas, independente do tratamento, foram próximos e dentro dos limites desejáveis para carvão vegetal (Tabela 6). Segundo Cortez et al. (2009), um bom carvão vegetal deve ter um conteúdo de cinzas inferior a 3%.

Tabela 6. Valores médios do teor de cinzas (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Table 6. Mean values of ash content (%) of charcoal of *Eucalyptus* sp wood as a function of oven position and diameter class.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	0,85 % aA	0,65 % bA	0,58 % cB
13 – 18 cm	0,74 % aB	0,64 % bA	0,72 % aA

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Na literatura são relatados teores de cinzas inferiores a 1% para o carvão vegetal de várias espécies de eucalipto (LIMA et

al., 2011; NEVES et al., 2011; SANTOS et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; BOTREL et al., 2007; TRUGILHO et al., 2005), corroborando com os valores encontrados nesse estudo.

Ressalta-se que o teor de cinzas se relaciona com a madeira e não é influenciada pelo processo de carbonização, considerando a mesma temperatura final, e sim pela espécie, quantidade de casca e principalmente por contaminação por terra e/ou areia na madeira. Logo, os maiores teores de cinzas obtidos na posição da porta do forno para ambas classes de diâmetro, provavelmente, foram devido a vestígios de barro que podem ter caído sobre a massa de carvão ao abrir a porta do forno.

Tabela 7. Valores médios da friabilidade (%) do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp em função da posição no forno e classe de diâmetro.

Table 7. Mean values of friability (%) of the charcoal of *Eucalyptus* sp wood as a function of oven position and diameter class.

Diâmetro da madeira	Posição no forno		
	Porta	Meio	Fundo
7 – 12 cm	12,41 % bB	12,74 % aB	11,69 % cB
13 – 18 cm	13,79 % cA	14,36 % aA	12,54 % bA

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Os valores de friabilidade para ambas as classes de diâmetro foram satisfatórios, e tiveram a mesma classificação de acordo com o CETEC (1982), sendo classificados como pouco friáveis, ou seja, a porcentagem de perda na forma de finos variou de 10 a 15% em relação à massa inicial de carvão vegetal.

Verifica-se na Tabela 7 que os valores de friabilidade nas diferentes posições no forno para ambas classes de diâmetro apresentaram diferença estatística significativa. Sendo que os maiores valores foram obtidos na posição do meio e porta do

forno. Isso se deve ao fato de que a madeira carbonizada nessas posições ter uma maior degradação térmica, acarretando um maior teor de carbono fixo e consequentemente, uma menor resistência mecânica.

Nota-se que os valores médios de friabilidade para as toras de menor diâmetro obtiveram uma menor geração de finos, corroborando com o estudo de Coutinho e Ferraz (1988), onde o índice de friabilidade, mantendo-se fixa a temperatura de carbonização, em carvões originados de árvores de diâmetro maior produzem maior quantidade de finos.

Isso é se deve principalmente ao maior teor de umidade e diâmetro da madeira carbonizada, pois a carbonização da madeira ocorre da superfície para o interior da tora, e a liberação dos gases durante o processo percorre o caminho inverso. Sendo assim, quanto maior os valores dessas variáveis, maior será a pressão de vapor d'água no interior da tora e a distância percorrida pelos gases liberados durante o processo, podendo acarretar o rompimento de estruturas carbonáceas já formadas, que são menos resistentes, o que gera carvão com menor resistência mecânica.

Outra característica que está relacionada ao diâmetro da tora e tem influência direta nas propriedades do carvão vegetal é a relação cerne/alburno, uma vez que a maior proporção de cerne promove uma maior geração de finos, devido a impermeabilidade do mesmo.

De acordo com Silva; Trugilho (2003), quanto mais elevada for a relação C/A, maior será a dificuldade para liberação dos gases e maior será o número de estruturas rompidas, gerando um carvão vegetal mais friável e, portanto, produzindo maior porcentagem de finos.

Conclusões

Obteve-se maior produtividade em carvão vegetal nas carbonizações utilizando madeira de eucalipto de menor diâmetro. Além disso, o uso de madeiras de menor diâmetro

proporcionou redução no tempo de carbonização em 14,86% em comparação com a madeira de maior, reduzindo o tempo médio em aproximadamente 11 horas.

De modo geral, os valores obtidos para análise química imediata do carvão produzido para ambas classes de diâmetro foram condizentes com o que é desejável para uso siderúrgico.

O carvão vegetal produzido com toras de menor classe de diâmetro teve uma maior resistência a friabilidade. Portanto, conclui-se que o uso da madeira de menor diâmetro considerada neste estudo proporcionou melhores resultados na produtividade e qualidade do carvão vegetal.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8112** Carvões vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9165** Carvões vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633** Carvões vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6922** Carvões vegetal: Determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6923** Carvões vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981. 15p.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

- 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. **Séries Técnicas CETEC**, Belo Horizonte, 393 p. 1982.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade. **Séries Técnicas CETEC**, Belo Horizonte, 173 p. 1982.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2009.
- COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em Função do diâmetro das árvores e temperatura de Carbonização. **IPEF**, n.38, p.33-37, 1988.
- DAMÁSIO, P. A. R.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; BARCELOS, C. D.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, A. M.; SILVA, S. M. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 11-22, 2015.
- DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. Métodos de amostragem e número de toras de madeira para determinação do teor de umidade. **Revista Árvore** Viçosa-MG, 2018.
- IBÁ. INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário Estatístico 2017, ano base 2016**. Brasília, 2016. 100p.
- LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; 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, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell.. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. Belo Horizonte, M.G. **CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais**, p.77-89, 1982.
- 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.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98 p. 217-225, 2013.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO. P.C.C; YOSHIDA M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp*. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.