









Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais

Clarissa Gusmão Figueiró¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro¹, Gérson Rodrigues Santos²,
Antônio Policarpo Souza Carneiro², Lucas de Freitas Fialho¹, Mateus Alves Magalhães¹,
Carlos Miguel Simões da Silva¹, Vinícius Resende de Castro¹

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG, Brasil. E-mail: clarissagfigueiro@gmail.com; cassiacarneiro1@gmail.com; l.freitasfialho@gmail.com; mateusmagalhaes91@gmail.com; karmiguel@yahoo.com.br; vresende@gmail.com

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Estatística, Viçosa, MG, Brasil. E-mail: prof.gersonrodrigues@gmail.com; policarpo@ufv.br

RESUMO: O objetivo deste estudo foi caracterizar as propriedades do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais, por meio da análise de componentes principais. Para isto, foram amostrados três estoques industriais de carvão vegetal, provenientes dos Forno I e II, com capacidade volumétrica de 500 e 180m³ de madeira, respectivamente. Determinaram-se as características do carvão vegetal, como granulometria média, teor de finos, densidade a granel e composição química imediata. Foram realizadas as análises descritiva e de componentes principais com o objetivo de avaliar as relações entre as propriedades do carvão vegetal. De forma geral, para ambos os fornos, observou-se que a granulometria média teve uma relação negativa com teor de finos, enquanto a densidade a granel, uma relação positiva. No entanto, a relação entre o carbono fixo e teor de cinzas para o Forno I foi direta, e para o II foi inversa. As propriedades do carvão vegetal dos fornos retangulares, de forma geral, apresentam média assimetria. O carvão vegetal possui alta variabilidade nas suas propriedades, no entanto, é possível, por meio de ajustes operacionais, melhorar a qualidade do carvão para o consumidor final.

Palavras-chave: análise de componentes principais; carbono fixo; granulometria média

Characterization of charcoal produced in industrial rectangular furnaces

ABSTRACT: The objective of this study was to characterize the properties of charcoal produced in industrial rectangular furnaces, using principal components analysis. For this, three industrial stocks of charcoal were sampled from Furnace I and II, with volumetric capacity of 500 and 180m³ of wood, respectively. The average particle size, fines content, bulk density and proximate composition were determined. Descriptive analysis and principal component analysis were carried out to evaluate the relationships between charcoal properties. In general, for both furnaces, it was found that the average particle size showed a negative relationship with fines content as the bulk density had a positive relationship with the content of fines. However, the relationship between the fixed carbon and ash content for Furnace I was direct, and for Furnace II was inverse. The charcoal properties of the rectangular furnaces, in general, present a medium asymmetry. The charcoal has a high variability in its properties, however, it is possible, by operating adjustments to improve the quality of coal to the consumer.

Key words: principal component analysis; fixed carbon; average particle size

Introdução

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em escala industrial, sendo responsável por aproximadamente 14% da produção mundial (FAO, 2018). Do total produzido, mais de 98% é destinado ao abastecimento do mercado interno, sendo os setores de ferro-gusa, aço e ferro-ligas os principais responsáveis por este consumo (SINDIFER, 2017).

Quando utilizado como termo redutor, o carvão vegetal tem função fundamental nos altos-fornos, uma vez que fornece carbono e energia para redução do minério de ferro, além de atuar como estrutura de sustentação da carga de minério. Portanto, para desempenhar todas essas funções é fundamental que este possua propriedades adequadas a fim de garantir a produtividade e a qualidade do produto final (Cruz & Barroso, 2007).

As propriedades do carvão vegetal, de modo geral, apresentam alta variabilidade, causadas por diversos fatores, como a qualidade da matéria-prima, o processo de carbonização e as atividades relacionados a sua movimentação, como a carga e descarga. Em modelos de produção em larga escala, caracterizados pelo alto grau de mecanização e capacidade produtiva, esta variabilidade tende a aumentar (Pereira et al., 2013).

Ao longo dos anos, as empresas do setor vêm buscando a ampliação de sua produtividade por meio de investimentos na construção de fornos com maior capacidade volumétrica. Nestes tipos de fornos, pela maior quantidade de madeira enfornada, há uma grande dificuldade no controle do processo, em função da mudança na dinâmica da carbonização, o que pode impactar a distribuição dos gases, taxa de aquecimento e temperatura no forno (Santos et al., 2017).

Os trabalhos que avaliam as propriedades do carvão produzido em fornos industriais de larga escala são escassos na literatura. Portanto, percebe-se a necessidade de estudos que contribuam para a elucidação de questões relacionadas à variabilidade destas propriedades e como elas se relacionam em diferentes sistemas de produção em larga escala. Uma vez investigadas tais propriedades, o desenvolvimento de procedimentos para coleta de informações do produto é facilitado, favorecendo, portanto, um controle de qualidade eficiente do carvão vegetal.

Deste modo, este estudo tem como objetivo caracterizar as propriedades do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais, por meio da análise de componentes principais.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), industrial localizada no município de Veredinha, Minas Gerais, Brasil. Para a realização das carbonizações foram utilizadas madeira com casca de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, proveniente de plantio comercial aos 7 anos de idade, espaçamento de 3 x 3 m, localizados no município de Capelinha, MG. Foram

utilizadas madeiras de diâmetro de 12 a 28 cm, comprimento de aproximado de 3 m. Na Tabela 1 estão apresentadas as informações tecnológicas do material genético utilizado.

Tabela 1. Informações do clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Idade (anos)	7
Incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	44,11
Densidade básica (g cm^{-3})	540,00
Umidade (base seca) (%)	35,00
Relação cerne/alburno	0,52
Composição química estrutural	
Extrativos totais (%)	5,08
Lignina total (%)	27,62
Holoceluloses (%)	67,21
Composição química imediata	
Carbono fixo (%)	12,23
Materiais Voláteis (%)	87,66
Cinzas (%)	0,09
Poder calorífico superior (MJ kg^{-1})	19,20

Produção de carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em fornos retangulares (Figura 1) de dois tamanhos distintos, construídos em alvenaria de tijolos cerâmicos e estrutura de concreto armado, com dimensões de 26,5 x 8,0 x 5,98 m e de 26,5 x 4,0 x 4,87 m (comprimento x largura x altura), respectivamente. O primeiro com capacidade volumétrica nominal aproximada de 500 m^3 (Forno I) e o segundo de 180 m^3 (Forno II).

A produção do carvão vegetal iniciou com o recebimento da madeira na UPC, a qual foi depositada em estoques, comumente denominada de “boxes”, localizados ao lado do respectivo forno onde foi realizada a carbonização. O fluxograma do processo de carbonização consta da Figura 2.

Antes do carregamento da madeira no forno, realizou-se a limpeza dos controladores de ar (câmaras) e da chaminé. Em seguida, o carregamento do forno foi realizado por meio de um implemento (garra) acoplado a um trator agrícola. Após o carregamento, fecharam-se as portas do forno com uso de macaco hidráulico. Ressalta-se que a madeira no interior do forno foi depositada na horizontal.

A primeira etapa da carbonização consistiu na ignição do forno, que é fornecimento inicial de energia para o processo.

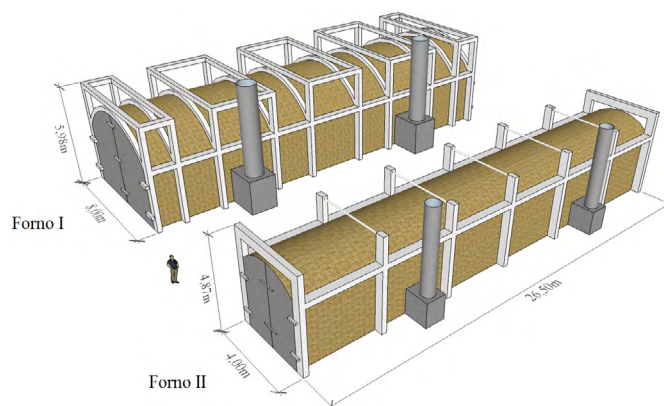


Figura 1. Diagrama esquemático dos Fornos I e II, utilizados para a carbonização.

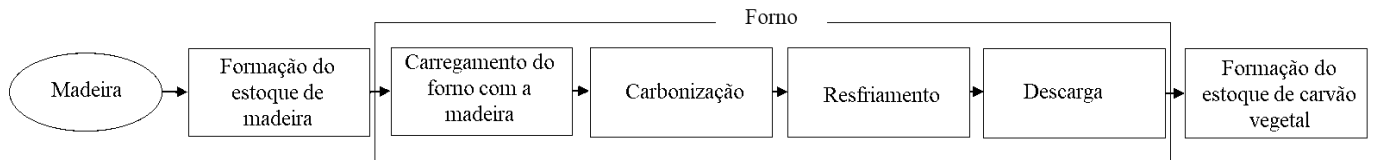


Figura 2. Fluxograma de produção de carvão vegetal.

Procedeu-se a ignição nas câmaras de admissão de ar dos fornos, com uso de atíço (porção de carvão vegetal residual não carbonizada).

Para controle do processo de carbonização foram realizadas medições da temperatura nas tampas da chaminé e também nas portas (parte superior, central e inferior), com uso de um pirômetro, em intervalo de tempo de duas horas, durante todo o processo de carbonização, que teve duração de aproximadamente cinco dias e temperatura final de carbonização de 350 °C, para ambos os fornos.

Ao final da carbonização, iniciou-se o resfriamento do carvão, que consistiu na vedação das câmaras de admissão de ar. O resfriamento do Forno II ocorreu, em média com 8 dias, enquanto para o Forno I esse tempo foi maior, em média 12 dias.

Após o resfriamento do carvão vegetal, procedeu-se à abertura da porta do forno. Assim, a retirada do carvão foi realizada por um implemento (concha) acoplado a um trator agrícola. A descarga foi de forma que o estoque de carvão fosse depositado em camadas, ou seja, as primeiras conchadas do trator corresponderam à porção basal do estoque e as finais formaram o topo do estoque.

Ao final do descarregamento, o estoque de carvão vegetal foi novamente rearranjado com uso de um trator, com objetivo de deixar o estoque na forma aproximada de um prisma triangular. Tal característica de formação do estoque está relacionada com facilidade operacional. Para cada ciclo completo de carbonização foi gerado um estoque, totalizando assim, no final, três estoques para cada tipo de forno.

Amostragem do carvão vegetal

Para a coleta do carvão vegetal nos estoques, utilizou-se um implemento coletor de carvão vegetal. O implemento

coletor foi construído com aço carbono com 8 metros de comprimento, 45 centímetros de diâmetro interno, e o volume interno de aproximadamente 0,2 m³. O implemento foi acoplado ao sistema hidráulico de um trator agrícola, sendo capaz de coletar amostras de carvão ao longo de toda a largura do estoque (Figura 3).

A amostragem do carvão vegetal foi realizada de forma sistemática, em que as unidades amostrais foram selecionadas por meio de esquema de pontos amostrais preestabelecidos. Foram alocadas 25 unidades amostrais ao longo da estrutura do estoque para o Forno I. Cada unidade amostral apresentou volume médio de aproximadamente 0,04 m³ de carvão vegetal.

Para o Forno II, foram distribuídas 15 unidades amostrais no estoque de carvão vegetal (Figura 4). A coleta de unidades amostrais na parte superior e inferior, para ambos os tipos

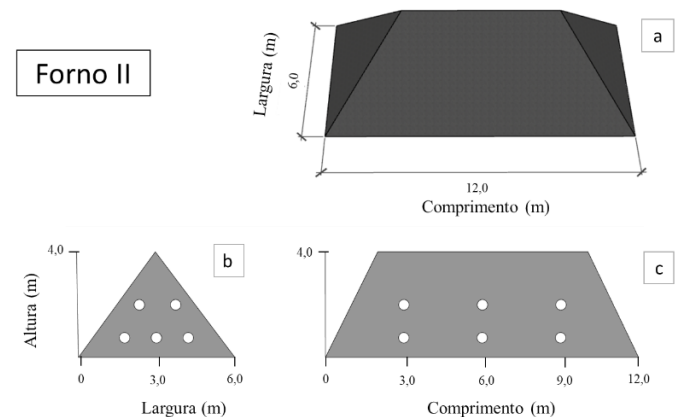


Figura 4. a) Diagrama esquemático do estoque de carvão vegetal proveniente do Forno II; b e c) esquema de unidades amostrais distribuídas no estoque.

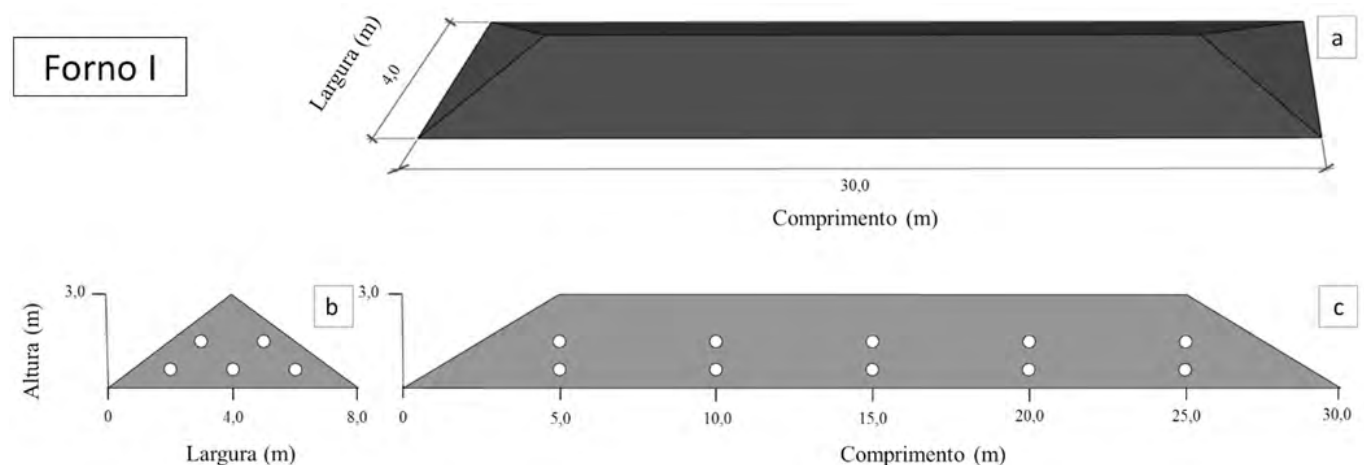


Figura 3. a) Diagrama esquemático do estoque de carvão vegetal proveniente do Forno I; b e c) esquema de unidades amostrais distribuídas no estoque.

de estoques (provenientes dos Fornos I e II), foi realizada seguindo o mesmo procedimento. Na parte superior do estoque, o implemento coletou duas unidades amostrais a cada vez que o mesmo era introduzido no estoque. Para a parte inferior, o implemento coletou três unidades amostrais.

O número de coletas na parte superior do estoque foi menor que na parte inferior, por causa da largura do estoque na parte superior ser menor. Após a coleta, as unidades amostrais foram colocadas em recipientes fechados e direcionadas para o laboratório de análises.

Propriedades do carvão vegetal

A classificação granulométrica do carvão vegetal foi realizada, em duplicata, de acordo com a NBR 7402 (ABNT, 1982). Primeiramente, toda a massa da amostra de carvão foi colocada em um conjunto de peneiras vibratórias. Foram utilizadas 12 peneiras com malhas de 63,5; 50,8; 44,2; 38,1; 31,7; 25,4; 19,05; 15,9; 12,7; 9,52; 6,25; e 4,76 mm. O conjunto ficou em agitação por 5 min, sendo o carvão retido em cada peneira recolhido e posteriormente aferido a massa.

O teor de finos do carvão foi calculado por meio da divisão da massa de carvão que passou pela peneira de 9,52 mm pela massa total da amostra. O teor de finos se refere à fração do carvão vegetal que é considerado resíduo, não sendo utilizado como termo redutor nos altos-fornos. A granulometria média do carvão vegetal foi calculada segundo a Equação 1.

$$TM = [B(a - c) + C(b - d) + \dots + L(k - m) + 100 \times 1] \times 0,005 \quad (1)$$

em que:

- TM - granulometria média do carvão vegetal (mm);
- a, b, c, d, ..., k, l, m - abertura das malhas (mm); e,
- A, B, C, D, ..., K, L, M - porcentagens acumuladas (%).

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada de acordo com a NBR 6922 (ABNT, 1981) adaptada, reduzindo-se o volume do recipiente utilizado para 0,021 m³. Para determinação do teor de carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, foi utilizado o carvão vegetal proveniente do ensaio de classificação granulométrica de 19,05 mm, que depois de moído, selecionou-se fração que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60 *mesh*. Posteriormente, tais propriedades foram determinadas de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986), em duplicatas, o carbono fixo foi calculado por diferença.

Análise estatística dos dados

Para a análise estatística descritiva, os valores das propriedades do carvão foram separados de acordo com a dimensão do forno. Para isto, calcularam-se as medidas de tendência central (média aritmética e mediana) e as de dispersão (amplitude e coeficiente de variação), com uso do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017).

Para a interpretação do coeficiente de variação, utilizou-se a classificação de Warrick & Nielsen (1980), que classifica como variabilidade baixa valores menores de 12%, média, entre 12 e 60%; e alta, maiores de 60%.

A análise de componentes principais foi realizada com o objetivo de avaliar as relações entre as propriedades do carvão vegetal, ao serem distinguidos os tipos de forno. Para a realização desta análise, foram retirados os valores referentes aos materiais voláteis do carvão vegetal, uma vez que esta variável é altamente correlacionada com o teor de carbono fixo e cinzas, o que gera problemas de multicolinearidade na matriz de correlação utilizada para a execução da análise.

A análise de componentes principais foi realizada por meio do *software* R versão 3.4.3 (R Core Team, 2017). Selecionaram-se os componentes principais que apresentaram autovalor maior que 1 e que explicaram pelo menos 20% da variabilidade das amostras de carvão vegetal (Andrews et al., 2002; Lobato et al., 2015; Aboyeji & Egbokhan, 2016; Oliveira et al., 2017).

Após a seleção dos componentes principais, produziram-se os gráficos do tipo *biplot*, os quais foram utilizados para facilitar a identificação das relações entre as propriedades do carvão vegetal, além de permitir a visualização da dispersão da matriz de dados (Gabriel, 1971).

As relações entre as propriedades foram identificadas por meio do cosseno do ângulo formado entre os dois vetores. Caso os vetores apresentassem a mesma orientação, ou seja, formassem ângulo menor que 90°, atribuiu-se uma relação positiva. Em contrapartida, se os vetores apresentassem uma orientação oposta, formando um ângulo de 180°, atribuiu-se uma relação negativa (Johnson & Wichern, 2007).

Resultados e Discussão

De acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), os valores de coeficiente de variação das propriedades físicas (granulometria média, teor de finos e densidade a granel) foram considerados médios, para ambos os fornos (Tabela 2).

O coeficiente de variação médio dos valores de granulometria média pode ser atribuído às quebras ocorridas no carvão vegetal causada pela sua natureza friável; seja pelas operações de descarga dos fornos ou formação do estoque (Costa et al., 2017). A granulometria média é um parâmetro do carvão vegetal de grande relevância para a produção de ferro-gusa, pois no alto-forno é necessário que os gases ascendentes percolem a carga de minério, de forma uniforme. Uma adequada granulometria é fundamental para conferir permeabilidade à carga no alto-forno e garantir a eficiência das reações de redução do minério de ferro (Cruz & Barroso, 2007).

Assim como para a granulometria média, a dispersão dos valores do teor de finos observados também pode ser atribuída à natureza friável do carvão vegetal. Logo, quanto maior a movimentação do carvão vegetal, maiores serão as quebras e, conseqüentemente, maior será o teor de finos. O teor de finos se refere à fração residual do carvão vegetal inferior a 9,52 mm, portanto, maiores percentuais implicam em uma maior formação de resíduo por tonelada do carvão vegetal.

Tabela 2. Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal.

Parâmetros	Propriedades do carvão vegetal					
	GM (mm)	TF (%)	DG (kg cm ⁻³)	CF (%)	MV (%)	CZ (%)
Forno I (500 m ³)						
n	75	75	75	75	75	75
Média	33,75	20,75	205,58	73,29	25,21	1,50
Mediana	31,62	20,94	198,40	73,10	25,27	1,47
Mínimo	24,49	2,47	158,79	65,78	18,20	0,87
Máximo	52,25	33,24	321,90	80,08	32,63	2,65
CV (%)	17,51	41,54	18,04	4,57	7,69	25,33
Assimetria	1,14	-0,42	0,97	0,03	-0,04	0,94
Forno II (180 m ³)						
n	45	45	45	45	45	45
Média	31,98	23,79	180,69	71,10	27,67	1,23
Mediana	31,35	25,85	179,99	71,52	27,12	1,16
Mínimo	22,70	5,46	146,40	64,46	24,02	0,76
Máximo	44,95	38,48	259,38	74,49	34,70	2,00
CV (%)	17,98	38,92	12,32	3,33	9,00	24,39
Assimetria	0,51	-0,49	0,88	-0,74	0,76	0,37

n: número de unidades amostrais; GM: Granulometria média; TF: Teor de finos; DG: Densidade a granel; CF: Carbono fixo; MV: Materiais voláteis; CZ: Cinzas.

Ressalta-se que em algumas empresas são utilizadas peneiras de malha de 8 mm para classificar o teor de finos, visando o melhor aproveitamento do carvão vegetal para produção de ferro-gusa. A escolha da fração granulométrica do carvão que irá ser considerada como finos depende de cada empresa. Cada cliente ou consumidor final pode ter demandas específicas quanto à faixa granulométrica determinada como teor de finos, principalmente, pela característica do alto-forno.

O aproveitamento dos finos gerados durante a produção de carvão vegetal é uma prática que contribui positivamente para a sustentabilidade econômica desta atividade. Antes considerado como resíduo, atualmente os finos são utilizados principalmente para a injeção auxiliar nas ventaneiras dos altos-fornos com o objetivo de reduzir o consumo de carvão granulado (Castro et al., 2013). Além disso, o excedente deste subproduto muitas vezes é vendido para empresas produtoras de cimento, cerâmicas e outros produtos para ser utilizado como fonte de calor.

A granulometria do carvão vegetal é associada à densidade a granel do material. Deste modo, o carvão vegetal com menores granulometrias acarreta em uma maior ocupação dos espaços vazios entre as peças de carvão, podendo influenciar diretamente sua densidade a granel, e na redução da permeabilidade no alto-forno. Essa redução da permeabilidade dificulta a passagem dos gases pela carga de carvão vegetal durante o processo de redução do minério. Esse fenômeno pode causar uma série de problemas dentro do alto-forno, e um dos principais é o aumento excessivo da pressão do sistema podendo levar a interrupção do processo para evitar possíveis acidentes.

Para as propriedades químicas do carvão, observa-se um baixo coeficiente de variação para os valores de teor de carbono fixo e materiais voláteis, no entanto, para o teor de cinzas, verificou-se um médio coeficiente de variação.

O teor de carbono fixo e materiais voláteis estão diretamente relacionados ao processo de carbonização, principalmente quanto ao tempo e temperatura final.

Considerado que se utilizou o mesmo controle de processo para todas as carbonizações, esperava-se um baixo coeficiente de variação para estas propriedades químicas do carvão vegetal.

O teor de carbono fixo reflete na utilização volumétrica do alto-forno. Logo, maiores teores de carbono fixo irão resultar em uma menor ocupação volumétrica do alto-forno com carvão vegetal. Assim, uma quantidade maior de espaço restará para o minério a ser reduzido. Contudo, altos teores de carbono fixo estão associados a uma baixa resistência mecânica do carvão, o que não é indicado para o uso siderúrgico (Zanuncio et al., 2015).

Uma ponderação entre o carbono fixo e resistência do carvão vegetal é necessária para que o processo de redução do minério de ferro ocorra de forma otimizada. Valores entre 70 e 75% para essa propriedade são indicados pela literatura como desejáveis para a utilização do carvão vegetal como um termo redutor siderúrgico (Santos et al., 2016; Carneiro et al., 2017).

Os materiais voláteis são responsáveis pela estabilidade da chama e velocidade de queima do carvão vegetal, além de estar relacionado com a permeabilidade de carga de carvão no alto forno (Juizo et al., 2010). Valores desejáveis de teores de materiais voláteis para o uso siderúrgico do carvão vegetal se encontram na faixa de 20 a 25% (Santos et al., 2012).

O teor de cinzas do carvão vegetal, por sua vez, é proporcional ao teor de cinzas da madeira. Assim, considerando que o teor de cinzas da madeira utilizada para as carbonizações foi inferior que 1%, pode-se atribuir as variações obtidas neste trabalho, para o teor de cinzas, à presença de contaminantes no carvão vegetal, principalmente provenientes do piso do forno e do pátio de estoque.

A presença de elevados percentuais de cinzas no carvão vegetal pode causar uma diminuição no seu poder calorífico, desgastes nos altos-fornos, além de prejudicar a qualidade do ferro-gusa, uma vez que podem ocasionar a formação de trincas e fissuras (Pereira et al., 2013).

A medida de assimetria indica as formas e a evolução da distribuição das propriedades do carvão vegetal. Verifica-se que para o teor de carbono fixo e materiais voláteis, provenientes do Forno I, os valores de assimetria foram próximos de zero, o que indica pouco afastamento da sua curva de distribuição em relação à curva normal. Valores de assimetria maiores que 1, em módulo, indicam alto grau de assimetria, como observado, para a granulometria média no Forno I. As demais propriedades apresentaram uma moderada assimetria.

A assimetria observada nos resultados indica a complexidade na produção de carvão vegetal. Dificuldades no controle da carbonização podem acarretar sub ou superaquecimento do forno, o que causa um aumento na variabilidade e assimetria dos dados. Enquanto as movimentações excessivas, sejam durante o processo de descarga ou expedição podem ocasionar quebras no carvão, interferindo nas suas características físicas.

No entanto, é possível, por meio de ajustes operacionais, uma melhor padronização do carvão produzido reduzindo a assimetria dos valores encontrados para as propriedades do carvão vegetal. Dentre estes ajustes, destaca-se a realização de um melhor controle das temperaturas do forno durante a carbonização e dos procedimentos de movimentação do carvão. O uso de termopares acoplados à estrutura do forno, por exemplo, pode auxiliar no controle de temperatura durante a carbonização e na identificação de regiões de temperaturas inadequadas, melhorando a qualidade e homogeneidade do carvão vegetal produzido (Oliveira et al., 2013).

Em relação a Análise de Componentes Principais, foram selecionados componente principal 1 (CP1) e a CP2, para os estoques avaliados, provenientes dos Fornos I e II (Tabela 3).

Observa-se (Figura 5) que independentemente do tipo de forno, foi constatada pela formação de um ângulo de aproximadamente 180° entre os vetores granulometria média e teor de finos, o que indica relação inversa entre as variáveis.

Tabela 3. Estimativa da variância e autovalor associados aos componentes principais.

Componente principal	Forno I (500 m ³)		Forno II (180 m ³)	
	Variância explicada	Autovalor	Variância explicada	Autovalor
CP1	43,0*	2,8**	44,7*	3,3**
CP2	37,5*	1,6**	30,7*	2,1**
CP3	17,9	0,9	16,4	0,6
CP4	1,5	0,6	7,1	0,3
CP5	0,1	0,3	1,1	0,1

* Componente principal que explica pelo menos 20% da variabilidade do estoque. ** Componente principal que apresenta autovalores maior que 1.

A relação inversa entre a granulometria média e o teor de finos pode ser explicada pela Equação 1, em que o aumento da quantidade de carvão retida nas peneiras de menor malha, reduz a granulometria média do carvão vegetal.

Verifica-se a formação de um ângulo menor que 90° entre o teor de finos e a densidade a granel, o que significa uma relação direta entre os dois parâmetros, para ambos os fornos. Assim como mencionado anteriormente, o carvão vegetal de menor tamanho ocupa os espaços vazios entre as peças maiores, diminuindo a permeabilidade da carga dos altos-fornos, acarretando num aumento da pressão interna do sistema.

Em relação ao teor de carbono fixo e cinzas, estas propriedades apresentaram uma relação inversa entre si, para o Forno I, enquanto para o Forno II, esta relação foi direta. Tal relação encontrada para o Forno II é atribuída ao processo de degradação térmica da madeira, em que os materiais voláteis são retirados da madeira na forma de gases condensáveis e não condensáveis, concentrando, dessa forma, o carbono fixo e as cinzas.

A relação inversa entre o teor de carbono fixo e cinzas, observada no Forno I, possivelmente foi causada pelas contaminações do carvão com partículas provenientes do solo. Tais partículas podem ter se misturado ao carvão vegetal na retirada do forno e, ou, na formação do estoque.

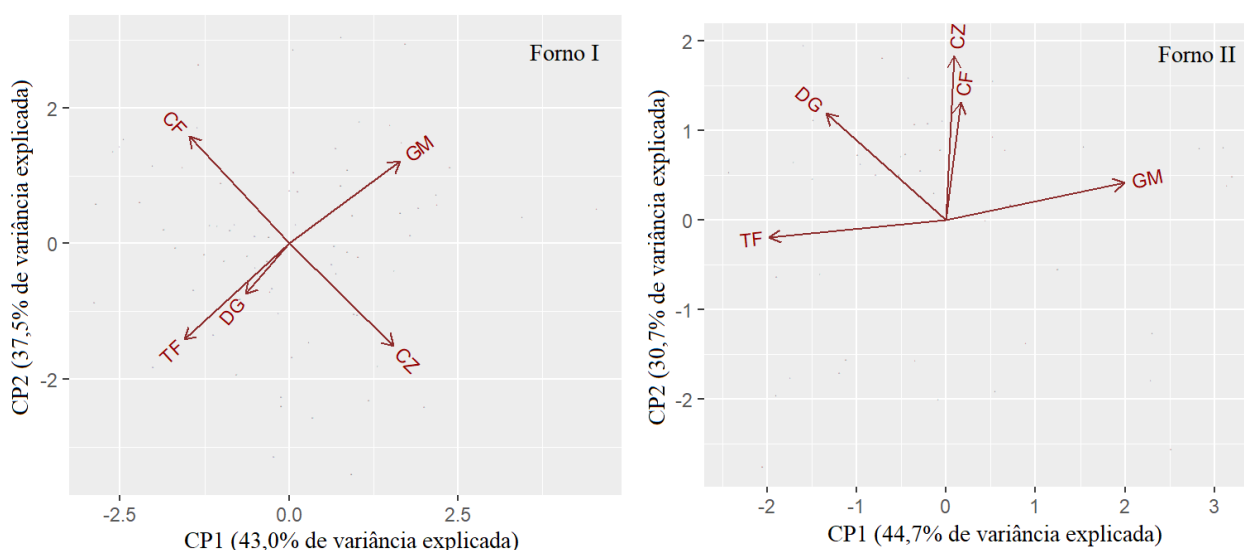


Figura 5. Autovetores das propriedades em relação aos componentes principais CP1 e CP2 para os estoques dos Fornos I e II. GM: Granulometria média; TF: Teor de finos; DG: Densidade a granel; CF: Carbono fixo; MV: Materiais voláteis; CZ: Cinzas.

Além disso, no Forno I, em razão do maior volume de carvão vegetal, ocorre uma maior dificuldade de manejo do carvão, o que pode propiciar presença de contaminantes.

A contaminação do carvão vegetal, ocorre, principalmente, nas atividades de movimentação de carga (descarga e expedição) inadequadas. Como a maioria dos pátios onde estão alocados os estoques de carvão vegetal são desprovidos de pavimentação, durante a movimentação da carga, a terra pode ser levada junto com o carvão vegetal. Portanto, é necessário um contínuo treinamento e supervisão destas operações, além disto, a manutenção adequada das máquinas é uma ação essencial para evitar perdas e contaminações do carvão vegetal.

Conclusões

O carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais apresenta valores de granulometria média, teor de finos, densidade a granel e composição química imediata dentro da faixa indicada para a produção de ferro-gusa.

As propriedades físicas do carvão vegetal (granulometria média, teor de finos e densidade a granel) provenientes do Forno I e II, apresentam, de forma geral, um médio coeficiente de variação e assimetria.

Em fornos retangulares industriais, a granulometria média apresenta uma relação inversa ao teor de finos do carvão vegetal. Além disso, o teor de finos apresenta uma relação direta com a densidade a granel.

A utilização da análise de componentes principais possibilita, por meio da análise exploratória dos dados, a realização de inferências a respeito da qualidade do carvão vegetal em tipos de fornos industriais. Além disto, propicia a observação de possíveis problemas durante o processo de produção, como por exemplo, a existência de contaminantes no carvão de alguns estoques.

Para uma gestão eficiente de uma unidade produtora, tais observações permitem a identificação de problemas ao longo processo produtivo, possibilitando solucioná-los antes que causem grandes prejuízos econômicos, melhorando o controle de qualidade da empresa.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); da empresa Aperam BioEnergia, em especial ao Ézio Vinícius Santos e Edgar de Oliveira; e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Literatura Citada

Aboveji, O.S.; Eigbokhan, S.F. Evaluations of groundwater contamination by leachates around Olusosun open dumpsite in Lago metropolis, southwest Nigeria. *Journal of Environmental Management*, v.183, p.333-341, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.002>.

Andrews, S.S.; Karlen, D.L.; Mitchell, J.P.A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California. *Agricultural Ecosystem Environmental*, v.90, n.1, p.25–45, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8).

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6922: carvão vegetal – Ensaio físico determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro: ABNT, 1981. 2p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 7402: carvão vegetal – Determinação granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3p

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 8112: carvão vegetal – Análise química imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 5p.

Carneiro, A.C.O.; Vital, B.R.; Frederico, P.G.U.; Fialho, L.F.; Figueiró, C.G.; Silva, C.M.S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. *Floresta*, v.46, n.4, p.473–480, 2017. <https://doi.org/10.5380/rev.v46i4.45704>.

Castro, J.A.; Araújo, G.M.; Mota, I.O.; Sasaki, Y.; Yagi, J. Analysis of the combined injection of pulverized coal and charcoal into large blast furnaces. *Journal of Materials Research and Technology*, v.2, n.4, p.308-314, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.06.003>.

Costa, L.J.; Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; Simetti, R.; Bastos, T.A. Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*. *Scientia Forestalis*, v.45, n.116, p.629–639, 2017. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.04>.

Cruz, J.G.; Barroso, R.C. Fabricação de ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal. *Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, 2007. 108p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. FAOSTAT statistics database. 2018. <http://faostat.fao.org>. 10 Fev. 2018.

Gabriel, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, v.58, n.3, p.453-467, 1971. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>.

Johnson, R.A.; Wichern, D.W. *Applied multivariate statistical analysis*. 6.ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 773p.

Juizo, C.G.F.; Lima, M.R.; Silva, D.A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de eucalipto para produção de carvão vegetal. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.12, n.3, p.386-390. 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461>.

Lobato, T.C.; Hauser-Davis, R.A.; Oliveira, T.F.; Silveira, A.M.; Silva, H. A.N.; Saraiva, A.C.F.; Tavares, M.R.M. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation, a case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, v.522, p.674-683, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>.

Oliveira, A.C.; Carneiro, A.C.O.; Pereira, B.L.C.; Vital, B.R.; Carvalho, A.M.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*, v.37, n.3, p.557-566, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>.

Oliveira, F.C.C.; Pedrotti, A.; Felix, A.G.S.; Souza, J.L.S.; Holanda, F.S.R.; Mello, A.V. Características químicas de um Argissolo e a produção de milho verde nos Tabuleiros Costeiros sergipanos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.12, n.3, p.354-360, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5464>.

- Pereira, B.L.C.; Carneiro, A.C.O.; Carvalho, A.M.M.L.; Colodette, J.L.; Oliveira, A.C.; Fontes, M.P.F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources*, v.8, n. 3, p.4574–4592, 2013. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592>.
- R Core Team. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: R Core Team, 2017. <https://www.r-project.org>. 10 Fev. 2019.
- Santos, R.C.; Carneiro, A.C.O.; Trugilho, P.F.; Mendes, L.M.; Carvalho, A.M.L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. *Cerne*, v.18, n.1, p.143-151, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100017>.
- Santos, R.C.; Carneiro, A.C.O.; Vital, B.R.; Castro, R.V.O.; Cidaurre, G.B.; Trugilho, P.F.; Castros, A.F.N.M. Influência das propriedades químicas e da relaçãoiringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, v.26, n.2, p.657-669, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>.
- Santos, S.F.O.M.; Piekarski, C.M.; Ugaya, C.M.L.; Donato, D.B.; Braghini, A.; Francisco, A.C.; Carvalho, A.M.M.L. Life cycle analysis of charcoal production in masonry kilns with and without carbonization process generated gas combustion. *Sustainability*, v.9, n.9, e1558, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9091558>.
- Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais - SINDIFER. Anuário estatístico 2017. Belo Horizonte: SINDIFER, 2018. 25p.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p. 319-344.
- Zanuncio, A.J.V.; Carvalho, A.G.; Silva, E.M.G.C.; Monteiro, T.C.; Lima, J.T.; Silva, J.R.M. Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.10, n.3, p.432-436, 2015. <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i3a3601>.