

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Vanessa de Almeida Lessa Gomes

**ANÁLISE DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM SÃO JOÃO
EVANGELISTA - MG**

São João Evangelista

2024

VANESSA DE ALMEIDA LESSA GOMES

**ANÁLISE DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM SÃO JOÃO
EVANGELISTA - MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais-*Campus* São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientadora: Caroline Junqueira Sartori

G633a Gomes, Vanessa de Almeida Lessa.
Análise de carvão vegetal produzido em São João Evangelista /
Vanessa De Almeida Lessa Gomes – 2024.

34f.: il.

Orientador: Dra. Caroline Junqueira Sartori.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2024.

1. Análise imediata. 2. Heterogeneidade do carvão. 3. Teor de
carbono fixo. I. Gomes, Vanessa de Almeida Lessa. II. Instituto
Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 662.74


Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/MG-003372/P

Vanessa de Almeida Lessa Gomes


ANÁLISE DE CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO EM SÃO JOÃO EVANGELISTA - MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Instituto Federal de Minas Gerais –
Campus São João Evangelista como
exigência parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Florestal.


Aprovado em: 27/02/2024 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 CAROLINE JUNQUEIRA SARTORI
Data: 29/02/2024 15:41:05-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dra. Caroline Junqueira Sartori – IFMG (Orientadora)

Documento assinado digitalmente
 VALERIA SANTOS CAVALCANTE
Data: 29/02/2024 18:36:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dra. Valéria Santos Cavalcante- IFMG

Documento assinado digitalmente
 JACKSON PAULO SILVA SOUZA
Data: 29/02/2024 16:48:44-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Bel. Jackson Paulo Silva Sousa- UFVJM

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças e me tornado valente para chegar até aqui. Aos meus pais Valdeires e Geovane por terem sido apoio e colo nesta jornada tão árdua. Ao Higor meu marido, que sempre acreditou em mim, mesmo quando eu não acreditava. Aos meus amigos queridos, em especial Jackson, Leticia e Thais, pelo companheirismo, incentivo e carinho de sempre durante todo o caminho trilhado.

Agradeço aos meus professores e em especial a minha orientadora Dra. Caroline Junqueira Sartori, por sua paciência, conhecimento, incentivo e carinho nessa jornada, ao professor Dr. Bruno Oliveira Lafetá pelo apoio, sempre a disposição para resoluções de problemas ao longo desses anos e ao funcionário do Laboratório de Tecnologia da madeira, Ricardo, que esteve presente e me ajudando nas análises e metodologia deste trabalho.

Meus mais sinceros agradecimentos ao IFMG-SJE pelas oportunidades e por de certo modo se tornar casa e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Até a maior das árvores um dia foi semente!
Não queira apressar as coisas, tudo tem seu
tempo, seu momento e sua hora.”

(Yla Fernandes)

RESUMO

O carvão vegetal é um material energético proveniente do processo de pirolise lenta da madeira, o qual é largamente empregado na siderurgia. Apesar de ser utilizado há muito tempo, o sistema de produção ainda pode ser rudimentar e o controle da carbonização é feito de forma empírica, como no acompanhamento da coloração da fumaça. A fumaça será um indicativo da pirolise da madeira, no início, a fumaça é branca, indicando maior umidade na madeira, torna-se de uma cor meio encardida de acordo com a perda da água na madeira ao longo do processo, com o tempo de pirolise torna-se azulada o que indica o fim da queima da madeira e a transformação da mesma em carvão vegetal. Além de outras variáveis, pode resultar em um material bastante heterogêneo. A literatura sempre enfatiza esta heterogeneidade do carvão vegetal, mas não é verificado por estudos o quanto é essa variação, o que demonstra a importância deste estudo. Assim o objetivo desse trabalho é verificar a qualidade do carvão vegetal de acordo com sua posição dentro do forno de carbonização, esse produzido por um produtor no município de São João Evangelista- MG. As amostras foram retiradas em diferentes posições no interior do forno (topo, meio, parede lateral e fundo), em três fornos. Foi considerado delineamento inteiramente casualizado, a fim de verificar diferenças entre as posições no interior dos fornos. As propriedades físicas de densidade aparente e densidade relativa foram determinadas. Com relação às propriedades químicas foi realizada análise imediata. As densidades a granel e ponderada médias do carvão vegetal produzido de *Eucalyptus* sp em São João Evangelista, foram de 0,171 e 0,357 g cm⁻³, respectivamente. Não verificou diferença estatística significativa em função da posição no interior do forno de carbonização. Para a análise química imediata também não verificou diferença estatística significativa em função da posição no interior do forno. O valor médio da umidade do carvão vegetal foi de 5,69%, o teor médio de voláteis foi de 12,66%, o rendimento médio em cinzas foi de 0,46% e o teor médio de carbono fixo foi de 81,19%. Nas análises não se identifica diferença significativa, assim podemos considerar que não teve variabilidade, desse modo não foram verificadas variações nas propriedades químicas e físicas de densidade em função da posição no interior do forno, já as análises químicas imediatas estão de acordo com a literatura e são avaliadas como propriedade heterogêneas.

Palavras-chave: Análise imediata. Heterogeneidade do carvão. Teor de carbono fixo

ABSTRACT

Charcoal is an energetic material originating from the slow pyrolysis process of wood, which is widely used in steelmaking. Despite being used for a long time, the production system can still be rudimentary and carbonization control is carried out empirically, such as monitoring the color of the smoke. The smoke will be an indication of the pyrolysis of the wood, at the beginning, the smoke is white, indicating greater humidity in the wood, it becomes a somewhat grimy color according to the loss of water in the wood throughout the process, with the time of pyrolysis turns bluish, which indicates the end of wood burning and its transformation into charcoal. In addition to other variables, it can result in a very heterogeneous material. The literature always emphasizes this heterogeneity of charcoal, but studies have not verified how much this variation is, which demonstrates the importance of this study. Therefore, the objective of this work is to verify the quality of charcoal according to its position within the carbonization furnace, produced by a producer in the municipality of São João Evangelista- MG. The samples were taken from different positions inside the oven (top, middle, side wall and bottom), in three ovens. A completely randomized design was considered, in order to verify differences between the positions inside the ovens. The physical properties of bulk density and relative density were determined. Regarding chemical properties, immediate analysis was carried out. The average bulk and weighted densities of charcoal produced from *Eucalyptus sp* in São João Evangelista were 0.171 and 0.357 g cm⁻³, respectively. There was no statistically significant difference depending on the position inside the carbonization oven. For the immediate chemical analysis, there was also no significant statistical difference depending on the position inside the oven. The average moisture value of charcoal was 5.69%, the average volatile content was 12.66%, the average ash yield was 0.46% and the average fixed carbon content was 81.19 %. In the analyses, no significant difference was identified, so we can consider that there was no variability, therefore, no variation was observed in the chemical and physical properties of density depending on the position inside the oven. The immediate chemical analyzes are in accordance with the literature. and are evaluated as heterogeneous properties.

Keywords: Immediate analysis. Coal heterogeneity. Fixed carbon content

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Carbonização da madeira.....	11
2.2 Fornos de carbonização da madeira	13
2.2.1 Forno do tipo ‘rabo-quente’	13
2.2.2 Forno de encosta	14
2.2.3 Fornos de superfície	15
2.2.4 Forno retangular	16
2.3 Matéria prima e qualidade	17
2.4 Qualidade do carvão Vegetal.....	18
2.4.1 Carbono fixo	19
2.4.2 Teor de Cinzas	20
2.4.3 Materiais Voláteis	20
2.4.4 Umidade	21
2.4.5 Densidade do carvão vegetal	21
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Local de estudo e caracterização da biomassa	22
3.2 Análise do carvão vegetal.....	23
3.4 Análise de dados	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal se destaca dentre as biomassas, como importante fonte para o desenvolvimento sustentável. O carvão vegetal atua como agente redutor do minério de ferro e como fonte energética na indústria siderúrgica de ferro-gusa, aço e ferro-ligas, substituindo o carvão mineral, que já vem sofrendo restrições ecológicas na sua utilização. Além disso, o carvão substitui outros combustíveis fósseis, como é o caso do gás natural ou gás liquefeito de petróleo para o preparo de alimentos (LANA, 2018). O carvão vegetal é um material obtido pelo processo de carbonização ou pirólise da madeira, as quais são provenientes principalmente de árvores cultivadas, e substitui o carvão mineral, de origem fóssil, o que contribui para a redução na emissão de gases de efeito estufa.

A taxa de expansão do Produto Interno Bruto brasileiro (PIB) registrou desaceleração, chegando a apresentar números negativos no último trimestre. O ano encerrou com um crescimento de 2,9%, inferior aos 5% observados em 2021. A diminuição no ritmo de crescimento era em parte antecipada para 2022, considerando que os 5% registrados em 2021 refletiram a recuperação acelerada no período pós-pandemia. A cadeia produtiva florestal reiterou sua resiliência e importância para o Brasil, mantendo sua tendência histórica de crescimento superior ao do PIB nacional. No ano de 2022, o crescimento do valor adicionado ao PIB brasileiro pela cadeia produtiva do setor atingiu 6,3%, impulsionado pelo aumento da receita bruta, que evoluiu de R\$ 244,6 bilhões em 2021 para R\$ 260,0 bilhões em 2022. Em termos correntes, o setor florestal alcançou mais um marco no valor adicionado ao PIB, totalizando R\$ 107,2 bilhões (IBÁ, 2023).

O Brasil lidera o ranking global dos produtores de carvão vegetal, com a total de 7,0 milhões de toneladas produzidas em 2022. Desse total, 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal foram obtidos a partir da madeira de florestas plantadas. De acordo com informações do SINDIFER, o setor de Siderurgia e Aço produziu 7,8 milhões de toneladas de ferro-gusa a partir do carvão vegetal em 2022 (IBÁ, 2023). Entretanto, a maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil, é proveniente de fornos rudimentares, de alvenaria, de baixo rendimento gravimétrico (DONATO *et al.*, 2020). Normalmente esses fornos não possuem nenhum tipo de mecanização e tampouco instrumentos de medição das variáveis importantes do processo, prejudicando tanto o rendimento quanto à qualidade final

do produto. O processo é dependente de seus operadores, pois o controle da carbonização ocorre em acompanhamento da coloração dos gases gerados no processo (OLIVEIRA, 2009). Esses gases são a fumaça gerada no processo de pirolise e será um indicativo, no início, a fumaça é branca, indicando maior umidade na madeira, torna-se de uma cor meio encardida e de acordo com a perda da água na madeira ao longo do processo, com o tempo de pirolise a fumaça torna-se azulada. O processo ocorre 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 (DONATO, et al., 2020).

De maneira geral, a falta de investimento para o progresso da produção de carvão vegetal pode ser creditada a sua desvalorização como fonte energética, a escassez de políticas públicas efetivas para o setor, aos estigmas advindos das produções mais primitivas e ao baixo valor agregado do carvão vegetal, sensível demais às intempéries do mercado nacional e global. Estes fatos acabam por desestabilizar economicamente o setor, suprimindo a constância de propósito para o desenvolvimento e melhoria das tecnologias (LANA, 2018) e como consequência melhorias do produto final.

O conhecimento da composição química do carvão vegetal é crucial para estimar a qualidade e, assim, controlar as características do processo que é empregado, uma vez que cada aplicação exige características específicas. Para determinar sua composição química é realizada, entre outros, as análises imediatas. Essa análise ajuda a quantificar constituintes como carbono fixo, matéria volátil e cinzas (LANA et al., 2016).

Na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo, segundo Carneiro et al. (2014) o carbono fixo é o principal responsável pela energia estocada no carvão. As cinzas são os componentes minerais que sobram da degradação dos constituintes da madeira e das cascas, e por sua vez, podem ser prejudiciais no processo siderúrgico de determinados metais (VITAL et al., 1986). O teor de materiais voláteis determina a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade de combustão. Um alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão (RIBEIRO, VALE, 2006; ARANTES, 2009).

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, e neste contexto, o estado de Minas Gerais apresenta grande destaque, por possuir uma maior área de floresta plantada de *Eucalyptus* spp. destinada a produção de carvão, bem como por possuir o maior polo de produção de aço do Brasil. Segundo dados do IBA, em 2020 a principal região de consumo de carvão vegetal é a Sudeste, com destaque para Minas

Gerais, que utiliza 45,8% do total.

O setor sofreu grandes avanços, como grandes fornos de carbonização, fornalhas para queima dos gases provenientes do processo, pelas grandes empresas. Porém, além das grandes empresas produtoras de carvão vegetal, grande quantidade é produzida por produtores rurais, sendo importante fonte de renda para muitas famílias na região, e tal produção é ainda feita de forma mais rudimentar, em fornos de alvenaria e com controle empírico da carbonização. Os gases provenientes da carbonização são liberados ao ar, e o controle do processo é feito em acompanhamento da coloração da fumaça liberada. Quando a matéria prima é enfiada, esta deve ser a mais homogênea possível umidade, espécie, idade, densidade e diâmetros são algumas das características que devem ser padronizadas. Características do processo como temperatura final da carbonização, taxa de aumento da temperatura, são variáveis que também irão influenciar na qualidade do produto final. Por estas características, somado às variações das temperaturas ao longo dos fornos, o carvão vegetal é tido como um material muito heterogêneo.

A literatura sempre enfatiza esta heterogeneidade do carvão vegetal, mas não é verificado por estudos o quanto é essa variação, o que demonstra a importância deste estudo. Assim o objetivo desse trabalho é verificar a qualidade do carvão vegetal de acordo com sua posição dentro do forno de carbonização, esse produzido por um produtor no município de São João Evangelista- MG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carbonização da madeira

Para Vale e Gentil (2008), a carbonização é um processo de decomposição térmica físico- química irreversível, cujo objetivo principal é eliminar a maior parte do oxigênio, possibilitando uma concentração de carbono na estrutura residual. Na madeira, sua transformação em carvão vegetal se inicia com a secagem, perda de água livre ou capilar e água de adesão. Após a secagem, inicia-se a fase de pirólise, com a ocorrência da decomposição térmica das hemiceluloses, celulose e lignina, momento em que ocorre produção de gases condensáveis e não condensáveis.

A produção de carvão vegetal ocorre em ambientes fechados, com condições controladas de oxigênio, aplicando-se calor à madeira para sua destilação e para o

desdobramento de seus constituintes em gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, entre outros), líquido (alcatrões, ácido acético, álcool metílico, entre outros) e sólido, o carvão vegetal (REZENDE, 2006).

A subjetividade empregada no controle do processo de carbonização da madeira pela experiência do operador, também chamado de carbonizador, e os variados formatos e tamanhos dos fornos tornam o processo irregular e de difícil controle, culminando em baixo rendimento. Nesses fornos rudimentares de alvenaria não existe a possibilidade de mecanização e de controle das emissões, sendo eles adotados pelos pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 80% da produção total de carvão (OLIVEIRA, 2009).

Yang *et al.* (2007), ao estudarem a degradação térmica dos principais componentes da madeira durante o processo de pirólise, verificaram que as hemiceluloses são mais facilmente degradadas entre 220 e 315°C, com a maior perda de massa em 268°C. A celulose degrada-se em temperaturas mais elevadas, 315-400°C, e em 355°C ocorre a maior degradação térmica. Segundo os autores, em relação aos três componentes da madeira, a lignina possui a decomposição térmica mais difícil, ocorrendo de 160-900°C, com pouca perda de massa, sendo o principal responsável pelo resíduo sólido gerado pelo processo de pirólise.

Segundo Rezende (2006), o processo de carbonização da madeira de eucalipto ocorre em quatro fases, divididas por intervalos de temperaturas, ou seja; até 110°C ocorre a secagem, entre 110°C e 250°C há a torrefação, de 250°C e 350°C acontece a carbonização e a partir dos 350°C a fixação de carbono. Na secagem, há liberação de água livre e de adesão. Na torrefação, inicia-se a liberação da água de constituição pela decomposição das hemiceluloses e celulose. Durante a carbonização, há intensificação da decomposição das hemiceluloses e celulose ocorrendo expressiva perda de massa. Finalmente, na fixação, ocorre redução gradual na liberação dos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

Em temperaturas maiores que 400°C, as ligações químicas presentes na lignina são rompidas, mas as perdas de massa para a lignina não ultrapassam 60%, sendo este constituinte o responsável pela maior parte do carvão vegetal (SOARES, 2011). De acordo com Yang *et al.* (2007), a degradação térmica da lignina é exotérmica a partir de 200°C e os principais gases gerados são CO₂, H₂ e CH₄.

2.2 Fornos de carbonização da madeira

Apesar da grande utilização do carvão vegetal pelo setor siderúrgico brasileiro, o sistema de transformação ainda é arcaico e rudimentar, tendo o seu rendimento e qualidade, bem como a produtividade dos fornos, dependente de fatores inerentes a madeira e aos processos de carbonização, dentre os quais se destacam a umidade da madeira, rusticidade dos fornos, instrumentação para controle da carbonização, emissões de poluentes e longos períodos de resfriamento dos fornos (SANTOS, 2013).

A produção de carvão vegetal, entretanto, ainda enfrenta inúmeras dificuldades a serem superadas. Dentre as adversidades, destacam-se: carência de mão de obra qualificada com conhecimento técnico, desarraigado do processo tradicional subjetivo a experiência prática do carbonizador; dificuldade de adequação das características da matéria-prima utilizada, como alta umidade e variação das dimensões; influência das variáveis ambientais como a temperatura e umidade relativa do ar, que dificultam uma produção mais homogênea; a falta de controle do processo de conversão que, associados aos demais fatores, culminam em baixo rendimento e baixa qualidade do produto (LANA, 2018).

Segundo Oliveira (2009), os pequenos e médios produtores utilizam fornos de diferentes formatos para produção de carvão vegetal, destacando-se os fornos do tipo “rabo-quente”, superfície e encosta, que são fornos de alvenaria. As formas e os tamanhos distintos fazem com que o processo seja irregular, de baixo rendimento e dependente diretamente da experiência do operador, devido à inexistência de instrumentos para medição das variáveis do processo. Nestes fornos não existe a possibilidade de mecanização e o controle das emissões atmosféricas, pois se existisse seria oneroso.

2.2.1 Forno do tipo “rabo-quente”

O forno rabo-quente é construído, utilizando-se apenas tijolos de barro cozido e argamassa de barro e areia. A argamassa utilizada é uma mistura de terra, areia e água em quantidades que produzam um barro fácil de trabalhar. A mistura de areia tem o objetivo de reduzir as trincas que aparecem no forno durante as carbonizações. A operação do forno compreende o seu carregamento, isto é, a colocação da lenha em seu interior, a carbonização e a descarga do carvão produzido segundo Marri *et al.* (1982).

A utilização de lenhas é fundamental para que se tenha uma boa carbonização, pois o teor de umidade da lenha influi diretamente no rendimento do forno. Depois de carregado o forno, procede-se ao fechamento da porta e ao acendimento. Este é realizado

colocando-se na abertura deixado na parte superior da porta, materiais que pegam fogo com facilidade, tais como, tiços ou gravetos. No início da combustão, a fumaça sai pela própria abertura de acendimento e é de cor esbranquiçada. Quando a fumaça torna-se escura é sinal que a combustão está sucedendo, e neste momento pode-se completar o fechamento da porta.

Depois de fechado o orifício de acendimento, a fumaça começará a sair pelas “baianas”. No início, a fumaça é branca ou de uma cor meio encardida, tornando-se azulada com o tempo. Quando a fumaça torna-se azulada significa que a carbonização, ou frente de carbonização, já atingiu aquele ponto e a baiana deve ser fechada. Como a frente de carbonização não atinge todas as baianas ao mesmo tempo, elas serão fechadas em momentos diferentes. Diversos fatores podem contribuir em maior ou menor grau, para o desenvolvimento não uniforme da carbonização. Entre outros podem ser mencionados carregamento mal feito do forno, a lenha não uniforme, tanto em termos de tamanho quanto em termos de umidade, e as condições climáticas como ventos fortes e chuvas. Todos esses fatores devem ser contrabalançados por uma vigilância constante do forno (OLIVEIRA 2012). Para o descarregamento do forno, a temperatura ideal é de mais ou menos 60°C. Não se deve abrir um forno que não esteja suficientemente frio, pois a entrada de ar pode provocar o incêndio do carvão. O tempo ideal decorrido de um forno é de sete dias, desde o acendimento do fogo até a retirada do carvão. São três dias para carbonizar, três dias para esfriar e um dia para descarregar e encher o forno (OLIVEIRA, 2012).

2.2.2 Forno de encosta

O forno de encosta é bastante utilizado nas regiões de topografia acidentada, com diâmetro variando de 3 a 4 m e altura entre 2,5 a 2,8 m, podendo ter de uma a três chaminés. Para sua construção aproveita-se o desnível natural do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado na construção. Para condução da carbonização, as entradas de ar são posicionadas na cúpula (MENDES *et al.*, 1982).

Segundo Baer Filho (2008), os fornos de encosta atingem 32% de rendimento gravimétrico em carvão vegetal. O autor afirma que o elevado rendimento ocorre porque a maior parte do forno está em contato direto com o solo, havendo menores perdas térmicas para o ambiente, o que aumenta a eficiência da carbonização. No entanto, aumenta o ciclo de produção devido ao resfriamento ocorrer mais lentamente. O controle da carbonização no

forno de encosta baseia-se na quantidade e coloração dos gases emitidos pelas chaminés, idem ao forno do tipo rabo-quente. A frente de carbonização desenvolve-se de maneira desuniforme. Assim, é possível que o aspecto dos gases em cada uma das chaminés não seja semelhante. O ciclo de carbonização tem duração de cinco a nove dias (MENDES *et al.*, 1982).

2.2.3 Fornos de superfície

Os fornos de superfície apresentam estruturas semelhante a do forno “rabo-quente”, tendo como inovação a presença de uma chaminé lateral com tiragem central dos gases gerados durante a carbonização da madeira, melhorando as condições térmicas e o fluxo de gases no interior do forno (ASSIS, 2007).

O diâmetro central pode variar de 3 a 8 m, sendo o de 5 m o mais comum; a altura central varia de 2,3 a 5 m. As entradas de ar encontram-se na parede e na cúpula do forno, ao longo de toda circunferência (ARRUDA, 2005). Em virtude de suas características construtivas, os fornos de superfície apresentam melhores condições para propagação da carbonização, que ocorre de maneira mais homogênea devido ao maior controle do operador.

De acordo Mendes *etal.*(1982), a operação nesses fornos é mais simples, pois os gases são expelidos somente pela chaminé e o acompanhamento do processo de carbonização pode ser avaliado pela temperatura externa e inspeção visual das aberturas para entrada de oxigênio.

O forno de superfície apresenta rendimento gravimétrico variável de 28 a 34% (CARNEIRO *et al.*, 2011). Diversas alterações no forno de superfície foram realizadas como intuito de melhorar o processo de produção de carvão vegetal, modificando o posicionamento e sua construção aproveita-se o desnível natural do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado na construção. Para condução da carbonização, as entradas de ar são posicionadas na cúpula (MENDES *et al.*, 1982).

Segundo Baer Filho (2008), os fornos de encosta atingem 32% de rendimento gravimétrico em carvão vegetal. O autor afirma que o elevado rendimento ocorre porque a maior parte do forno está em contato direto com o solo, havendo menores perdas térmicas para o ambiente, o que aumenta a eficiência da carbonização. No entanto, aumenta o ciclo

de produção devido ao resfriamento ocorrer mais lentamente.

O controle da carbonização no forno de encosta baseia-se na quantidade e coloração dos gases emitidos pelas chaminés, idem ao forno do tipo rabo-quente. A frente de carbonização desenvolve-se de maneira desuniforme. Assim, é possível que o aspecto dos gases em cada uma das chaminés não seja semelhante. O ciclo de carbonização tem duração de cinco a nove dias (MENDES *et al.*, 1982).

2.2.4 Forno retangular

Visando aumentar a produtividade e obter um produto com maior qualidade, os grandes produtores de carvão vegetal investiram na construção de fornos com grande capacidade volumétrica. As operações de carregamento e descarregamento são mecanizadas. Além disso, é possível a recuperação ou queima dos gases gerados durante a carbonização. O comprimento padrão do forno retangular com câmaras externas é de 13,10 m, 3,95 m de largura e 3,5 m de altura, a produção varia entre 65 e 72 m³ de carvão ZUCHI (2001). As duas câmaras de combustão externa são construídas em alvenaria e localizadas na parte externa do forno. As câmaras interligam-se com a parte interna do forno, através de canais, onde os gases aquecidos circulam, promovendo a carbonização (ARRUDA, 2005). Segundo Oliveira (2010), a maioria das indústrias produtoras de carvão vegetal em grande escala, utilizam os fornos retangulares de alvenaria.

Arruda (2005) ressalta que nesse tipo de forno o controle da entrada de oxigênio para o processo de carbonização pode ser realizado através de abertura de controle da entrada de ar ou câmara de combustão externa, construída sem alvenaria na parte externa do forno, que são interligadas através de canais, onde os gases aquecidos circulam, promovendo a transformação da madeira em carvão vegetal.

O ciclo completo de carbonização nos fornos retangulares tem duração média de 12 dias, incluindo as etapas de carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do carvão e descarga, sendo normalmente quatro dias para carbonizar a madeira e oito dias para o resfriamento do forno (FÁVERO *et al.*, 2007). Mas isso pode variar de acordo com o tamanho e capacidade do forno. Segundo Oliveira, 2012, a carbonização não ocorre de maneira uniforme, devido às dimensões e características geométricas do forno.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal desses fornos varia de 30 a 35%. Para aumentar a eficiência da carbonização, as empresas têm adotado o monitoramento da temperatura interna dos fornos. Segundo Arruda (2005), o monitoramento térmico, seja

através de termopares ou de leitura da temperatura em vários pontos utilizando um medidor infravermelho, permite melhor controle da carbonização. De acordo com Oliveira (2009), a utilização de um sistema supervisor de monitoramento de temperatura em fornos retangulares auxiliou na identificação e correção de desvios no processo de produção em tempo real, diminuindo as falhas operacionais. Nas carbonizações controladas como auxílio de sensores de temperatura no interior do forno, o rendimento gravimétrico eleva-se, aumentando a produtividade dos fornos, além de resultarem produção de carvão vegetal mais homogêneo em termos de qualidade.

Para melhorar o processo de carbonização, além da adoção de mecanismos de controle da temperatura do forno, diversos sistemas (trocadores de calor) estão sendo desenvolvidos para reduzir seu tempo de resfriamento e conseqüentemente elevar a produtividade dos fornos, permitindo maior número de carbonizações para um mesmo período (OLIVEIRA 2012).

2.3 Matéria prima e qualidade

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 (DONATO et al., 2020).

Nota-se que, 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, bem como o tipo de forno empregado (RAAD, 2004). A madeira usada no processo de carbonização, geralmente apresenta umidade (U_b)

de aproximadamente 100% após o corte e dependendo da espécie pode chegar a 150%. Armazenadas ao ar livre (a campo) e dependendo das condições climáticas locais, as toras empilhadas atingem umidade (U_b) de aproximadamente 30-40 % em 90 a 180 dias. Depois da etapa de secagem a campo, a madeira é transportada para as praças de carbonização e em fornos de alvenaria, o processo de carbonização é iniciado (SANTOS, 2013).

De acordo com Neves *et al.* (2011), características como o incremento volumétrico da árvore podem influenciar significativamente a produção e qualidade do carvão, visto que afetam diretamente a quantidade de massa seca produzida pelo indivíduo. Do mesmo modo, a qualidade e a quantidade do carvão vegetal sofrerão significativa modificação em relação à madeira de origem, pois esse produto está intimamente relacionado com as características químicas, anatômicas e físicas da madeira (TRUGILHO *et al.*, 2005).

A densidade básica da madeira constitui-se em uma das mais importantes características para identificar espécies produtoras de carvão de boa qualidade. Esta propriedade física é obtida a partir da relação entre massa absolutamente seca da madeira e o volume saturado, sendo expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 (SANTOS, 2010). Ressalva-se que a densidade da madeira é uma propriedade que afeta a capacidade de produção das plantas de carbonização, ou seja, é responsável por armazenar maior energia por unidade de volume, reduzir os custos de colheita e transporte em função do menor volume, aumentar a capacidade de produção dos fornos e reduzir a demanda por mão-de-obra (CARNEIRO, 2013). Santos (1987) afirma que o *Eucalyptus* é uma das melhores opções para a produção de carvão, em função da sua rusticidade, produtividade e características da madeira. Mora e Garcia (2000) também destacam as características silviculturais e físico-químicas da madeira desse gênero, salientando que essa matéria-prima tem sido amplamente utilizada para a produção de lenha e carvão vegetal. Quando planejados e manejados de forma adequada, os reflorestamentos de *Eucalyptus* produzem árvores de tronco retilíneo e uniformes e madeira com massa específica adequada para a obtenção de carvão de boa qualidade (PINHEIRO *et al.*, 2006).

2.4 Qualidade do carvão Vegetal

Dada as funções que o carvão vegetal exerce no alto forno de redução de minério, a sua qualidade exerce uma significativa influência na produtividade do aparelho. Pode-se afirmar que a maior parte das exigências para a definição dessa qualidade estão razoavelmente definidas. A própria experiência adquirida por várias décadas de uso desse produto, associada às comparações que podem ser efetuadas com o coque mineral permitem tal referência. Tais exigências estão definidas através do conhecimento de características físicas e químicas do carvão vegetal (OLIVEIRA, 2012).

Pode-se afirmar que as características físicas mais importantes para a operação

do alto forno são a granulometria, densidade e a resistência mecânica, esta última implicando diretamente sobre a friabilidade do carvão vegetal. A granulometria é um fator básico na permeabilidade da carga dentro do alto-forno. Há indicações de que o calibre médio do carvão deve ser o triplo do minério para permitir a máxima vazão de gases sem perigo no reductor. Nos altos-fornos de maiores portes, para se assegurar uma melhor preparação da carga, o tamanho médio do carvão vegetal nele utilizado deve ser maior do que o utilizado em fornos pequenos (ASSIS *et al*, 1982 e MATOS, 1976).

A densidade do carvão vegetal é um fator que tem sido destacado como estando diretamente relacionado com a produtividade do alto-forno. Aqui também se conhece muito bem suas influências, destacando-se, sobretudo o fato de que a operação com carvão mais denso implica em maiores tempos de residência da carga metálica no interior da zona de reserva térmica do alto-forno. Uma consequência direta é a de que, para um mesmo tipo de carga metálica e granulometria menores consumos de carbono são normalmente obtidos. Portanto, não havendo prejuízo às outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível (ABM, 1975).

A resistência mecânica do carvão vegetal é outra característica de suma importância para seu emprego na siderurgia e, dentro desta característica, o ponto a merecer maior destaque é a sua friabilidade (BARCELLOS, 2002).

Segundo Barcellos 2002, dentre as características químicas mais importantes implicadas com a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico têm sido destacadas a umidade, a composição química e a reatividade.

A análise imediata do carvão vegetal fornece informações da qualidade da biomassa para fins energéticos. Basicamente a análise é a determinação dos teores de umidade, de cinzas, materiais voláteis e de carbono fixo (BARBOSA, 2014). A importância dessas características é saber como o carvão reagirá no processo de queima, para gerar energia.

2.4.1 Carbono fixo

A percentagem de carbono é uma das taxas resultantes da análise imediata, consistindo na quantidade de carbono presente no carvão é o que determina como carbono fixo. O carbono fixo está diretamente relacionado com o poder calorífico do carvão, podendo ser considerada uma das características químicas de maior influência (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

Além disso, segundo Lima *et al.* (2007) o teor de carbono fixo indica o grau de pureza do carvão. De acordo com Brito (1993), o carbono fixo depende da carbonização da madeira e do teor de lignina na madeira. Mendes *et al.* (1982) salientam que, a temperatura final de carbonização é o principal parâmetro que influencia os teores de carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal. Em trabalho desenvolvido pelos autores, temperatura em torno de 700° C, obteve-se melhor concentração de carbono fixo.

Elyounssi *et al.* (2010) relataram que o rendimento em carbono fixo aumenta até certa temperatura e, após atingir o ponto máximo, começa a diminuir. O rendimento máximo em carbono fixo encontrado corresponde a rendimentos em carvão vegetal é de aproximadamente 40% a 50%.

Variações no rendimento em carvão vegetal e carbono fixo são comuns e opostas. A perda de massa da fração sólida é compensada pelo aumento no teor de carbono fixo (ELYOUNSSI *et al.*, 2010).

2.4.2 Teor de Cinzas

Cinzas são resíduos minerais, resultantes da queima completa da madeira e é outro parâmetro que é estudado pela análise imediata. A quantidade de cinzas presentes no carvão é o que se define como teor de cinzas presente no carvão, este valor é dado em porcentagem e quanto maior o resíduo de cinzas, maior será o teor de cinzas de um material (MAPA, 2014). Segundo Paes *et al.* (2012), o baixo teor de cinzas pode conferir boas características energéticas ao carvão e altos teores de cinzas podem prejudicar produtos metalúrgicos (BARCELLOS, 2007).

Santos (2008) relata que para uso siderúrgico o carvão deve ter menos de 1% de teor de cinzas e que altos teores de cinza não são favoráveis para a siderurgia.

2.4.3 Materiais Voláteis

Os materiais voláteis representam a matéria volátil residual do carvão composta principalmente de hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (SANTOS, 2010). Os fatores que influenciam os voláteis no carvão são a temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira. Sendo a temperatura o que mais influencia os teores de voláteis (CARMO, 1988).

Rosa (2012) salienta que o teor de voláteis presentes no carvão vegetal exerce

influência direta em seu poder calorífico. Assim, como o aumento da temperatura de carbonização provoca a redução dos materiais voláteis no carvão, conseqüentemente do hidrogênio presente em sua estrutura, ocorre uma redução no poder calorífico e na facilidade de ignição. Neste sentido, Lana et al (2016) menciona que o teor de materiais voláteis determinando a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade de combustão. No entanto, carvões com baixo teor de materiais voláteis queimam de forma mais limpa, sem geração de fumaça (KURAUCHI, 2014).

2.4.4 Umidade

O carvão vegetal é altamente higroscópico essa propriedade que certos materiais têm de absorver água. A água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno e provoca perda de calor, aumentando o consumo específico de carbono e diminuindo a resistência do carvão vegetal (MORAIS, 2005) e, particularmente, para os sistemas de injeção, induz a entupimento dos vasos de transporte de carvão pulverizado para as ventaneiras.

De acordo com Rousset et al (2011) a umidade diminui o rendimento gravimétrico, uma vez que, parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor e isso diminui o poder calorífico do material lenhoso e aumenta a friabilidade do carvão.

2.4.6 Densidade do carvão vegetal

A massa contida de um dado material em uma unidade de volume é expressa em kg de carvão/m³ ou kg de carbono/m³ corresponde fator importante para o alto-forno, influenciando diretamente no volume disponível do alto-forno para a carga metálica, implicando assim, a produtividade (MORAIS, 2005).

O carvão vegetal requer como característica fundamental a densidade da madeira. A densidade é uma propriedade bastante importante, pois, segundo Gomes e Oliveira (1980), ela determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno. Segundo estes mesmos autores, não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível. A determinação da densidade do carvão vegetal, portanto, é uma prática

recomendada sob o aspecto da utilização industrial. Um dos métodos para se expressar a densidade do carvão vegetal, consiste em se determinar o peso do carvão contido em uma caixa com volume de 1m³, a relação entre o peso obtido e o volume é denominada densidade a granel. A densidade a granel fornece o grau de compactação de um material em relação a outro (GARCIA et al., 2013). Normalmente, esse valor gira em torno de 300kg/m³ para o carvão vegetal. Se, a partir dessa medida de volume, diminuir-se o volume dos vazios existentes entre os vários pedaços de carvão, sem considerar que os poros internos estão ocupados por ar, ter-se-á a chamada densidade aparente. A densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente descontando-se o volume da porosidade interna. Desse modo, relacionando-se a densidade verdadeira com a aparente, ter-se-á a medida da porosidade do carvão (PENEDO, 1980).

Dentre as diferentes densidades citadas, em termos práticos de operação com aparelhos de redução, a mais importante é, sem dúvida, a densidade a granel, pois, esta determina o espaço útil a ser ocupado naqueles aparelhos (BARCELLOS, 2002).

3. METODOLOGIA

3.1 Local de estudo e caracterização da biomassa

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados carvão vegetal, proveniente de um produtor com plantios e fornos localizados no município de São João Evangelista, Minas Gerais, sudeste do Brasil (Latitude: 18°32'46" Sul; Longitude: 42°45'35" Oeste). O produtor utiliza madeira de *Eucalyptus* sp, com cerca de 6 anos, e o sistema utilizado para a carbonização são fornos do tipo de encosta.

Foram coletadas cerca de 500 gramas de amostras do carvão vegetal de três fornos diferentes, em quatro posições no interior do forno, que correspondem ao topo do forno (próximo ao local onde é feito o acendimento do forno), meio do forno, fundo do forno (mais próximo ao chão) e parede do forno.

3.2 Análise do carvão vegetal

Foi determinada a densidade a granel do carvão vegetal com emprego de

uma caixa de aproximadamente 3000 cm³, onde a mesma foi preenchida de carvão, determinando-se amassa em uma balança de precisão. A densidade a granel foi obtida com a relação entre a massade carvão contida na caixa e seu volume. Os carvões produzidos foram caracterizados por meio da determinação da densidade aparente segundo o método hidrostático e das descrições da norma NBR 9165 (ABNT, 1985).

Para as análises químicas imediatas, de umidade, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas as amostras foram moídas em moinho Wiley, e passadas em peneiras de 40 e 60 *mesh*, e utilizadas as amostras retidas na peneira de 60 *mesh*. Para a determinação da umidade dos carvões, foram utilizados cerca de 1,0 g do carvão, em balança de precisão de 0,0001g, em cadinhos de porcelana previamente secos e tarados. Os cadinhos com carvão foram levados à estufa regulada a 102 ± 3 °C, por um período de 2 horas. Logo após, foram retirados da estufa e armazenados em dessecador por cerca de 20 minutos para esfriar, e a massa seca (Mf) foi obtida para a determinação da umidade em base úmida (Ubu).

Para a determinação dos materiais voláteis, foram utilizados o material (particulado e seco na determinação da umidade). Assim levados a mufla previamente aquecida e estabilizada a 950 °C. Primeiramente os cadinhos, tampados, foram colocados na extremidade externa da mufla sobre a porta, onde ficaram por dois minutos.

Depois estes foram colocados na entrada da mufla ainda com a porta aberta por mais três minutos, para que os mesmos passem por um pré-aquecimento. Feito isso, estes foram colocados no interior da mufla por seis minutos, com a porta fechada. Após esse período os cadinhos tampados foram retirados da mufla, e estes foram levados ao dessecador por aproximadamente 30 minutos para esfriar a temperatura ambiente. Depois de esfriados, os materiais foram pesados, obtendo-se então a massa de material seco sem a presença de materiais voláteis (Mms). O teor de materiais voláteis do carvão vegetal foi calculado pela Equação a seguir:

$$TMv = \frac{Mf - Mms}{Mf} * 100$$

TMV: teor de materiais voláteis em

Mf: massa da amostra seca em estufa (g); e

Mms: massa da amostra após o tratamento a 950°C (g).

Para a determinação do teor de cinzas, o material da análise anterior foi levado novamente a mufla para incineração total à temperatura de 750°C por 6 horas, sem a tampa do cadinho. Terminada a incineração, foram armazenados em dessecador por aproximadamente 30 minutos para posterior pesagem e obtenção da massa residual inorgânica (Mr). O teor de cinzas do carvão vegetal foi calculado pela Equação a seguir:

$$TCz = \frac{Mr}{Mf} * 100$$

TCz: Teor de cinzas em % ;

Mf: Massa da amostra seca em estufa (g);

Mr: Massa do resíduo após a incineração da matéria orgânica.

A determinação do teor de carbono fixo (TCF) é uma medida indireta, obtida através do cálculo da Equação (4) utilizando os parâmetros previamente determinados.

$$TCF = 100 - Ubu - TMV - TCz$$

Para a determinação do Poder Calorífico Superior (PSF), os carvões moídos e peneirados, foram secos em estufa com circulação forçada de ar a 102 ±2°C. Utilizou-se aproximadamente 0,3 g de amostra moída e seca para a determinação do poder calorífico. As amostras foram analisadas em Calorímetro digital IKA C 200.

3.3 Análise de dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Atendidas as pressuposições, a análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente casualizado, com variáveis respostas representadas pelo tipo de material coletado. Foi realizado o teste de Tukey para comparação múltipla das médias, a 95% de probabilidade, com emprego do *software* SISVAR. Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, estão apresentados os valores médios encontrados de densidade a granel e densidade aparente do carvão vegetal em diferentes posições, bem como os respectivos coeficientes de variação das variáveis entre os fornos.

Tabela 1 – Densidade a granel e densidade aparente do carvão vegetal nas diferentes posições do forno

	Densidade agranel ^{ns}		Densidade aparente ^{ns}	
	Média	CV	Média	CV
Topo	0,161	13,45	0,340	23,98
Meio	0,176	9,86	0,368	16,49
Fundo	0,176	10,06	0,365	22,65
Parede	0,170	10,85	0,355	14,01

^{ns} : não significativo a 5% de significância

A densidade agranel e densidade aparente, não foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre as posições nos fornos, pelo teste Tukey a 5% de significância. A densidade a granel teve valor médio de 0,161; 0,176; 0,176; 0,170 g cm⁻³ para as posições topo, meio, fundo e parede do forno, respectivamente. Enquanto, a densidade aparente foi de 0,340; 0,368; 0,365; 0,355 g cm⁻³ para as posições topo, meio, fundo e parede do forno respectivamente.

Porém verifica-se que menores valores das densidades são verificados no topo dos fornos, que foram em média de 0,161 e 0,340 g/cm³ para as densidades a granel e densidade aparente respectivamente. Importante destacar que nos fornos desta pesquisa, o acendimento é realizado pelo topo, desta forma pode-se consumir maior quantidade de madeira no local, resultando em perdas de massa.

A média da densidade a granel foi de 0,171 g/cm³. Verificou-se que a densidade aparente média foi de 0,357 g/cm³. Maiores valores de coeficiente de variação foram verificados para a densidade aparente.

Em estudo realizado por Pereira (2016), a densidade aparente do carvão de *Eucalyptus* sp obteve medias entre 0,361 g/cm³ e 0,405 g/cm³, valores estes dentro do intervalo encontrado nesta pesquisa. Em estudo realizado por Brito *et al.*(1982), a

densidade aparente do carvão obteve médias entre 0,242 g/cm³ e 0,317 g/cm³, valores estes inferiores ao verificado nesta pesquisa no mesmo estudo, o autor obteve densidade a granel do carvão variando entre 0,186 g/cm³ e 0,195 g/cm³, superiores ao verificado nesta pesquisa. O fato de a densidade a granel ter sido inferior pode ser devido às dimensões das amostras, provavelmente em maiores dimensões, resultando em maior quantidade de espaços vazios, e conseqüentemente uma menor massa.

Segundo Froehlichet al (2014), a densidade do carvão está diretamente relacionada à resistência mecânica do mesmo e influencia aspectos operacionais e produtivos no uso do produto. Uma densidade maior do carvão resulta em custos menores de transporte e armazenamento, além de induzir ao melhor aproveitamento no alto-forno siderúrgico, o que aumenta a produtividade em um determinado período de tempo. Além de que madeiras com densidades mais elevadas produzem carvão com maior densidade aparente.

Segundo o mesmo autor, a umidade da madeira utilizada na carbonização do carvão tem um efeito significativo nas características do carvão resultante.

Quando a madeira contém alta umidade, durante o processo de carbonização, a água presente na madeira é transformada em vapor. Essa conversão gera pressão interna no carvão em formação, causando fissuras e rachaduras. Isso significa que o carvão resultante será mais quebradiço e frágil.

Esses valores são considerados baixos quando comparados com Santos (2008) que encontrou 200 kg/m³ para densidade a granel e valores acima de 400 kg/m³ para densidade aparente de carvão vegetal.

De acordo com Gomes e Oliveira (1980), a densidade determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno. Segundo estes mesmos autores, não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível.

Nota-se pela Tabela 2 que para nenhuma das propriedades analisada verificou diferença estatística significativa entre as posições no interior do forno.

Tabela 2 – Umidade em base úmida (Ubu), Teor de materiais voláteis (TMV), Teor de cinzas (TCz) e Teor de carbono fixo (TCF) nas diferentes posições do forno de carbonização

Posição ns	Ubu	TMV	TCz	TCF
Topo	6,34 (24,16)	9,68 (26,11)	0,61 (23,20)	83,37 (0,94)
Meio	4,95 (17,78)	13,06 (37,09)	0,38 (23,02)	81,60 (4,89)
Fundo	5,90 (14,69)	14,89 (9,92)	0,43 (24,06)	78,78 (2,94)
Parede	5,58 (24,15)	13,00 (35,44)	0,42 (23,73)	81,00 (3,58)

^{ns} : não significativo a 5% de significância

O valor médio da umidade do carvão vegetal foi de 5,69%. Nota-se que a posição que apresentou maior média de umidade foi o topo (6,34%), enquanto a menor foi observada no meio do forno (4,95%). Os valores encontrados foram próximos aos encontrados em estudo realizado por Oliveira *et al.* (2015) com valores entre 4,02 e 7,7%.

Um baixo teor de umidade garante um carvão com maior poder calorífico, ou seja, altos valores comprometem o rendimento em alto-forno (GOMES, 2006). Basso (2017) ressalta que, a umidade possui uma relação inversa com a qualidade do carvão vegetal devido sua interferência no rendimento em energia. Quanto maior a quantidade de água presente no material, maior será o gasto de energia necessário para liberá-la acarretando a diminuição do poder calorífico do carvão.

O teor médio de voláteis presente no carvão vegetal foi de 12,66%. As médias para o teor de voláteis encontradas foram de 9,68; 13,06; 14,90 e 13,00% para o topo, meio, fundo e parede, respectivamente sendo considerados baixos. Os valores verificados nesta pesquisa estão próximos ao encontrado por Souza (2016), que foi de 16% para carvão vegetal de diferentes espécies de *Eucalyptus*. Nota-se que apesar de não ser verificada diferença estatística significativa entre as posições, o menor teor de materiais voláteis foi verificado no topo do forno, local onde é realizado o acendimento para início da carbonização, e provavelmente atinge maiores temperaturas durante a carbonização. As substâncias são compostas pelos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio. Seu volume é determinado pela lignina, estrutura da madeira e processo de carbonização (BRITO, 1993; BRAGA, 1992). Um incremento nos materiais voláteis resulta na redução do teor de carbono fixo. A reatividade está diretamente ligada à quantidade de material volátil presente no carvão vegetal. Um aumento no teor de carbono fixo do carvão vegetal levará a uma maior reatividade durante o processo de combustão.

O rendimento médio em cinzas verificado no carvão vegetal foi de 0,46%. O

maior teor de cinzas foi encontrado no topo (0,61%) enquanto menor teor foi observado no meio do forno (0,38%).

Os teores de cinzas devem ser menores que 1,5%. Segundo Souza (2016), não é desejável que o carvão vegetal tenha alto teor, pois isto sugere que o mesmo apresenta elevados níveis de minerais, que prejudica o metal.

O teor médio de carbono fixo verificado foi de 81,19%, sendo o maior teor encontrado no topo (83,38%) e menor no fundo do forno (78,77%). É possível verificar que no topo do forno de carbonização coincide com o local em que foi verificado menores valores de densidade (Tabela 1), porém não foram verificadas diferenças estatísticas significativas.

O teor de carbono fixo, para carvão vegetal, deve ser maior que 75%. Segundo Souza et al (2016), o teor de carbono fixo é um dos principais fatores responsáveis pela qualidade do carvão vegetal, sendo que quanto maior este teor, melhor será a eficiência do uso do carvão pois, na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo, sendo esse o principal responsável pela energia estocada no carvão. Para a utilização energética do carvão vegetal é conveniente que o material possua um elevado teor de carbono fixo, e baixos teores de materiais voláteis e cinzas, uma vez que essas variáveis apresentam significativas correlações com o poder calorífico do carvão (BASSO, 2017).

5. CONCLUSÃO

As densidades a granel e ponderada médias do carvão vegetal produzido de *Eucalyptus* sp em São João Evangelista, foram de 0,171 e 0,357 g/cm³ respectivamente. Não verificou diferença estatística significativa em função da posição no interior do forno de carbonização.

Para a análise química imediata também não verificou diferença estatística significativa em função da posição no interior do forno. O valor médio da umidade do carvão vegetal foi de 5,69%, o teor médio de voláteis foi de 12,66%, o rendimento médio em cinzas foi de 0,46% e o teor médio de carbono fixo foi de 81,19%. Nas análises não se identifica diferença significativa, assim podemos considerar que não teve variabilidade, desse modo não foram verificadas variação nas propriedades químicas e físicas de densidade em função da posição do no interior do forno, já as análises químicas imediatas estão de acordo com a literatura e são avaliadas como propriedade heterogêneas.

REFERÊNCIAS

ABNT –ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633 – **Carvão Vegetal: Determinação do poder calorífico – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-2015-66, ASTM D-167-73, D-1762-64, Philadelphia, PA: **American Society for Testing and Materials**

ARRUDA, T. P. M. de. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares**. 2005. 44f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005.

ARRUDA, T. P. M. et al. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.949-955, 2011.

BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. 2017. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**, Piracicaba: ESALQ. n. 28, p. 1-4, 1977. Circular Técnica.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal partir de sua densidade aparente. Piracicaba: IPEF, 1982.

BARCELLOS, DC. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. Tese de Doutorado, UFV, Viçosa/MG. 2007. 162 fls.

CARMO, J.S. 1988. Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado à Siderurgia e Metalurgia. Viçosa - Minas Gerais, Brasil.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO R. A. P.; VITAL, B. R. **Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos.** Revista *Árvore*, 38(2): 375-381. 2014.

COUINHO, A. dos R.; FERRAZ, E. S. B. **Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização.** Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, 1988.

DIAS JÚNIOR, A.F.; ANDRADE, C.R.; BRITO, J.O.; MILAN, M. **Desdobramento da função qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos.** Floresta e Ambiente, v. 22 (2): 262-270, 2015.

ELYOUNSSI, K.; BLIN, J. L.; HALIM, M. Highyield charcoal production by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.87, n.1, p.138-143, 2010.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. Available at: <<http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>>. Date accessed: 10 feb. 2020. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

FROEHLICH, Paulo Leandro; MOURA, Angela. Carvão vegetal: propriedades físico- químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2014.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, José Cláudio; VENTORIM, Gustavo. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 24, n. 135, p.

14-16, 2013.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. de Teoria da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, 1980. p.27-41.

GOMES, M.T.M. **Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias**. 2006. 88p. Dissertação- Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Florestal.

GOMES, A. F. Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ci. Fl., Santa Maria**, v. 30, n. 3, p. 677-687, 2020.

GONÇALVES, Celso de Almeida; FERNANDES, Milton Marques; ANDRADE, Azarias Machado de. Celulose e carvão vegetal de Mimosa caesalpiniaefolia Benth (Sabiá).

Floresta e Ambiente, v. 6, n. 1, p.51-58, jan./dez. 1999.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ 2023. Brasília, DF, 2020. **Relatório anual**

2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2023.pdf>

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2014.

LANA, A. Q.; SALLES, T. T.; CARNEIRO, A. O .C.; CARDOSO, M. T.; TEIXEIRA, R. U.

Comparison of procedures for immediate chemical analysis of charcoal. Revista *Árvore*, 40 (2). 2016.

MOTA, F.C.M. **Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de**

Eucalyptus sp. no Brasil. 2013. 169 P.Dissertação. Universidade de Brasília- Brasília.

Nones, DL1, Brand, MA, Cunha, AB, Carvalho, AF, Weise, SMK. **Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptusbenthamii*.** Floresta, Curitiba, PR, v. 45, n. 1, p. 57 - 64, jan. / mar. 2015

OLIVEIRA, Elisabeth et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p.311-318, 2006.

OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A.; MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J.

Análise da qualidade do carvão para consumo doméstico de quatro municípios do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v. 4, p. 102-111, 2015.

PINHEIRO, P. C. C. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** Belo Horizonte: Edição do Autor, 2006.

RAAD, T.J.(2000).**Instrumentação dos fornos industriais da V & M florestal In: Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira.** Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba-MG. 32p.

RIBEIRO, P. G.; VALE, A. T. **Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico. In:** Anais da Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência; Florianópolis. Belém: Universidade Federal do Paraná; 2006. SOUZA et al., 2016

ROSA, R. A. **Qualidade do carvão vegetal, para uso doméstico, comercializado em três municípios do estado do Espírito Santo.** Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de engenharia florestal do centro de ciências agrárias, 2010.

ROUSSET. P.; FIGUEIREDO, C.; SOUZA M, QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n.10, p. 1890-1897, 2011.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília.

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, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v.22, n.2, p.309-321, 2012.

SILVA, J. R. M. 1994. Desenvolvimento de um forno de carbonização com cúpula metálica móvel. Viçosa, UFV, 41p. (tese M.S.).

Souza ND, Amodei JB, Xavier CN, Dias Júnior AF, Carvalho AM. **Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico.** *Floresta e Ambiente* 2016; 23(2): 270-277

Vital, B. R.; Jesus, R. M.; Valente, O. F. **Efeito da constituição química e da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal.**

Revista Árvore, Viçosa, v.10, n.2, p. 151-160, 1986.

VITAL, B.R.; CARNEIRO, A. DE C. O.; PEREIRA, B. L. C., Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais.** Viçosa, MG: Os Editores, 2013. p.321-354.

ZUCHI, P. S. **A evolução do carvão vegetal e suas repercussões na produtividade e qualidade do carvão, nas condições de trabalho e no meio ambiente: Estudo comparativo.** Belo Horizonte. UFMG. 143p. Tese Mestrado. 2001