

JÉSSICA DORNELAS SOARES

**PARÂMETROS PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE  
CARVÃO VEGETAL EM PRENSA HIDRÁULICA**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S676p  
2018

Soares, Jéssica Dornelas, 1992-  
Parâmetros para determinar a resistência mecânica de  
carvão vegetal em prensa hidráulica / Jéssica Dornelas Soares. –  
Viçosa, MG, 2018.  
vii, 36 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcos Oliveira de Paula.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 28-36.

1. Carvão vegetal - Testes de compressão. 2. Friabilidade.  
3. *Eucalyptus* sp.. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.


CDO adapt. CDD 22. ed. 634.98675


JÉSSICA DORNELAS SOARES

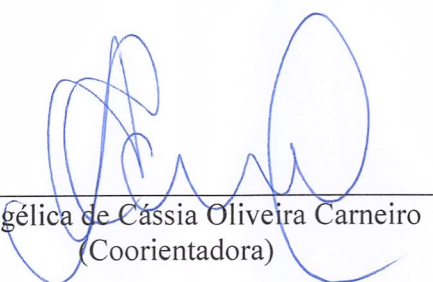
**PARÂMETROS PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE  
CARVÃO VEGETAL EM PRENSA HIDRÁULICA**

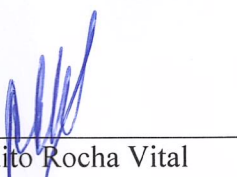
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

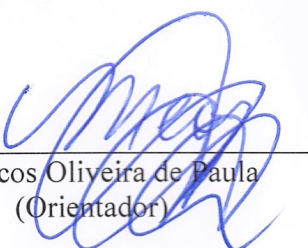
APROVADA: 09 de março de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

  
\_\_\_\_\_  
Paula Gabriella Surdi

  
\_\_\_\_\_  
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
(Coorientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Benedito Rocha Vital  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Marcos Oliveira de Paula  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força concedida a mim.

Aos meus pais, Wanda Lúcia Dornelas Soares e Antônio Soares e aos meus irmãos, Diogo e Esdras, por todo ensinamento, amor e apoio às minhas tomadas de decisões.

Ao meu orientador Marcos Oliveira de Paula e coorientadores Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Benedito Rocha Vital, por todo ensinamento, disposição e apoio na realização do projeto.

Aos demais professores da área de Tecnologia da Madeira, que me auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira (LPM) e do Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), em especial, à Éder Cabral, Fernanda, Osvaldo, Francisco Ricardo Bizerra, Bráulio Oliveira, Leila Lopes, Sálvio Rodrigues (Moiado).

À equipe de trabalho à qual me auxiliou grandemente, permitindo a concretização deste trabalho, Matheus Fernandes, Camila Lopes, Luciano Junqueira, Larissa Carvalho, Thaís Freitas, Fabiana Paiva

Aos meus amigos Maria Tereza Angeletti, Fernanda Dornelas, Camila de Paula, Samuel Wilke, Matheus Perdigão e Marcela Escudeiro. Graças a vocês meus dias foram repletos de alegria e, nos momentos difíceis, eram vocês que me davam forças para seguir em frente e não desistir.

Aos membros da banca, que aceitaram ao convite e aperfeiçoarem a dissertação.

Ao LAPEM/LPM, por toda estrutura e equipamentos disponíveis de qualidade para a realização dos experimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Ao CNPq, pela concessão da bolsa de pesquisa. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pela oferta de recursos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal .....	3
3.2. Propriedades do carvão vegetal .....	5
3.3. Propriedades mecânicas do carvão vegetal.....	7
3.3.1. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica.....	8
3.4. Normas e metodologias para determinação das propriedades mecânicas do carvão vegetal .....	9
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	11
4.1. Carbonização da madeira.....	11
4.2. Caracterização mecânica do carvão vegetal .....	14
4.2.1. Metodologia do tamboramento .....	14
4.2.2. Metodologia com Prensa Hidráulica Manual (PHM) .....	14
4.3. Determinação dos parâmetros ótimos para validação da resistência mecânica de carvão vegetal utilizando a PHM .....	16
4.4. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica .....	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	19
5.1. Caracterização mecânica do carvão vegetal .....	19
5.2. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica .....	25
6. CONCLUSÕES.....	28
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

## RESUMO

SOARES, Jéssica Dornelas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2018. **Parâmetros para determinar a resistência mecânica de carvão vegetal em prensa hidráulica.** Orientador: Marcos Oliveira de Paula. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Benedito Rocha Vital.

As propriedades mecânicas do carvão vegetal são fundamentais para determinar a qualidade do carvão vegetal, sendo que esta pode ser quantificada a partir da sua friabilidade, ou seja, a capacidade do carvão em gerar finos quando submetido a choques e quedas pela sua movimentação. A única norma para avaliação das propriedades mecânicas do carvão contém os procedimentos para determinar o índice de quebra e abrasão. Não existe nenhuma normativa para avaliação da resistência a compressão de leitos de carvão. Alguns estudos foram desenvolvidos propondo ensaios alternativos para compressão de peças individualizadas de carvão vegetal, entretanto, esses são de difícil execução e demandam alto investimento financeiro. Empresas do setor siderúrgico a fim de contornar essas adversidades desenvolveram uma metodologia para compressão de leitos de carvão vegetal, utilizando prensa hidráulica manual, porém, os parâmetros ótimos de utilização desses ensaios ainda não foram definidos e padronizados. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os parâmetros de ensaio utilizados para determinação da geração de finos de carvão vegetal a partir de uma prensa hidráulica manual e avaliar a influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica. O carvão foi produzido em forno circular de superfície, utilizando toras de eucalipto com 7 anos de idade, diâmetros de 10 a 12 cm e 1 m de comprimento. Para avaliação da metodologia, os ensaios mecânicos do carvão foram realizados em uma prensa hidráulica manual, utilizando como variáveis de ensaio quatro faixas granulométricas do carvão (12,7 a 19,5, 19,5 a 25,4, 25,4 a 31,7 e 31,7 a 50,8 mm) e cinco forças de compressão (1, 1,5, 2, 3 e 5 t). Utilizou-se como testemunha o ensaio de tamboramento recomendado pelo CETEC (1982). A influência da densidade do carvão na sua resistência foi avaliada a partir de três classes de densidade a granel (160, 170 e 180 Kg/m<sup>3</sup>) utilizando-se prensa hidráulica manual, com força de compressão de uma tonelada, por um minuto e utilizando o ensaio de tamboramento recomendado pelo CETEC (1982) a efeito de comparação. Independente da faixa granulométrica do carvão vegetal, quanto maior a força de compressão maior a geração de finos. A menor faixa granulométrica apresentou maior geração de finos do carvão

vegetal em relação às demais, independente da força de compressão. Os parâmetros de ensaio recomendados para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal, utilizando prensa hidráulica manual, são força de compressão de 1 t e carvão na granulometria de 19,5 a 25,4, 25,4 a 31,7 e 31,7 a 50,8 mm. Observa-se um aumento significativo médio de 19% na geração de finos do carvão vegetal com a redução da densidade de 170 para 160 Kg/m<sup>3</sup>.

## ABSTRACT

SOARES, Jéssica Dornelas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2018. **Parameters to determine mechanical strength of charcoal in a hydraulic press.** Advisor: Marcos Oliveira de Paula. Co-advisors: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Benedito Rocha Vital.

The mechanical properties of charcoal are fundamental to determine its quality. The charcoal quality can be quantified from its friability that is the ability of charcoal to generate fines when subjected to impacts due to its movement. The only standard for evaluating the mechanical properties of charcoal contains the procedures for determining the breakage and abrasion index. There are no standards for the evaluation of the compressive strength of charcoal beds. Some studies have been developed proposing alternative tests for compression of individual charcoal pieces. However, these are difficult to perform and require high financial investment. In order to overcome these adversities, the steel industry companies have developed a methodology for compressing charcoal beds using a manual hydraulic press, but the optimum parameters for using these tests have not been defined and standardized. Thus, the objective of this work was to evaluate the test parameters used to determine the generation of charcoal fines from a manual hydraulic press and to evaluate the influence of charcoal density on its mechanical strength. The charcoal was produced in a circular surface kiln using a 7-year-old eucalyptus logs, with 10 to 12 cm in diameter and 1 m in length. To evaluate the methodology, the mechanical charcoal tests were performed in a manual hydraulic press, using the following test variables: four charcoal particle size ranges (12.7 to 19.5, 19.5 to 25.4, 25.4 to 31.7 and 31.7 to 50.8 mm) and five compressive forces (1, 1.5, 2, 3 and 5 t). The tumbling test recommended by CETEC (1982) was used as a control treatment. The influence of charcoal density on its strength was evaluated from three bulk density classes (160, 170 and 180 Kg/m<sup>3</sup>) using a one-ton manual hydraulic press for one minute, and the tumbling test (CETEC, 1982) was performed for comparison again. Regardless of the charcoal particle size range, the greater the compression force the greater the generation of fines. The smallest particle size range presented higher generation of charcoal fines than the others, regardless of the compression force. The recommended test parameters for determining the mechanical strength of charcoal using a manual hydraulic press are compression force of 1 t and charcoal particle size from 19.5 to 25.4, 25.4 to 31.7 and 31.7 to 50.8 mm.

There is a significant average increase of 19% in the generation of charcoal fines with a density reduction from 170 to 160 kg/m<sup>3</sup>.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil o carvão vegetal é considerado uma excelente matéria-prima para a siderurgia brasileira, devido a sua qualidade como combustível e redutor, seu elevado grau de pureza e baixo poder poluidor, quando comparado a outros materiais termorreductores (MACHADO e ANDRADE, 2004 e PROTÁSSIO et al.; 2014).

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo, com consumo de 4,5 milhões de toneladas em 2016. Do total de carvão vegetal produzido, cerca de 84% são oriundos de florestas plantadas, que correspondem a 14% do total de plantios do país, consumindo cerca de 21,46 milhões de m<sup>3</sup> de madeira de eucalipto (IBÁ, 2017).

Considerado um dos principais insumos da indústria siderúrgica no Brasil, o carvão vegetal atua quase que em sua totalidade como agente redutor na fabricação do ferro-gusa, aço e ferro-liga, em mais de 120 indústrias siderúrgicas, representando cerca de 20% da produção total de ferro-gusa e aço em 2016, sendo que 36% da produção nacional de ferro-gusa estiveram presentes no estado de Minas Gerais (SINDIFER, 2016; IBÁ, 2017). Um percentual menor do carvão vegetal é destinado à indústria cimenteira (2,3%), ao uso comercial (1,0%) em churrascarias e padarias, além do uso residencial (1,7%) para aquecimento e preparo de alimentos (EPE, 2017).

A produção de carvão vegetal ocorre a partir da carbonização da madeira, cujos principais objetivos são a eliminação da maior parte do oxigênio presente e concentração do carbono na fração sólida. Esse processo consiste na aplicação de calor, em local fechado, com condições controladas de oxigênio, submetendo a madeira a temperaturas finais entre 450 e 550 °C. Esse aquecimento provoca o desdobramento dos constituintes da madeira em gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, entre outros), líquido (alcatrões, ácido acético, álcool metílico, entre outros) e sólido, o carvão (OLIVEIRA et al., 2015; REZENDE, 2006; PINHEIRO et al. 2006).

Devido à importância do carvão vegetal nos processos industriais é necessário que este apresente parâmetros de qualidade para garantir um produto final adequado. A qualidade do carvão vegetal depende estritamente do processo de carbonização como controle da temperatura, taxa de aquecimento, tempo de exposição da madeira ao calor, temperatura final de carbonização e tecnologia empregada na conversão. Além disso, algumas propriedades da madeira afetam diretamente as propriedades do carvão vegetal

produzido. Logo, se torna necessário investigar e selecionar materiais genéticos, a fim de se obter um produto de melhor qualidade e maior rendimento em carvão vegetal (SANTOS, 2010).

De acordo com Santos (2008), entre as propriedades desejáveis no carvão vegetal para a siderurgia, cita-se os menores teores de materiais voláteis e cinzas e maiores teores de carbono fixo, densidade e resistência mecânica do carvão vegetal.

A resistência mecânica do carvão vegetal pode ser quantificada a partir da sua friabilidade, ou seja, a capacidade do carvão em gerar finos quando submetido a choques e quedas pela sua movimentação. Segundo Machado e Andrade (2004), a geração de finos abaixo de 10 mm de diâmetro pode chegar a 25% desde a produção do carvão até a sua entrada no alto forno. Esse material considerado como finos não é aproveitado em processos industriais, significando grande perda de material energético, pois, apesar de estarem abaixo da granulometria especificada para utilização na siderurgia, são ricos em carbono.

Além disso, há também a geração de finos dentro do alto-forno, devido à sustentação da carga no seu interior, diminuindo a permeabilidade da carga, reduzindo a produtividade e comprometendo a operação adequada. Dessa forma é de extrema importância que o carvão vegetal destinado a esse fim passe por testes a fim de quantificar a sua resistência mecânica.

As normas utilizadas para determinação da friabilidade do carvão vegetal, ainda hoje, não simulam a real aplicabilidade do carvão vegetal em sistemas industriais, sendo elas recomendações do CETEC citado por Oliveira et al. (1982) e a NBR 8740 – Determinação do índice de quebra e abrasão (ABNT, 1985b). Esses ensaios são realizados por um teste de tamboramento que simula a movimentação do material durante o seu manuseio e transporte, entretanto, essas metodologias foram adaptadas para ensaios com carvão vegetal tendo como base normas desenvolvidas para o coque (NBR 8997, 1985), material menos friável. Tais ensaios podem acabar gerando uma quantidade maior de finos quando realizados com carvão vegetal, prejudicando a sua precisão.

Além desses ensaios, alguns autores como Costa (2016) e Vieira (2009), têm elaborado alguns métodos que determinam a resistência mecânica do carvão vegetal a partir da compressão paralela às fibras de peças individualizadas de carvão, entretanto, Segundo Kurauchi (2014), esses ensaios são de difícil execução, devido a retirada de corpos-de-prova isentos de trincas, e não reproduzem o cenário real de utilização, pois,

durante os processos em que a carga de carvão está submetida a força de compressão a mesma não se mantém armazenada de forma organizada e orientada, recebendo tensões em vários sentidos da peça e não somente no sentido paralelo às fibras.

Visto isso, é de grande interesse estudos que visam desenvolver metodologias mais eficientes e padronizadas para quantificar a geração de finos do carvão ocasionado tanto pelo atrito das peças durante as operações de movimentação e transporte quanto pela força de compressão submetida à carga.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os parâmetros de ensaio utilizados para determinação da geração de finos de carvão vegetal a partir de uma prensa hidráulica manual, cujos objetivos específicos são:

- Avaliar diferentes Granulometrias de Carvão Vegetal na geração de finos de carvão vegetal utilizando uma Prensa Hidráulica Manual;
- Avaliar diferentes Forças de Aplicação na geração de finos de carvão vegetal utilizando uma Prensa Hidráulica Manual;
- Comparar o método utilizando uma Prensa Hidráulica Manual com o teste de Tamboramento (CETEC, 1982);
- Recomendar os parâmetros ótimos para determinação da resistência mecânica de carvão vegetal com prensa hidráulica, utilizando como base o teste de Tamboramento (CETEC, 1982);
- Avaliar a influência da densidade do carvão vegetal na sua geração de finos.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal**

O carvão vegetal é considerado uma excelente matéria-prima no setor siderúrgico, atuando como fornecedor de energia e gás redutor do minério de ferro. Um dos entraves na expansão da utilização de carvão vegetal no setor siderúrgico é a sua alta variabilidade em qualidade, devido, em partes, a forte influência exercida pela madeira que lhe deu origem (TRUGILHO et al. 2001 e VIEIRA, 2009).

O processo de carbonização promove diversas modificações nas propriedades químicas, física e anatômicas da madeira, devido à degradação térmica dos seus principais constituintes, celulose, hemiceluloses e ligninas. A resistência térmica de cada constituinte químico da madeira está relacionada às suas respectivas estruturas, quanto mais complexa, rígida e condensada, mais estável. Dessa forma, quanto maior a degradação da madeira, maior a liberação de gases e menor massa final por unidade de volume e, conseqüentemente, menor a densidade, visto que a perda volumétrica é menor em relação à massa (ANDRADE et al., 2004; SANTOS, 2010). Além disso, a densidade da madeira depende da sua estrutura anatômica, visto as dimensões, proporção, distribuição e quantidade das células que a compõem (fibras, vasos e parênquimas radial e axial), que ao passarem por modificações durante a carbonização podem influenciar de maneira significativa na densidade do carvão (PEREIRA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2010; BOTREL et al., 2007; OLIVEIRA e SILVA, 2003).

A densidade da madeira tem correlação positiva com a densidade do carvão vegetal, ou seja, madeira de maior densidade resultará em carvão vegetal mais denso, característica fundamental a esse insumo, pois maior será a quantidade de energia por unidade de volume, além de proporcionar, de modo geral, maior resistência mecânica (VALE et al., 2001; CHRZAZVEZ et al., 2014). Trugilho et al. (2001) e Santos et al. (2011) sugerem densidade básica da madeira superior a  $0,500 \text{ g/cm}^3$  para produção de carvão vegetal.

A lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal. As ligninas são macromoléculas tridimensionais, amorfas e ramificadas e apresentam o fenilpropano como unidade básica, unidos por ligações do tipo éter e carbono-carbono, um polímero bem mais complexo que as celulosas e hemicelulosas e de alta massa molar, o que a torna mais resistente termicamente com decomposição em ampla faixa de temperatura, a partir de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , até temperaturas próximas a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , onde apenas uma pequena fração, cerca de 40%, se decompõe em temperaturas inferiores a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura máxima recomendada para produção de carvão vegetal, dessa forma, o teor de lignina na madeira tem correlação positiva com o rendimento gravimétrico e em carbono fixo do carvão vegetal. (PEREIRA et al., 2016; ROWELL et al., 2005; MÜLLER-HAGEDORN et al., 2003).

O efeito dos extrativos é variável na qualidade energética da madeira para a sua conversão em carvão vegetal. A composição química do extrativo, principalmente a sua

relação O/C, tem influência na resistência à degradação térmica dos extrativos e consequentemente no rendimento gravimétrico do carvão. Além disso, devido à presença de compostos com altos teores de carbono nos extrativos da madeira, como alguns de natureza fenólica, esses podem colaborar para o aumento do poder calorífico do carvão (PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2016; CARNEIRO et al., 2017).

O somatório das hemiceluloses e celulose é denominado holoceluloses, correspondendo a maior fração mássica da madeira. Para produção de carvão vegetal, o desejável é a utilização de madeiras com baixas porcentagens de celulose e hemiceluloses, devido à baixa resistência desses componentes à degradação térmica, com picos máximos de perda de massa em aproximadamente 275 °C para hemiceluloses e em 350 °C para celulose, não contribuindo significativamente para o rendimento em carvão vegetal, e sim para produção de gases condensáveis e não condensáveis (YANG et al., 2007; SHEN e BRIDGWATER, 2010).

Pereira (2017) avaliando a decomposição térmica e biológica de cavacos de eucalipto encontrou valores para materiais voláteis, carbono fixo e cinzas em média de 86,60, 13,12 e 0,29%, respectivamente. Segundo o mesmo autor, o valor de carbono fixo na madeira *in natura* pode ser elevado se esta for submetida a temperaturas acima de 220° C. De acordo com Trugilho e Silva (2001), um acréscimo no teor de carbono fixo e um decréscimo no teor de materiais voláteis, visto que essas duas propriedades são inversamente proporcionais, se torna interessante durante a transformação da madeira em carvão.

O teor de cinzas é uma característica intrínseca da biomassa inicial e varia de acordo com as espécies. Para carvão vegetal é desejável baixos teores de cinzas, pois elas acarretam na diminuição do potencial energético e na corrosão de equipamentos (TRUGILHO et al., 2014; TAN e LAGERKVIST, 2011; BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013).

### **3.2. Propriedades do carvão vegetal**

As propriedades do carvão vegetal são de suma importância para determinar sua qualidade. Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão vegetal para uso siderúrgico está compreendida entre 70 e 80% e entre 20 e 25% para materiais voláteis, visto que, essas duas propriedades apresentam comportamento inversamente proporcional.

O consumo do termorreduzidor no processo siderúrgico é diretamente influenciado pelo teor de carbono fixo presente no carvão vegetal, onde, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos siderúrgicos ((FREDERICO, 2009; SANTOS et al, 2016). Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias residuais compostos principalmente de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos, ou seja, elevados valores, acarretam em uma menor eficiência energética (OLIVEIRA, 2003; SANTOS et al; 2016).

Entretanto, vale ressaltar que os teores de carbono fixo e materiais voláteis no carvão são influenciados pela temperatura final e taxa de aquecimento da carbonização, sendo necessário um aumento na temperatura final e um maior tempo de exposição para se alcançar maiores teores de carbono fixo, o que acarreta em uma maior degradação dos constituintes da madeira e conseqüente perda no rendimento gravimétrico do carvão (BOTREL, 2006).

Valores baixos, cerca de 1%, são recomendados para teor de cinzas, pois, além de reduzir o poder calorífico do produto, causam desgaste no alto-forno e podem comprometer a qualidade do ferro-gusa (SANTOS, 2010).

O Poder Calorífico Superior, refere-se à quantidade de calor liberadas por um material em sua combustão completa, ou seja, quanto maior o valor desta propriedade, maior será a energia contida no combustível (CARVALHO JÚNIOR, 2010; QUIRINO et al., 2004). Segundo Santos (2008) o poder calorífico superficial (PCS) do carvão vegetal está próximo de 7.500 kcal/kg, podendo variar de acordo com o teor de carbono fixo, visto que, há correlação positiva entre essas duas propriedades (MACHADO e ANDRADE, 2004).

A densidade do carvão vegetal é de extrema importância, estando diretamente relacionada com o rendimento e produtividade do alto forno (BRITO, 1993). De acordo com Santos (2008), para uso siderúrgico, a densidade a granel abaixo de 0,200 g/cm<sup>3</sup> e densidade aparente abaixo de 0,400 g/cm<sup>3</sup> do carvão vegetal não são consideradas satisfatórias, visto que, quanto maior a densidade do carvão, maior será a utilização do volume do alto-forno, maior tempo de residência da carga metálica no equipamento e maior capacidade de carga em termos de carbono por volume (PIMENTA E BARCELLOS, 2000).

Teores de umidade também afetam na capacidade energética do carvão, sendo que quanto maior a umidade do carvão menor é o seu poder calorífico (COSTA, 2016).

Para uso siderúrgico, segundo Santos (2008), é aceitável uma variação entre 1 a 6% no teor de umidade do carvão.

### **3.3. Propriedades mecânicas do carvão vegetal**

As propriedades mecânicas do carvão vegetal são fundamentais para determinar a qualidade do carvão vegetal. A utilização do carvão em processos siderúrgicos exige um carvão com resistência mecânica suficiente para suportar a camada de minério de ferro, sem prejudicar a permeabilidade do leito, sendo esse um dos maiores entraves da utilização do carvão vegetal como termorreductor do minério de ferro quando comparado com o coque mineral (ASSIS et al. (2016).

A friabilidade é uma propriedade que merece destaque, definida como a capacidade do carvão em gerar de finos quando submetido a quebras, abrasão ou ruptura (GOMES e OLIVEIRA, 1980). O carvão vegetal é um material naturalmente friável e Segundo Brito (1993) a natureza friável do carvão vegetal é intensificada pelas diversas operações de transporte, manuseio, carga e descarga, além dos impactos gerados no interior do alto forno devido à compactação, abração e ação da temperatura em que o termorreductor é submetido.

As propriedades mecânicas do carvão vegetal sofrem forte influência da matéria-prima utilizada para produção do carvão. Moutinho (2013), afirmou que há correlação direta entre a densidade da madeira e a densidade do carvão, além do módulo de elasticidade e a resistência à compressão paralela de fibras de carvão vegetal.

Segundo Rousset et al. (2011), testes de laboratório têm mostrado que quanto maior o teor de umidade da madeira maior é a geração de finos do carvão. Isso ocorre devido à pressão gerada pela saída do vapor d'água resultante do aquecimento da madeira, causando fissuras internas e externas na peça de carvão tornando-a mais suscetível a quebras e fissuras durante seu manuseio.

O diâmetro da tora e a resistência mecânica do carvão possuem correlação direta, onde, madeiras com maiores proporções de cerne tendem a gerar mais finos. As trincas e fissuras na parte central da peça de carvão constituem-se em zonas de concentração de tensão. Essas trincas se dão principalmente pela obstrução dos vasos da madeira por tilos, na região do cerne, o que dificulta o transporte de água da parte mais interna para a mais externa da madeira (ASSIS et al., 2016; COSTA et al, 2017). Além disso, segundo Moutinho (2013), a densidade da madeira apresenta correlação positiva

com a resistência à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade do carvão vegetal.

Parâmetros do processo de carbonização como temperatura final e taxa de aquecimento também influenciam na resistência mecânica do carvão, afetando na qualidade final do produto (ASSIS et al., 2016). Segundo Costa (2016), ao avaliar a carbonização de sete clones de eucalipto, carbonizando-os a quatro temperaturas finais distintas (350, 450, 550 e 700 °C), concluiu que, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão paralela às fibras do carvão obtiveram tendência de aumento a partir da temperatura final de 350° C até 700° C.

Os menores valores encontrados para resistência mecânica do carvão nas temperaturas finais de carbonização mais usuais (entre 450 e 500 °C) estão relacionados com o aumento da porosidade do carvão devido à maior extração de voláteis nessa fase, já o posterior aumento da resistência mecânica acompanhada com o aumento das temperaturas finais está relacionado a modificações nos componentes anatômicos da madeira, além de um possível rearranjo estrutural dos componentes do carvão, principalmente o carbono. Além disso, utilizar taxas de aquecimento mais suaves para a carbonização da madeira pode acarretar em uma secagem e saída dos gases gerados durante a carbonização, mais lenta, diminuindo a ocorrência de fissuras (OLIVEIRA et al., 1982).

### **3.3.1. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica**

A densidade do carvão vegetal é uma característica em destaque na sua qualidade para uso siderúrgico, pois uma maior densidade do carvão significa maior tempo de residência, redução do consumo específico de carvão por tonelada de ferro gusa produzido, menor volume ocupado por carvão no alto forno e maior carga de minério, aumentando a eficiência do processo de conversão do minério de ferro (COSTA, 2016). Segundo Couto et al. (2015), há uma tendência do carvão vegetal com maior densidade apresentar maior resistência mecânica.

Moutinho (2013) ao determinar a variação radial e longitudinal da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* também afirmou que quanto maior a densidade do carvão, maior é a sua resistência à compressão paralela de fibras de carvão, importante parâmetro na termorredução do minério de ferro, visto que, quanto maior a resistência à compressão e rigidez do mesmo, maior a capacidade de

sustentação do leito no interior do alto forno siderúrgico. O mesmo autor encontrou maiores valores da resistência a compressão paralela das fibras e módulo de elasticidade na parte mais externa do carvão, tendendo a decrescer à medida que se aproxima da medula, região com menor densidade.

Vieira (2009) encontrou comportamento semelhante ao investigar a resistência do carvão vegetal de eucalipto em diferentes posições radiais, carbonizados a 350° C. Além de valores o mesmo autor também observou uma maior frequência de fissuras visíveis em corpos de prova de carvão mais próximos da medula. Tais fissuras ocorrem, principalmente, devido ao processo de secagem na primeira fase de carbonização, onde o tecido mais frágil existente próximo à medula acaba por romper-se ou colapsar-se devido às tensões internas existentes, gerando um carvão mais friável nessa região.

### **3.4. Normas e metodologias para determinação das propriedades mecânicas do carvão vegetal**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui algumas normas específicas para caracterização do carvão vegetal. Entretanto, a única norma com algum caráter de propriedade mecânica é a NBR 8740 (ABNT, 1985b) que determina o índice de quebra e abrasão do carvão. Essa metodologia foi desenvolvida a partir de uma recomendação do CETEC, citado por Oliveira et al. (1982), que se baseia em um ensaio de tamboramento que permite obter uma indicação da friabilidade do carvão simulando a movimentação de uma amostra dentro de um tambor giratório, com propósito de determinar o desgaste das peças de carvão durante o seu manuseio e transporte.

Algumas variáveis do ensaio, como granulometria e quantidade de amostra diferem a NBR 8740 da recomendação do CETEC. A NBR 8740 determina a utilização de 10 kg de carvão vegetal das frações proporcionais à análise granulométrica acima de 32 mm. Já a recomendação do CETEC determina parâmetros de ensaio para duas categorias distintas, teste de tamboramento para pequenas quantidades, em escala laboratorial e teste de tamboramento em grandes quantidades, em escala industrial. Em escala laboratorial o ensaio exige amostra com cerca de 500 g de carvão nas granulometrias entre 23 a 38 mm, já para escala industrial exige-se amostra com cerca de 21 Kg de carvão composta por peças nas frações granulométricas entre 25 a 38, 38 a 51 e 51 a 63 mm, sendo 7 Kg de cada. A recomendação do CETEC é até hoje a mais usual para ensaio de friabilidade de carvão vegetal.

Apesar das propriedades mecânicas do carvão vegetal serem de extrema importância, essas são pouco investigadas, e também não há sequer uma normativa desenvolvida que descreva e padronize ensaios mecânicos para determinação da resistência a compressão do carvão vegetal.

Blankenhorn et al. (1972), Moore et al. (1974), Doat e Petroff (1975), Mendes et al. (1982), Vieira (2009) e Costa (2016) foram alguns dos pesquisadores que estudaram a resistência do carvão vegetal a partir de ensaios mecânicos que consistem na compressão de peças individualizadas de carvão no sentido paralelo às fibras. Ressalta-se que para a realização dos ensaios esses autores propõem a confecção de corpos de prova de carvão isentos de fissuras ou trincas e com superfícies planas para aplicação de cargas paralelas à direção das fibras, o que é extremamente difícil de se obter visto a alta friabilidade do material, acarretando uma demanda de tempo e ferramentas específicas.

Apesar da caracterização de peças individualizadas ser interessante para o entendimento de correlações entre propriedades da madeira e do carvão, este ensaio não seria representativo para caracterizar a resistência mecânica do carvão em cenários reais de utilização, visto que, em sistemas industriais normalmente o carvão apresentará fissuras e estará depositado de forma aleatória tanto no transporte quanto no alto forno, recebendo tensão em todos os sentidos na peça de carvão, não apenas paralelo às fibras (KURAUCHI, 2014 e VEIGA et al, 2016).

A fim de contornar essas dificuldades para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal, empresas produtoras desse insumo desenvolveram uma metodologia para determinar a geração de finos de carvão a partir da compressão de uma amostra composta por inúmeras peças de carvão dispostas de forma desorganizada em um recipiente de aço (panela), utilizando uma prensa hidráulica manual, porém, os parâmetros ótimos de utilização desse ensaio ainda não foram definidos e padronizados.

Portanto, estudos utilizando metodologias, que forneçam informações sobre o efeito da aplicação de carga distribuída de forma aleatória em leitos de carvão, semelhantes ao cenário industrial, são de suma importância para o setor.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nas instalações do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), do Departamento de Engenharia Florestal (DEF), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), situada na cidade de Viçosa-MG.

### 4.1. Carbonização da madeira

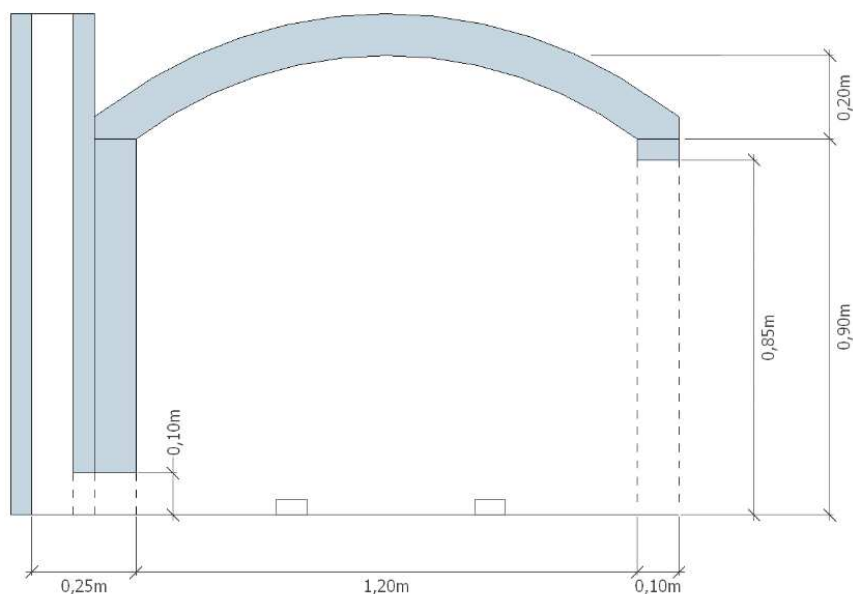
Para a realização deste trabalho, foram utilizadas toras de madeira de *Eucalyptus* sp. com 7 anos de idade, diâmetro variando entre 10 e 12 cm e comprimento de 1,0 m, proveniente de plantio comercial com espaçamento 3x3, localizado na cidade de Cajuri-MG.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios das propriedades da madeira utilizada no estudo.

**Tabela 1** - Valores médios da composição química estrutural e elementar, densidade básica e resistência à compressão paralela às fibras da madeira

Propriedade	Valor Médio	DV	Normatização
Holocelulose (%)	70,25		Somatório dos teores de extrativos totais, lignina total e cinzas, decrescido de 100
Lignina Total (%)	27,43	0,01	Soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel
Extrativos Totais (%)	2,19	0,13	TAPPI (1996)
Materiais Voláteis (%)	86,85	0,62	NBR 8112 (ABNT, 1986)
Cinzas (%)	0,13	0,13	NBR 8112 (ABNT, 1986)
Carbono Fixo (%)	13,01	0,65	NBR 8112 (ABNT, 1986)
Teor de umidade (%)	45,00		NBR 7993 (ABNT, 1983)
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	0,47	0,03	NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984).
f <sub>c0</sub> (Mpa)	40,35	50,5	NBR 7190 (ABNT, 1982)

As carbonizações foram realizadas utilizando um forno do tipo circular de superfície, de alvenaria, com capacidade de um metro estéreo de madeira, com medidas internas de 1,20 m de diâmetro, 0,90 m de altura nas paredes laterais e 1,10 m de altura na parte central (Figura 1). Na base dos fornos foram deixadas duas aberturas para entrada de ar e controle da carbonização.



**Figura 1** - Vista lateral do forno circular de superfície

O carregamento do forno foi feito de forma manual, posicionando a madeira na posição vertical para o melhor aproveitamento do espaço interno. O diâmetro e comprimento da madeira enfiada variaram entre 10 a 12 cm e 0,90 a 1,10 m, respectivamente. Após o carregamento do forno a porta foi fechada com tijolo maciço cerâmico e argamassa de solo argiloso, areia e água.

As faixas de temperatura, na copa do forno, utilizadas para o controle das carbonizações estão apresentadas na Tabela 2. Estas foram obtidas após a realização de testes preliminares, com base no tempo total de carbonização, teor de umidade da madeira e na degradação térmica dos principais constituintes da madeira.

**Tabela 2** - Faixas de temperatura utilizadas para controle das carbonizações

Fase	Temperatura (°C)	Tempo de permanência (h)	Atividade
I	150	16	Secagem da madeira
II	150-275	12	Degradação das hemiceluloses
III	275-350	18	Degradação da celulose
IV	400	±12	Concentração de carbono fixo
<b>Total</b>	-	58	Fim da carbonização

A temperatura do forno foi monitorada a partir de cinco termopares tipo K, sendo um instalado na copa (Termopar 1) e outros quatro na lateral do forno (Termopares 2, 3, 4 e 5). De acordo com as temperaturas obtidas, procedeu-se o

fechamento ou a abertura das entradas de ar, e conseqüentemente, o controle da carbonização, tendo como temperatura máxima final de carbonização média de 400 °C.

A fim de auxiliar o acompanhamento da carbonização, na última fase do processo, realizou-se a passagem de um vergalhão pelas aberturas laterais do forno, de forma a verificar, devido à facilidade de penetração, o quanto de madeira ainda não havia sido transformada em carvão vegetal. Ao término da carbonização, os controladores de ar foram fechados e o forno vedado com massa argilosa, areia e água, para evitar a entrada de ar e proceder-se o resfriamento do forno. O tempo total médio para a carbonização da madeira foi de 62 horas.

Após o resfriamento do forno foi realizada a abertura da porta e o descarregamento do carvão, colocando-o em sacos plásticos vedados para que não ocorresse alteração no teor de umidade. Posteriormente a carga foi pesada para determinação do rendimento gravimétrico. Durante o descarregamento, o carvão vegetal com granulometria inferior a 12,7 mm (finos) e a madeira parcialmente carbonizada (atiços) foram separadas e pesadas para determinação do rendimento gravimétrico em carvão, finos e atião, que foi calculado pelas Equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$RGC = 100 \times \left( \frac{Mc}{MMS} \right) \quad (2)$$

$$RGF = 100 \times \left( \frac{Mf}{Mms} \right) \quad (3)$$

$$RGT = 100 \times \left( \frac{Mt}{Mms} \right) \quad (4)$$

onde:

*RGC* = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

*RGF* = rendimento gravimétrico em finos (%);

*RGT* = rendimento gravimétrico em atiços (%);

*Mc* = massa de carvão vegetal (kg);

*Mf* = massa de finos (kg);

*Mt* = massa de atião (kg);

*Mms* = massa de madeira seca (kg).

## 4.2. Caracterização mecânica do carvão vegetal

### 4.2.1. Metodologia do tamboramento

A determinação da friabilidade do carvão vegetal pelo método do tamboramento foi realizada segundo a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Oliveira et. al, 1982), com algumas adaptações quanto à granulometria do carvão.

Para realização do ensaio, pesou-se uma amostra de aproximadamente 500 g de carvão vegetal classificada nas peneiras de 25,4 e 37,5 mm. A amostra de carvão foi introduzida num tambor cilíndrico, posteriormente fechado e vedado, sendo o mesmo produzido em aço com 30 cm de diâmetro e 24,8 cm de comprimento acoplado a um motor que o mantinha em rotação durante 17 minutos a 30 rotações por minuto.

Ao fim do ensaio, o tambor foi aberto e retirou-se a amostra de carvão que foi classificada em peneira de 9,5 mm, pesando-se a massa que passou por essa peneira, a qual foi considerada finos. O cálculo da friabilidade do carvão foi dado pela Equação 5.

$$\text{Friabilidade (\%)} = \left( \frac{M_f}{M_{icv}} \right) \times 100 \quad (5)$$

onde,

$M_f$ : Massa de finos (g)

$M_{icv}$ : Massa de carvão vegetal (g)

A classificação dos finos gerados pelo teste de friabilidade seguiu a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982), observada na Tabela 3.

**Tabela 3** - Classificação de friabilidade para carvão vegetal, segundo CETEC - MG

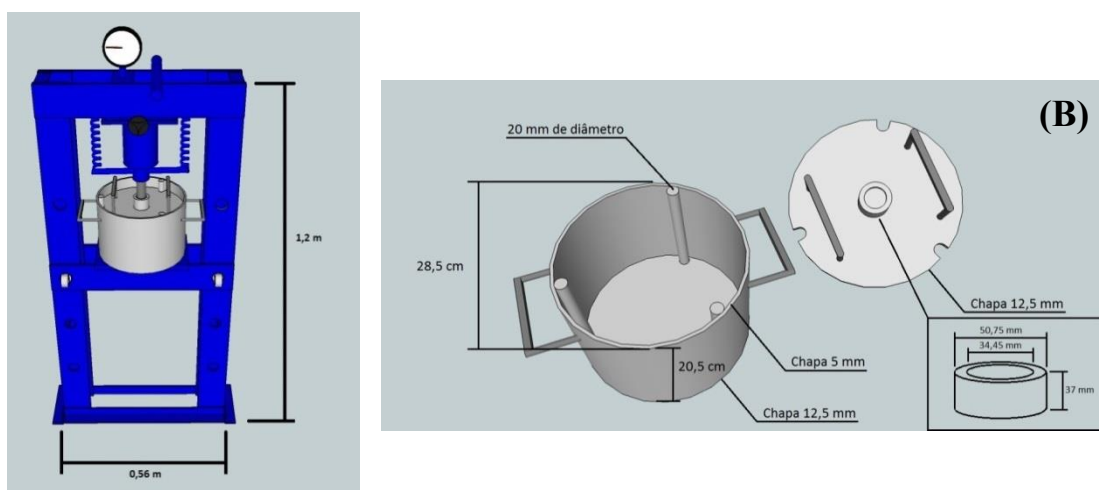
<b>Classificação</b>	<b>% de perdas</b>
Muito friável	$\geq 30$
Bastante friável	25 -29
Friabilidade média	15 -24
Pouco friável	10 -15
Muito pouco friável	$< 10$

### 4.2.2. Metodologia com Prensa Hidráulica Manual (PHM)

A determinação do percentual de finos gerados pela metodologia com Prensa Hidráulica Manual (PHM) foi realizada a partir da compressão do carvão vegetal.

Para tal, utilizou-se uma prensa hidráulica de 15 toneladas acoplada a um recipiente cilíndrico, construído em aço 1045, com 28,5 cm de diâmetro e 20,5 cm de altura, entretanto, o recipiente não foi fixado na prensa e possui duas alças laterais que servem de apoio para retirada do recipiente da prensa a fim de facilitar atividades do ensaio, como carregamento e descarregamento da amostra.

O recipiente possui também, uma tampa com dimensões de 20,5 cm de diâmetro e 1,25 cm de espessura com duas alças em sua superfície, para facilitar a abertura e fechamento do recipiente. <sup>(A)</sup> Para que não ocorresse influência do local de aplicação da força, podendo causar alteração nos resultados de um ensaio para o outro, foi feita uma elevação circular de 3,7 cm de altura e 5,07 cm de diâmetro no centro da tampa para demarcação do local, dessa forma a amostra de carvão era pressionada no mesmo ponto de forma homogênea durante o ensaio. Além disso, há três posições de encaixe entre a tampa e o recipiente, a fim de manter o sistema estável. A prensa, o recipiente e sua respectiva tampa estão representados na Figura 2.



**Figura 2** - (A) Prensa Hidráulica, acoplada a um recipiente cilíndrico; (B) Recipiente cilíndrico e sua respectiva tampa.

Para realização do ensaio pesou-se uma amostra de aproximadamente 500 g de carvão vegetal, que foi despejada a uma altura média de 20 cm para o interior do recipiente posteriormente fechado com sua respectiva tampa.

A força de compressão foi aplicada na amostra a partir do pistão da prensa que manteve contato direto com a tampa do recipiente. Após atingir a pressão desejada, manteve-se a amostra pressionada dentro do recipiente por um minuto, esse tempo de permanência teve como objetivo homogeneizar a distribuição da pressão no material.

### 4.3. Determinação dos parâmetros ótimos para validação da resistência mecânica de carvão vegetal utilizando a PHM

Para determinação dos parâmetros ótimos para validação da resistência mecânica do carvão vegetal utilizando a PHM foram realizadas duas carbonizações. Posteriormente todo o carvão produzido em todas as carbonizações foi misturado e homogeneizado, tornando-se uma única amostra composta, e a partir dessa amostra composta foram realizadas as análises para determinação das propriedades do carvão vegetal.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, finos e atíços; e das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal.

**Tabela 4** - Valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, finos e atíços; e das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal.

Parâmetro	Valores Médios	CV (%)	Normatização
<b>RGCV (%)</b>	33,03	10,51	-
<b>RGF (%)</b>	1,14	20,70	-
<b>RGA (%)</b>	6,79	74,94	-
<b>CF (%)</b>	78,64	0,10	NBR 8112 (ABNT, 1986).
<b>MV (%)</b>	20,69	0,95	NBR 8112 (ABNT, 1986).
<b>CZ (%)</b>	0,67	1,05	NBR 8112 (ABNT, 1986).
<b>U. Carvão (%)</b>	4,36	0,66	-
<b>PCS (Kcal/Kgf)</b>	7707,67	86,33	ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984)
<b>DG(Kg/m<sup>3</sup>)</b>	170,00	7,65	ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981)
<b>DA (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	350,00	0,03	ABNT NBR 9165 (ABNT, 1985)

Onde: RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGF: Rendimento gravimétrico em finos; RGA: Rendimento gravimétrico em atíços; CF: Teor de carbono fixo; MV: Teor de materiais voláteis; CZ: Teor de cinzas; U. Carvão: Umidade do carvão, base seca; PCS: Poder calorífico superior; DG: Densidade a granel; DA: Densidade aparente. CV: Coeficiente de variação.

A friabilidade do carvão vegetal determinada pelo método do tamboramento foi considerada como tratamento testemunha. Os ensaios mecânicos utilizando a metodologia da PHM foram realizados utilizando quatro granulometrias do carvão vegetal e cinco forças de compressão, totalizando 20 tratamentos, conforme Tabela 5.

**Tabela 5** - Variáveis de utilização na prensa hidráulica manual para determinação da geração de finos do carvão vegetal

Força (t)	Granulometria (mm)			
	12,7-19,5	19,5-25,4	25,4-31,7	31,7-50,8
1,0	T1	T6	T11	T16
1,5	T2	T7	T12	T17
2,0	T3	T8	T13	T18
3,0	T4	T9	T14	T19
5,0	T5	T10	T15	T20

Para cada ensaio foi contabilizado o tempo médio de execução do teste e a distância percorrida pelo pistão da prensa até a aplicação total da pressão desejada, e assim, obteve-se a velocidade média de ensaio para cada tratamento, de forma a garantir sua reprodução sem interferência do operador.

Após o ensaio, a amostra de carvão foi classificada, e a massa de carvão com granulometria inferior a 9,5 mm foi considerada como finos. O cálculo da friabilidade do carvão foi dado pela Equação 6.

$$\text{Friabilidade (\%)} = \left( \frac{M_f}{M_{icv}} \right) \times 100 \quad (6)$$

onde,

$M_f$ : Massa de finos (g)

$M_{icv}$ : Massa de carvão vegetal (g)

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, constituído de cinco forças de aplicação (1, 1,5, 2, 3 e 5 t) e quatro faixas granulométricas (12,7-19,5, 19,5-25,4, 25,4-31,7 e 31,7-50,8 mm), totalizando 20 tratamentos e a testemunha (metodologia do tamboramento), com cinco repetições, em cento e cinco unidades amostrais.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors, para testar a normalidade, e Cochran, para testar a homogeneidade das variâncias. Depois, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste Tukey, a 5% de significância, e cada tratamento comparado com a testemunha pelo teste Dunnet a 95% de probabilidade, utilizando o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007).

#### 4.4. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica

Para determinação da influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica foram realizadas seis carbonizações. Após a determinação das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, produzido em cada uma das 6 carbonizações, procedeu-se a seleção e separação das carbonizações em três lotes, utilizando como fator de seleção o valor médio da densidade a granel do carvão, 160, 170 e 180 Kg/m<sup>3</sup>, com variação de  $\pm 2$  Kg/m<sup>3</sup>. Posteriormente os carvões que pertenciam ao mesmo lote de carbonização foram misturados e homogeneizados, e a partir daí procedeu-se novamente a determinação das propriedades físicas e químicas do carvão por lote (classe de densidade a granel).

Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios das propriedades dos carvões em função da classe de densidade a granel.

**Tabela 6** - Valores médios das propriedades dos carvões em função das classes de densidade a granel

Classe de DG (Kg/m <sup>3</sup> )	DA (g/cm <sup>3</sup> )	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	PCS (Kcal/Kgf)	U (%)
180 $\pm$ 2	0,36	20,19	0,49	79,27	7837,20	3,58
170 $\pm$ 2	0,33	20,15	0,57	79,29	7592,50	4,21
160 $\pm$ 2	0,34	19,86	0,53	79,63	7633,33	4,64
<b>Média</b>	0,34	20,06	0,55	79,40	7675,44	4,14

Onde: DG: Densidade a granel; DA: Densidade aparente; MV: Teor de materiais voláteis; CZ: Teor de cinzas; CF: Teor de carbono fixo; PCS: Poder calorífico superior.

Para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal foi utilizada a metodologia do Tamboramento descrita no item 4.2.1 e a metodologia da PHM descrita no item 4.2.2 utilizando os parâmetros ótimos de ensaio determinados neste estudo, sendo, carvão vegetal na granulometria de 25,4 a 31,7 mm, força de aplicação de uma tonelada, velocidade média de ensaio de 1 mm/s, e um minuto de tempo de permanência da amostra sobre pressão após aplicação de uma tonelada força.

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, constituído de três densidades a granel (160, 170 e 180 Kg/m<sup>3</sup>), e duas metodologias (PHM e tamboramento), totalizando seis tratamentos, com cinco repetições, em trinta unidades amostrais.

Após o ensaio, a amostra contida dentro do recipiente foi classificada em peneira de malha de 9,5 mm, recolhendo-se a fração com granulometria inferior a 9,5 mm, a qual foi pesada e considerada a fração finos. A friabilidade do carvão foi calculada pela Equação 5.

$$\text{Friabilidade (\%)} = \left( \frac{Mf}{Micv} \right) \times 100 \quad (5)$$

onde,

*Mf*: Massa de finos (g)

*Micv*: Massa de carvão vegetal (g)

A classificação dos finos gerados pelo teste de friabilidade seguiu a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982), observada na Tabela 3.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors, para testar a normalidade, e Cochran, para testar a homogeneidade das variâncias. Depois, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste Tukey, a 5% de significância, utilizando o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização mecânica do carvão vegetal

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios da friabilidade do carvão.

**Tabela 7** - Valores médios do percentual de finos de carvão vegetal gerado nos ensaios em função dos tratamentos.

Força (ton)	Granulometria (mm)				Média
	12,7-19,5	19,5-25,4	25,4-31,7	31,7-50,8	
1	26,22 Da*	18,71 Db <sup>n.s</sup>	15,92 Db <sup>n.s</sup>	17,89 Eb <sup>n.s</sup>	19,69
1,5	36,51 Ca*	26,11 Cb*	25,28 Cb*	26,48 Db*	28,60
2	35,0 Ca*	22,96 Cc*	24,86 Cc*	30,99 Cb*	28,45
3	46,89 Ba*	39,90 Bb*	36,21 Bc*	40,50 Bb*	40,88
5	55,36 Aa*	52,96 Aa*	49,78 Ab*	51,55 Ab*	52,41
<b>Média</b>	40,00	32,13	30,41	33,48	38,26
<b>Testemunha</b>	14,95				

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas na linha (granulometrias) e maiúsculas na coluna (forças), não diferem entre si pelo teste Tukey. “<sup>n.s</sup>” indicam diferenças não significativas e “\*” indicam diferenças significativas entre as médias e a testemunha, pelo teste Dunnett (todos ao nível de 95% de probabilidade).

Independente da granulometria do carvão vegetal observa-se que quanto maior a força de compressão, maior a geração de finos, com valores médios variando de 19,69 a 52,41%. Esse resultado já era o esperado, visto que o carvão vegetal é um material de baixa resistência mecânica, ou seja, sofre grande influência das tensões recebidas durante as atividades em que está envolvido, com considerável degradação, gerando uma grande quantidade de finos a cada manuseio (MACHADO e ANDRADE, 2004).

Uma das causas dessa baixa resistência do carvão vegetal pode ser atribuída ao processo de transformação da madeira em carvão. Segundo um estudo realizado por Pereira et al. (2016), onde avaliou-se o efeito da carbonização da madeira de eucalipto na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal, observou-se que após a carbonização, além de ocorrer uma redução expressiva na espessura da parede celular das fibras, essas demonstram um aspecto vítreo e quebradiço. Essa diminuição na espessura da parede é um dos fatores que explicam a menor densidade do carvão vegetal em relação da madeira, além da perda de massa, característica essa que tem elevada influência nas propriedades de resistência. Além disso, ainda de acordo com esse estudo, há formação de protuberâncias no interior dos raios, devido à degradação térmica do material, e grandes cavidades ou fendas ao longo dos raios na região do cerne, atribuídas ao rompimento de células, principalmente durante a liberação de gases dificultada pelos tilos presentes na região.

Costa (2016) ao avaliar quatro tratamentos térmicos de carbonizações, ou seja, temperaturas finais de 350°C, 450°C, 550°C e 700°C, observou uma diminuição da resistência à compressão do carvão, quando a temperatura de carbonização aumenta até 550 °C, com posterior aumento na propriedade a temperatura final de 700°C. Essa diminuição da resistência do carvão durante essa fase provavelmente ocorre devido a elevada extração de voláteis e perda de massa durante essa fase, tendo como consequência um aumento na porosidade do carvão, pois segundo Andrade e Della Lucia (1995), a essas temperaturas o carvão não sofre contrações significativas.

Ao avaliar a influência da granulometria do carvão na geração de finos, observa-se que os tratamentos que geraram mais finos foram os que utilizaram carvão com faixa granulométrica 12,7 e 19,5 mm.

Esse fato também foi observado por Kurauchi (2014), avaliando resistência mecânica de carvão vegetal, a partir de compressão de amostras compostas por peças de carvão nas granulometrias de 25,4 a 31,7 e 22,2 a 25,4 mm, utilizando uma máquina de ensaio universal. Para a faixa granulométrica de 25,4 a 31,7 mm, ele encontrou, após o

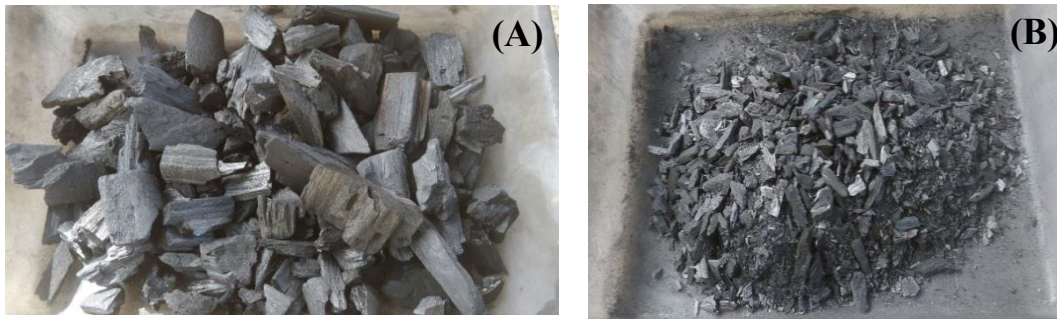
ensaio, cerca de 15% de finos, quando aplicada 1 t de força e 22,5% de finos para força de 1,4 t. Para os ensaios utilizando carvão com granulometria entre 22,2 a 25,4 mm e força de 1 t ele encontrou 18% de finos e para a força de 1,4 t, 20% de finos.

Veiga et al., (2016), ao avaliarem as propriedades mecânicas do carvão de *Eucalyptus* sp, utilizando corpos de prova de diferentes dimensões, com seção transversal de 25 mm x 25 mm e comprimentos equivalentes a 50 mm, 75 mm, 100 mm e 125 mm, para a realização dos ensaios de compressão paralela às fibras observaram uma diminuição no módulo de elasticidade e na resistência à compressão do carvão vegetal, com a redução nas dimensões longitudinais dos corpos-de-prova.

Uma justificativa para isso seria a energia necessária para compressão de carvão de diferentes granulometrias. A pressão é definida como a força (F) aplicada em uma determinada superfície (área A), sendo assim quando se diminui a área de contato em que se está aplicando uma mesma força, ou seja, peças de carvão de menor granulometria, a pressão no sistema aumenta, ocasionando maior ruptura da amostra. O mesmo foi observado por Assis et al. (2016), ao estudar o efeito da granulometria no ensaio de compressão em leitos de carvão, observou que quanto maior a granulometria, maior era a energia demandada no processo para atingir a tensão de ruptura, ou seja, peças maiores eram mais resistentes à compressão para uma mesma força de compressão.

Além disso, uma amostra de carvão de menor granulometria apresenta maior área superficial específica, ou seja, mais pontos de contato entre as peças de carvão, sobre pressão durante o ensaio, favorecendo a maior friabilidade desse material.

Salienta-se que o ensaio de compressão aplicado a este estudo foi realizado em leito de carvão, com o carvão depositado de forma aleatória no interior do recipiente, logo, as peças de carvão foram submetidas à aplicação de carga em diversos sentidos e não apenas no sentido paralelo às fibras do carvão. Observa-se na Figura 3, que as peças de carvão se romperam e quebraram em diferentes regiões, gerando fragmentos em diferentes tamanhos e proporções,. O mesmo comportamento foi observado por Chabal (1988), Kurauchi (2014) e Assis (2016).



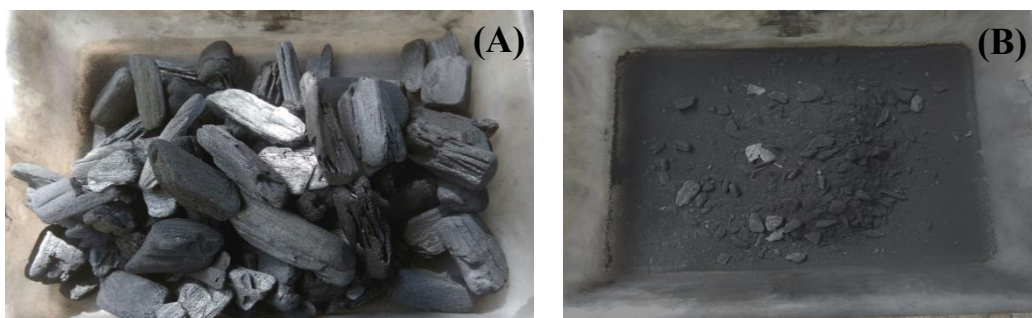
**Figura 3.** (A) Carvão vegetal antes do ensaio (B) Carvão vegetal após o ensaio com força de compressão de 2 t.

Verificou-se também, que os tratamentos realizados com força de compressão de 1 t nas maiores faixas granulométricas não diferiram significativamente da testemunha (teste de tamboramento) pelo teste Dunnett a 95% de probabilidade, exceto as granulometrias entre 12,7 e 19,5 mm. O valor médio para friabilidade da testemunha foi de 14,95% e os tratamentos, que não apresentaram diferença significativa variaram de 15,92 a 18,71%.

A friabilidade do carvão vegetal é frequentemente medida em testes de tamboramento, sendo que os valores de resistência obtidos estão relacionados com a porcentagem de massa que passa e/ou é retida em uma determinada peneira, após o ensaio, sendo a resistência definida como a capacidade desse material em resistir à fragmentação quando solicitado mecanicamente (impacto e/ou abrasão) em um tambor rotativo, simulando o transporte e manuseio do carvão vegetal, sem promover a compressão da amostra.

A fragmentação do carvão vegetal ocorre devido ao rompimento de fissuras e trincas preexistentes no material, inerentes ao processo de carbonização, e também por abrasão das peças, sendo que os dois fatores colaboram para geração de finos.

Na Figura 4 nota-se que a fração de finos gerados após o ensaio de tamboramento, na sua maioria, é composta apenas por pó de carvão vegetal e a fração granular apresenta um aspecto arredondado. Isso demonstra que as peças de carvão submetidas ao tamboramento sob uma velocidade de 30 rpm, sofreram apenas um “polimento” devido a abrasão das peças e pela fragmentação superficial das mesmas.



**Figura 4.** (A) Fração carvão vegetal após o ensaio de tamboramento; (B) Fração finos após o ensaio de tamboramento.

A fragmentação superficial pode ser explicada com a utilização da teoria da degradação parcial, a qual ocorre por atuação de forças de pequena magnitude e aleatórias, que, embora não sejam capazes de promover a fissuração do “núcleo” do material, produz uma fragmentação localizada, com isso tem-se uma distribuição bimodal do tamanho de partícula, uma parte correspondente às partículas desprendidas superficialmente (de tamanho muito inferior à partícula inicial) e a outra à partícula remanescente, que possui o tamanho próximo ao inicial, antes da fissuração superficial (SILVA, 2016).

Isso justifica a menor geração de finos pelo teste de tamboramento em relação ao ensaio realizado na PHM, principalmente quando elevou-se a força de compressão aplicada.

Na Tabela 8 é apresentada a classificação do carvão vegetal de acordo com sua friabilidade, em função dos tratamentos, segundo Oliveira et al. (1982).

**Tabela 8** - Classificação do carvão vegetal de acordo com sua friabilidade, segundo Oliveira et al. (1982), em função dos tratamentos

Força (ton)	Granulometria (mm)			
	12,7-19,5	19,5-25,4	25,4-31,7	31,7-50,8
1	BF	FM*	FM*	FM*
1,5	MF	BF	BF	BF
2	MF	FM	FM	MF
3	MF	MF	MF	MF
5	MF	MF	MF	MF
<b>Testemunha</b>	PF			

Onde: MF: Muito friável; BF: Bastante friável; FM: Friabilidade média; PF: Pouco friável. \*: tratamentos que não difeririam estatisticamente da testemunha, pelo teste Dunnett, ao nível de 95% de probabilidade.

O carvão vegetal foi classificado como pouco friável pelo ensaio de tamboramento (testemunha). Entretanto, os tratamentos que não se diferenciaram da testemunha pelo teste de Dunnet, a 95% de probabilidade, foram classificados como carvão de friabilidade média. Vale salientar, que essa classificação não envolve testes

estatísticos sobre os resultados e sim uma classificação em faixas percentuais para o valor de friabilidade, onde maiores percentuais indicam carvões mais friáveis.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios da velocidade de aplicação de força (mm/s) em função dos tratamentos. A análise de variância indicou que a velocidade da aplicação de força do ensaio teve efeito apenas da força de compressão.

**Tabela 9** - Valores médios da velocidade de aplicação de força (mm/s) em função dos tratamentos

Força (ton)	Granulometria (mm)				Média
	12,7-19,5	19,5-25,4	25,4-31,7	31,7-50,8	
1	1,04	1,01	1,03	1,00	1,02 A
1,5	0,97	0,97	0,96	0,95	0,96 B
2	0,89	0,90	0,90	0,89	0,90 C
3	0,72	0,73	0,72	0,74	0,73 D
5	0,68	0,66	0,67	0,67	0,67 E
<b>Média</b>	0,84	0,83	0,84	0,83	0,84

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna (forças), não diferem entre si pelo teste Tukey.

Observa-se que quanto maior a força de compressão menor a velocidade média de ensaio, com valores médios variando de 0,67 a 1,02 mm/s. Isso ocorreu, provavelmente pois para atingir uma maior aplicação de força de compressão, para uma mesma área (recipiente), maior se torna a pressão do sistema. Isso se deve ao maior esforço do operador para atingir a pressão que o sistema necessitava, gastando mais tempo para uma mesma distância percorrida pelo pistão.

O tempo médio para a realização dos ensaios na PHM foi de 1,32 min incluindo o tempo de permanência da amostra de carvão sobre pressão no recipiente cilíndrico, de um minuto. O ensaio realizado a partir do teste de tamboramento teve tempo médio de 17 min de rotação dentro do tambor, ou seja, ao se realizar o ensaio a partir da PHM têm-se uma diminuição de cerca de 92% do tempo para realização do ensaio de friabilidade do carvão vegetal.

Mesmo que o teste de tamboramento não reflita com exatidão todos os esforços submetidos ao carvão vegetal, o teste reproduz ao menos os mecanismos pelos quais ocorre a degradação de tal insumo siderúrgico, haja vista a importância de se avaliar a resistência do carvão frente à fragmentação mecânica, mesmo que superficial, pois esse está diretamente relacionado com a permeabilidade do alto-forno, influenciando na velocidade de reação (VIEIRA, 2009; VEIGA et al., 2016). Além disso, a única normativa com algum caráter de propriedade mecânica é baseada nessa metodologia.

Visto isso, os parâmetros de utilização recomendados para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal em prensa hidráulica manual foram aqueles que quando comparados com o teste de tamboramento não apresentaram diferenças significativas, sendo eles força de compressão de 1 t, granulometria de 19,5 a 25,4, 25,4 a 31,7 e 31,7 a 50,8 mm, velocidade média de aplicação de força de aproximadamente 1 mm/s e tempo de permanência do carvão sobre pressão de 1 min.

## 5.2. Influência da densidade do carvão vegetal na sua resistência mecânica

Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios da geração de finos de carvão vegetal gerado nos ensaios em função dos tratamentos.

**Tabela 10** - Valores médios da geração de finos de carvão vegetal em função dos tratamentos

Classe de DG (Kg/m <sup>3</sup> )	Metodologia		Média
	PHM	Tamboramento	
180 ± 2	19,55 Ba	13,44 Bb	16,50
170 ± 2	18,49 Ba	13,25 Bb	15,87
160 ± 2	23,95 Aa	15,09 Ab	19,52
<b>Média</b>	20,70	13,92	17,30

Onde: Médias seguidas de mesmas letras minúsculas na mesma linha (metodologia) e maiúsculas na mesma coluna (classe de densidade a granel), não diferem entre si pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade.

Observa-se que o carvão com menor densidade a granel apresentou a maior geração de finos, independente da metodologia utilizada, com valores médios de 20,70% para o ensaio utilizando a PHM e 13,92% para o ensaio de tamboramento. O carvão vegetal, para as três classes, foi classificado como friabilidade média e pouco friável, para a metodologia PHM e tamboramento, respectivamente, segundo a classificação do Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), citado por Oliveira et al. (1982).

O aumento da densidade a granel de 160 para 170 Kg/m<sup>3</sup> reduziu em 19% a geração de finos. Os resultados encontrados para a friabilidade estão de acordo com o descrito por Couto et al., (2015) onde carvão vegetal de maior densidade tende a suportar maior tensão. Ainda segundo os autores, maior resistência encontrada para carvões de maior densidade ocorre, possivelmente, devido a um maior número de cadeias carbônicas por unidade de volume presente em carvão de maior densidade, além disso, um carvão mais denso, geralmente, apresenta menor quantidade de trincas e

fissuras visualmente, o que possivelmente contribui com a melhoria das suas propriedades mecânicas.

Entretanto, Pinheiro (2013) ao avaliar a influência das dimensões da madeira nas propriedades do carvão vegetal, observou que mesmo com o aumento da densidade do carvão, quando utilizando madeiras com maior diâmetro, houve diminuição na resistência do mesmo, provavelmente devido as maiores área de cerne, apresentando menor permeabilidade do tecido, sendo uma região mais propícia à formação de trincas e fissuras durante a carbonização, pela saída de gases, ocasionando maior geração de finos. O mesmo autor encontrou friabilidade média de 18,17% para a mesma classe diamétrica utilizada neste estudo, para um carvão com densidade a granel de 193,50 Kg/cm<sup>3</sup>.

Além disso, tem-se observado um aumento da resistência mecânica do carvão no sentido base-topo da árvore, apesar do decréscimo da sua densidade (MOUTINHO, 2013). Apesar da resistência do carvão estar associada de maneira significativa à densidade do carvão, não se pode tomá-la como único parâmetro de observação, pois diversos outros fatores, podem ajudar a compreender o comportamento das propriedades mecânicas no carvão vegetal.

As propriedades anatômicas da madeira sofrem algumas modificações durante o processo de carbonização. É evidente a alteração na parede celular das fibras, com expressiva redução da sua espessura e aspecto vítreo e quebradiço após a carbonização. Desse modo, é recomendado utilizar materiais genéticos com maior percentual de fibras e com alta fração parede para a produção de carvão vegetal, além disso, paredes celulares mais espessas contribuem também na diminuição da formação de cavidades ou fendas na seção transversal ao longo dos raios na região do cerne do carvão. Isto pode ser atribuído ao rompimento desse tipo de célula, principalmente durante a liberação de gases, em virtude da degradação de extrativos, que são dificultadas pelos tilos presentes na madeira do cerne, acarretando em perdas de resistência mecânica do carvão.

Há uma contração no diâmetro dos poros do carvão vegetal em relação à madeira, entretanto, a sua frequência é maior, contribuindo para a alta porosidade do carvão vegetal, em média 75%. Dessa forma, quanto maior a frequência dos poros, maior será a área ocupada por espaços vazios e não por massa, o que contribui para uma menor densidade do carvão e conseqüentemente menor resistência mecânica. (PEREIRA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2010).

Ao avaliar a influência da metodologia utilizada para determinação da geração de finos do carvão vegetal, observa-se que independente da classe de densidade a granel do carvão, o ensaio realizado na PHM gerou mais finos do carvão, quando comparados com o ensaio de tamboramento. Isso ocorreu provavelmente porque os ensaios avaliam a resistência do carvão submetido a diferentes esforços.

A metodologia de ensaio utilizando a PHM submete o carvão vegetal a um ensaio de compressão de leito de carvão, com aplicação de força em uma determinada área gerando uma pressão homogênea na amostra, o que causa a compactação e consequente esmagamento e trituração do carvão. Para realização desse ensaio utilizou-se uma mesma massa de carvão vegetal para cada uma das densidades, dessa forma quanto menor a densidade do carvão maior o volume ocupado no recipiente para realização do teste. Visto que pressão e volume são inversamente proporcionais, podemos afirmar que para o teste com carvão de menor densidade, ou seja, maior volume, maior foi a pressão aplicada no sistema, para uma mesma força de aplicação, causando assim maior fragmentação das peças de carvão e consequente maior geração de finos.

A fragmentação do carvão vegetal, nesse tipo de teste, ocorre devido à compressão do material até a sua ruptura, ocasionada principalmente devido as trincas preexistentes no material, inerentes ao processo de carbonização.

Essas trincas estão distribuídas em diversos pontos da peça, principalmente na parte central do carvão gerando fragmentos de diversos tamanhos. Além disso, uma porção finos é gerada nesse tipo de teste, decorrente da degradação por abrasão dependente da facilidade que a peça tem de se degradar por atrito, comportamento também observado por Kurauchi (2014), que após comprimir uma amostra de peças de carvão encontrou cerca de 40% de fragmentos na granulometria original, 40% em granulometria intermediária e 20% de finos.

O mesmo foi observado por Assis (2016), que ao estudar a compressão de leitos de carvão, observou que há uma correlação negativa entre a proporção de carvão com granulometria superior a 8 mm e as faixas de granulometria abaixo desta, após a realização do ensaio. Esse fato leva à conclusão de que, para uma mesma força de compressão, menores proporções de fragmentos de carvão retidos em peneiras de malha de 8 mm, produzem uma maior proporção de fragmentos retidos em peneiras de malha menores de 8 mm, fração finos. Ainda segundo Assis (2016), um carvão de tamanho

médio de 20 mm ao ser comprimido até atingir a tensão de ruptura, gera cerca de 42% de fragmentos abaixo de 8 mm.

Durante o ensaio de tamboramento as peças de carvão sofrem dois tipos de esforço, atrito do carvão gerado pelo contato entre as peças e quebra devido a queda de no máximo 30 cm de altura gerada pela rotação do tambor. Esses esforços não são intensos o suficiente para causar a quebra das peças de carvão, causando quase sempre, apenas a fragmentação de suas arestas em pequenas lascas, o que é evidenciado pelo formato arredondado das peças na fração granular após o ensaio, na maioria das vezes composta por peças inteiras, enquanto que a fração finos é quase em totalidade composta por pó de carvão.

## 6. CONCLUSÕES

- Independente da faixa granulométrica do carvão vegetal, quanto maior a força de compressão maior a geração de finos.
- A faixa granulométrica de 12,7 a 19,5 mm apresentou maior geração de finos do carvão vegetal em relação às demais.
- Os parâmetros de ensaio recomendados para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal, utilizando prensa hidráulica manual, são força de compressão de 1 t e carvão na granulometria de 19,5 a 25,4, 25,4 a 31,7 e 31,7 a 50,8 mm;
- Observa-se um aumento significativo médio de 19% na geração de finos do carvão vegetal com a redução da densidade de 170 para 160 Kg/m<sup>3</sup>.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M. D. -+U. I.; PASSOS, P. R. D. A.; MARQUES, L. G. D. C. U. C. I.; OLIVEIRA, L. B. U. C. I.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera Limn*) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 5, p. 707-714, 2004.

ANDRADE, A. M.; DELLA LUCIA, R. Avaliação da higroscopicidade do carvão vegetal e dos seus efeitos na resistência ao esmagamento. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 2, p. 19–26, 1995.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, New York, v. 1, n. 3, p. 1-18, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: cálculo e execução de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1982. 22p

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7993** - Madeira - determinação da umidade por secagem em estufa reduzida a serragem - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**: Carvão vegetal - Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981, 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8740**: Carvão vegetal: Determinação do índice de quebra e abrasão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8997**: Coque - Ensaio de tambor "Micum" - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 4p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9165**: Carvão vegetal: Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.

BLANKENHORN, P. R.; JENKINS, G. M.; KLINE, D. E. Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 4, n. 3, p. 212-224, Jan. 1972.

BOTREL, M. C. G. **Melhoramento genético do *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade do carvão vegetal**. 2006. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n.3, p. 391-398, 2007.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **Piracicaba: IPEF**, 1993.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. **In a Brazilian beehive kiln**. Industrial Crops and Products, Washington, US, v. 42, p. 169–174, 2013.

CARNEIRO, A. D. C. O; VITAL, B. R; FREDERICO, P. G. U; FIGUEIRÓ, C. G; FIALHO, L. F; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n. 3, p. 127 – 135, 2017.

CARVALHO JÚNIOR, R.M. **Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalga por metanólise in situ**. 2010. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CHABAL, L. L'étude palaeoecologique des sites protohistorique a partir des charbons de bois: la question de l'unité de mesure et du nombre des fragments ou pesées. In: HACKENS, T. ; MUNAUT, A. V. ; TILL, C. (Ed.). **Wood and archaeology**. Strasbourg : Conseil de l'Europe, 1988. p. 189–205.

CHRZAZVEZ, J; THÉRY-PARISOT, I; FIORUCCI, G; TERRAL, J. F; THIBAUT, B. Impact of post-depositional processes on charcoal fragmentation and archaeobotanical implications: Experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics. **Journal of Archaeological Science**, New York, v. 44, p. 30-42, 2014.

COSTA, A. C. S; LEAL, C. S; SANTOS, L. C; CARVALHO, A. M. M. L; OLIVEIRA, A. C; PEREIRA, B. L. C. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus*

camaldulensis. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n. 1, 2017.

COSTA, L. J. **Caracterização Mecânica do Carvão Vegetal de Clones de *Corymbia***. 2016. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

COUTO, A. M; TRUGILHO, P. F; NAPOLI, A; LIMA, J. T; SILVA, J. R. M; PAULA PROTÁSIO, T. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

DOAT, J.; PETROF, G. La carbonization des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v. 1, n. 159, p. 55-64, Jan./Feb. 1975.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Brasília, 2017. p 292. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf). Acesso em: 05 dez 2017.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC. 27- 41p. 1980.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES- IBÁ. **Relatório 2017: ano base 2016**. São Paulo, 2017. 77p. Disponível em: < [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)> Acesso em: 14 nov 2017.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. Z. Propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral, para a injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 353-363, 2004.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 77-89. 1982.

MOORE, G. R.; BLANKENHORN, P. R.; BEALL, F. C.; KLINE, D. E. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. **Wood and Fiber**, Madison, v. 6, n. 3, p. 193-199, 1974.

MOUTIMHO, V.H.P; **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalytus sp.* e *Corymbia sp.* na qualidade do carvão**. 2013. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos florestais) Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2013.

MÜLLER-HAGEDORN, M.; BOCKHORN, H; KREBS, L.; E MÜLLER, U. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.68, n.1, p.231-249, 2003.

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

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**, Paraná, v. 4, n. 3, p 102-111, 2015.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semiárido nordestino**. 2003. 122 p. Tese (Doutorado em Ciencia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M.R. **Carvão vegetal-destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. Belo Horizonte. 173p. 1982.

OLIVEIRA, J. T. S; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

PEREIRA, B. L. C; CARNEIRO, A. C. O; CARVALHO, A. M. M. L; TRUGILHO, P. F; MELO, I. C. N.A; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

PEREIRA, B. L. C; CARVALHO, A. M. M. L; OLIVEIRA, A. C; SANTOS, L. C; CARNEIRO, A. C. O; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557. 2016.

PEREIRA, M. P. D. C. F. **Decomposição térmica e biológica de cavacos de *Eucalyptus urophylla***. 2017. 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

PIMENTA, A, S; BARCELLOS, D. C. Curso de atualização em carvão vegetal. **Centro de Produções técnicas–CPT**, 2000.

PINHEIRO, M. A. **Influência da dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINHEIRO, P. C. C; SAMPAIO, R; REZENDE, M. E. A; VIANA, E. (2006). **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte, p. 215-236. 2006.

PROTÁSIO, T.P; GOULART, S. L; NEVES, T. A; TRUGILHO, P. F; RAMALHO, F. M. G; BRITES, L. M. R. S. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

QUIRINO, W. F; VALE, A. T; ANDRADE, A. D; ABREU, V. L. S; AZEVEDO, A. D. S. 2004. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.

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**, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, 2011.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p.121-138. 2005.

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. 2008.

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, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

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

SANTOS, R.C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 p. Tese (Doutorado em em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A. V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v.82, p. 39-45, 2010.

SILVA, A. M. B. **Estudo da degradação mecânica de pequenas quantidades de coque em testes de tamboreamento**. 2016. 110 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS - SINDIFER. **Anuário Estatístico**. Belo Horizonte, 2016. 24p. Disponível em: <[http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario\\_2016.pdf](http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2016.pdf)> Acesso em: 14 nov 2017.

STATSOFT INC. **Statistica data analysis system version 8.0**. Tulsa: Statsoft Inc., 2007.

TAN, Z.; LAGERKVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.

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

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. 32 N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2014.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, v. 25, n. 1, p. 89- 95, jan./fev. 2001.

VEIGA, T. R. L. A., LIMA, J. T., MONTEIRO, T. C., ROCHA, M. F. V., DE JESUS, M. S., & GOULART, S. L. Efeito do comprimento do corpo de prova nas propriedades mecânicas do carvão de *Eucalyptus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 399-403, 2016.

VIEIRA, R. S. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de Eucalyptus e do carvão vegetal produzido entre 350°C e 900°C**. 2009. 80 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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