

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E  
MUCURI – UFVJM

MARCELINO BREGUEZ GONÇALVES SOBRINHO

CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO  
VEGETAL DE *Eucalyptus sp.*, NA PRODUÇÃO DE FERRO SILÍCIO

DIAMANTINA - MG  
2016

MACELINO BREGUEZ GONÇALVES SOBRINHO

CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO  
VEGETAL DE *Eucalyptus sp.*, NA PRODUÇÃO DE FERRO SILÍCIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Márcio Pinto Leite

DIAMANTINA – MG  
2016

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM  
Bibliotecário Anderson César de Oliveira Silva, CRB6 – 2618.

G635c      Gonçalves Sobrinho, Marcelino Breguez  
              Correlação entre as propriedades físicas do carvão vegetal de  
              Eucalyptus sp. na produção de ferro silício / Marcelino  
              Breguez Gonçalves Sobrinho. – Diamantina, 2016.  
              37 p.

              Orientador: Angelo Marcio Pinto Leite

              Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência  
              Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e  
              Mucuri.

              1. Carvão vegetal. 2. Ferro ligas. 3. Qualidade. I. Título.  
              II. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

**CDD 634.973**

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO  
VEGETAL DE *Eucalyptus sp.*, NA PRODUÇÃO DE FERRO SILÍCIO

Marcelino Breguez Gonçalves Sobrinho

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em manejo florestal, para a obtenção do título de “Mestre”.

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Juliana Jerásio Bianche- IFMG

---

Prof. Dr. Sidney Araújo Cordeiro - UFVJM

---

Prof. Dr. Angêlo Márcio Pinto Leite - UFVJM

Orientador

DIAMANTINA/MG

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por me dar a vida e permitir que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais Maria Auxiliadora e Marcos Antônio. Em especial a minha mãe, pelo amor e apoio incondicional em minhas escolhas.

Ao meu irmão Marcus Vinicius por estar sempre por perto, mesmo estando longe.

À toda minha família que sempre torceu por mim.

Ao Professor Angêlo pela orientação no mestrado.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pelos anos de aprendizado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal.

À minha banca examinadora Juliana Biache e Sidney Araújo, por aceitarem estar aqui.

À empresa pela concessão dos dados para a pesquisa.

Aos meus antigos amigos, Renato, Gustavo, Marquinhos, Kíssia, Mariana, Laélia e Mainha, por estarem sempre dispostos a me ouvir e apoiar.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, em especial ao Igor, Kaio, Karyn, Ju, Ludmila, Paula, Eládio e Letícia, por estarem sempre comigo. Levarei vocês por toda a vida.

À CAPES, pelo auxílio da bolsa de mestrado.

Minha gratidão e muito obrigado a todos.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Geral .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Carvão Vegetal.....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 Ferro – Silício .....</b>	<b>5</b>
<b>3.3 Qualidade do Carvão Vegetal Para Produção de Ferro Ligas.....</b>	<b>5</b>
<b>3.4 Densidade do Carvão Vegetal.....</b>	<b>7</b>
<b>3.5 Friabilidade do Carvão Vegetal .....</b>	<b>8</b>
<b>3.6 Tamanho Médio das Partículas.....</b>	<b>9</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>10</b>
<b>4.2 Descrição dos Dados Utilizados .....</b>	<b>11</b>
<b>4.3 Identificação das Amostras.....</b>	<b>11</b>
<b>4.4 Coleta do Carvão Vegetal .....</b>	<b>13</b>
<b>4.5 Determinação da Densidade a Granel do Carvão Vegetal .....</b>	<b>13</b>
<b>4.6 Determinação do Tamanho Médio das Partículas.....</b>	<b>14</b>
<b>4.7 Determinação do Teor de Finos .....</b>	<b>16</b>
<b>4.8 Análise Estatística.....</b>	<b>16</b>

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Propriedades Físicas do Carvão Vegetal .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.1 Tamanho Médio das Partículas.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.2 Teor de Finos.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1.3 Densidade a Granel .....</b>	<b>19</b>
<b>5.2 Relações Entre as Propriedades Físicas .....</b>	<b>20</b>
<b>5.2.1 Densidade a Granel x Tamanho Médio das Partículas .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2.2 Teor de Finos x Tamanho Médio das Partículas .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2.3 Teor de Finos x Densidade a Granel.....</b>	<b>23</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>24</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>25</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área estudada.....	11
Figura 2: (a) Carvão vegetal estocado no pátio da unidade de produção antes do transporte para a fábrica, (b) unidade de produção de carvão vegetal. ....	12
Figura 3: Carvão vegetal sendo descarregado na fábrica após o transporte.....	12
Figura 4: Pá de metal e “bombona plástica” com capacidade de 200 litros para coleta do carvão vegetal.....	13
Figura 5: Agitador de peneiras .....	15
Figura 6: (a) Peneiras com diferentes granulometrias, (b) carvão vegetal retido nas peneiras com tamanhos de partículas diferentes.....	15
Figura 7: Finos de carvão vegetal com granulometria menor que 9,52mm. À esquerda material retido na peneira de 6,32mm e a direita material retido no fundo.....	16
Figura 8: Resultados do tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos.....	17
Figura 9: Resultados do teor de finos (%) de carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos. ....	18
Figura 10: Resultados da densidade a granel ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) do carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos. ....	20
Figura 11: Gráfico da dispersão entre a densidade a granel ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) e o tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal analisado em laboratório.....	22
Figura 12: Gráfico da dispersão entre o teor de finos (%) e o tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal analisado em laboratório.....	23
Figura 13: Gráfico da dispersão entre a densidade a granel ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) e o teor de finos (%) do carvão vegetal analisado em laboratório. ....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios das propriedades físicas do carvão vegetal. Tamanho médio das partículas (mm), teor de finos (%) e densidade a granel ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).....	20
Tabela 2: Matriz de correlação entre as variáveis analisadas do carvão vegetal.....	21

## RESUMO

SOBRINHO, Marcelino Breguez Gonçalves. **Correlação entre as propriedades físicas do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.*, destinado a produção de ferro silício em diferentes cenários**, 2016 / 37p. (Dissertação- M. Sc. em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2016.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo que os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. Um carvão vegetal de boa qualidade para a produção de ferro-ligas deve apresentar densidade a granel acima de  $250 \text{ Kg.m}^{-3}$ , carbono fixo em torno de 75%, teor de cinzas abaixo de 1%, aproximadamente 25% de materiais voláteis, teor de umidade abaixo de 6%, baixo teor de finos e com boa resistência mecânica. Estas propriedades físicas, químicas e mecânicas diminuem o custo e aumenta a qualidade das ligas de ferro. Objetivou-se com essa pesquisa avaliar as propriedades físicas do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.* e, a influência da qualidade deste na produção de ferro ligas. Foram analisadas amostras desta matéria prima em cenários diferentes para avaliar sua qualidade. Um cenário o carvão vegetal era transportado em estrada de terra e no outro em estrada pavimentada. A pesquisa foi realizada no laboratório de qualidade de carvão vegetal em uma empresa do litoral norte baiano. Determinou-se a densidade a granel ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ), o tamanho médio das partículas (mm) e o teor de finos (%) do carvão vegetal. Os testes e as coletas foram executados de acordo com as respectivas normas da ABNT. As avaliações mostraram que a qualidade do carvão vegetal quanto às suas propriedades físicas são alteradas pelo manuseio e transporte do produto até a fábrica na metalurgia. Em relação ao transporte da matéria prima em estrada de terra e asfalto não ocorreu diferença impactante de uma para outra. Logo, torna-se interessante padronizar o manuseio e a carbonização para que o carvão vegetal sofra menos quedas pois, a geração de finos foi bastante representativa.

Palavras – chaves: carvão vegetal, ferro ligas, qualidade.

## ABSTRACT

SOBRINHO, Marcelino Breguez Gonçalves. **Correlation between the physical properties of wood charcoal *Eucalyptus sp.*, in ferrosilicon production**, 2016 / 37p. (Dissertation-M.Sc. in Forest Sciences) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2016.

Brazil is the largest producer of wood charcoal, and the main consumers are the sectors iron industries, steel and ferroalloys and, to a lesser extent, trade and residential consumers. The quality of charcoal depends directly on the physical, chemical and anatomical wood that originated it. A good quality wood charcoal for the production of ferroalloys must provide bulk density above 250 kg.m<sup>-3</sup>, fixed carbon about 75%, ash content below 1%, approximately 25% volatiles, moisture content below 6%, low fines content and good mechanical strength. These physical, chemical and mechanical properties decrease the cost and increase the quality of ferroalloys. The Brazilian segment of ferroalloys is fairly diverse and occupies a prominent position on the world stage. Among the factors that led to this condition relates to the availability of raw materials. We aimed to evaluate the quality of the wood charcoal used in the production of ferroalloys. Wood charcoal samples were evaluated in different canaries to assess their quality. The survey was conducted in wood charcoal quality laboratory in a company of Bahia north coast. It was determined bulk density (kg.m<sup>-3</sup>), the average particle size (mm) and a fines content (%). The evaluations showed that the quality of the physical properties of wood charcoal are changed by handling and transportation of the product to the plant in metallurgy. The transport on dirt road and asphalt was not an impressive point. Therefore, the greater the resistance charcoal, less impact its physical properties will suffer.

Key – words: wood charcoal, ferroalloys, quality.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo que os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral, pois é renovável, menos poluente, praticamente isento de enxofre/fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (ABRAF, 2013).

No Brasil, o carvão vegetal é uma fonte energética de grande importância pelo seu caráter renovável e pela sua importância histórica e econômica. O carvão vegetal é um produto sólido de cor negra, friável, possuindo densidade a granel na faixa de 180 a 300 kg.m<sup>-3</sup>. A densidade e a composição química do carvão vegetal dependem da madeira que lhe deu origem e, além disso, os tamanhos dos pedaços ou a granulometria podem variar em função dos parâmetros da carbonização.

Segundo a empresa na qual o trabalho foi desenvolvido, um carvão vegetal de boa qualidade para a produção de ferro-ligas deve apresentar densidade a granel acima de 250 Kg.m<sup>-3</sup>, carbono fixo em torno de 75%, teor de cinzas abaixo de 1%, aproximadamente 25% de materiais voláteis, teor de umidade abaixo de 6%, baixo teor de finos<sup>1</sup> e com boa resistência mecânica. Estas propriedades físicas, químicas e mecânicas diminuem o custo e aumenta a qualidade das ligas de ferro.

Ferro-ligas são produtos intermediários onde além do elemento de liga, contém quantidades significativas de ferro. Esta característica direciona este tipo de produto para aplicações onde a presença do ferro não é preferencial. O segmento brasileiro de ferro-ligas é razoavelmente diversificado e ocupa uma posição de destaque no cenário mundial. Dentre os fatores que conduziram a esta condição relaciona-se a disponibilidade de matérias primas com qualidade e custo convenientes, a distribuição/localização favorável das jazidas, a disponibilidade de energia elétrica e o grande crescimento do mercado interno, decorrente da expansão do segmento siderúrgico. As ligas de silício são classificadas em função do seu teor em silício.

A densidade do carvão vegetal é um fator que se destaca diretamente com a produtividade do alto-forno. Entre suas influências destaca-se, sobretudo, o fato de que a

---

<sup>1</sup> Material considerado como resíduo no processo de carbonização, que apresenta granulometria inferior a 9,52mm.

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 requeridos. Portanto, não havendo prejuízo às outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível (ABM, 1975).

A menor resistência mecânica do carvão leva a uma maior degradação do material devido à geração de finos. No interior do forno esta provoca queda na permeabilidade, comprometendo sua produtividade, além de prejudicar a qualidade da liga e aumentar o consumo de carvão vegetal para produção das ligas. Para o carvão vegetal a alternativa para reduzir o efeito da sua baixa resistência mecânica sobre a permeabilidade da carga é segregá-lo em faixas granulométricas, pois quanto mais estreita a faixa granulométrica menor o efeito negativo de partículas menores.

A empresa onde foi realizada a pesquisa produz aproximadamente dez mil toneladas mensais de carvão vegetal utilizando madeira de *Eucalyptus* de reflorestamento para produzir o carvão que é utilizado como matéria prima na produção do ferro silício.

A falta de estudos nas propriedades físicas do carvão vegetal para a produção de ferro ligas, devido ao manuseio e transporte em nível operacional e, a influência destas propriedades físicas no custo final da liga, faz com que estudos neste sentido se tornem necessários para uma avaliação de todo o processo produtivo. O que torna o desenvolvimento desta pesquisa importante para o setor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Objetivou-se com este estudo avaliar as propriedades físicas do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.* antes deste ser manuseado e transportado para a metalurgia e, após o seu transporte até a fábrica para a produção do ferro silício, correlacionando as propriedades entre si.

### **2.2 Específicos**

- Determinar o tamanho médio das partículas em duas unidades de produção de carvão vegetal antes de seu transporte e, na metalurgia, após o seu transporte;

- Determinar a geração do teor de finos em duas unidades de produção de carvão vegetal nas mesmas condições anteriores;
- Determinar a densidade a granel do carvão vegetal em duas unidades de produção de carvão vegetal nas mesmas condições anteriores;
- Avaliar a relação entre propriedades físicas do carvão vegetal.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Carvão Vegetal**

A qualidade do carvão vegetal depende diretamente das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira que o originou. Propriedades tais como a densidade básica, os teores de lignina e de minerais, são as principais propriedades da madeira influentes na qualidade do carvão vegetal. Tais propriedades variam entre indivíduos de espécies distintas, em indivíduos de mesma espécie, em indivíduos de mesmo clone e, até mesmo, no interior de um fuste.

A madeira é composta basicamente de carbono, oxigênio, água, hidrogênio, nitrogênio e sais minerais (OLIVEIRA et al., 1980), constituindo-se num dos componentes da biomassa de maior uso energético por possuir características atraentes tais como produtividade, qualidade e massa específica adequada, além do seu baixo custo (PINHEIRO et al., 2006).

O carvão vegetal é proveniente da queima parcial da madeira. Na era primitiva, o homem utilizava pedaços de madeira em chamas para iluminar as cavernas ou aquecer-se. Possivelmente não tardou a perceber que, ao utilizar a madeira queimada, de aspecto preto e friável, esta não produzia chama e nem tanta fumaça, gerando calor de forma mais controlável que aquele produzido pela queima direta da madeira (JUVILLAR, 1980), marcando a descoberta do carvão vegetal e seu uso como combustível.

À medida que a evolução da humanidade acontecia, a utilização do carvão vegetal foi se tornando mais intensa. Substituído por combustíveis fósseis em alguns casos, em muitos lares de países subdesenvolvidos ainda é um combustível imprescindível, seja por motivos econômicos ou financeiros (GUARDABASSI, 2006).

O carvão vegetal é o produto sólido da decomposição térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio. O principal objetivo do processo de conversão da madeira em carvão vegetal é aumentar a concentração de carbono da fração sólida dos produtos resultantes do processo de carbonização. O resultado desse tratamento é a obtenção

de uma parte de carvão vegetal e, de outra parte, produtos voláteis, condensáveis ou não, denominados produtos da destilação da madeira.

O carvão vegetal produzido no mundo em 2012 foi de aproximadamente 50 milhões de toneladas. O Brasil foi responsável pela produção de 7,6 milhões deste total. Tal produção representou 15% da produção mundial de carvão vegetal em 2012 (FAO, 2014).

O eucalipto é uma das melhores opções para a produção de carvão vegetal, devido à rusticidade, produtividade e às características da madeira. Os reflorestamentos de eucalipto, planejados e manejados adequadamente, produzem árvores de troncos retos, uniformes e madeira com massa específica adequada para a obtenção de carvão de boa qualidade (PINHEIRO et al., 2006).

O uso energético da biomassa vem sendo valorizado como forma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, principalmente por ser uma fonte renovável.

Segundo Pinheiro et al., (2006), a carbonização é um processo em que a madeira é submetida a aquecimento entre 450 e 550 °C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de ar e, durante o qual, são liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos, principalmente, o alcatrão e o carvão vegetal.

Segundo Rezende (2006), o processo de carbonização do *Eucalyptus* ocorre em quatro fases:

- Fase I - Secagem: ocorre até 110 °C, quando apenas a umidade é liberada;
- Fase II - Torrefação: ocorre entre 110 e 250 °C, sendo que, na temperatura de 180 °C tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemicelulose. Pouco peso é perdido até 250 °C. Forma-se o tiço<sup>2</sup> ou madeira torrada;
- Fase III - Carbonização: ocorre entre 250 e 350 °C e, com a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose, ocorre expressiva perda de peso, formando-se gás, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350 °C, o carvão possui 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta;
- Fase IV - Fixação: dos 350 °C em diante, ocorre redução gradual na liberação de elementos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

---

<sup>2</sup> Madeira que não é totalmente carbonizada

De acordo com Sampaio et al., (2001), a carbonização é, então, a destilação da madeira que a transforma numa fração rica em carbono (o carvão vegetal) e, noutra fração composta por vapores e gases (alcatrão, piro lenhosos e gases não condensáveis).

### **3.2 Ferro – Silício**

O silício é utilizado como elemento de liga nas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas e, para que possa atingir aplicações mais “nobres” (de maior valor agregado), este deve passar por um processo de refinamento e purificação para a obtenção de outras formas (MENDES, 2003).

As ligas metálicas são materiais com propriedades metálicas que contêm dois ou mais elementos químicos, sendo que pelo menos um deles é metal. Há ligas formadas somente por metais e outras formadas por metais e semimetais (boro, silício, arsênio, antimônio). Apesar da grande variedade de metais existentes e variações de tipos de ligas, a maioria não é empregada em estado puro (LEITE et al., 2010).

Na maior parte das vezes recorre-se à liga para proporcionar aos metais determinadas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou anticorrosivas (FEMA, 2010). Ferro ligas são ligas que contem alta porcentagem de um ou mais metais, além de ferro (Fe), obtida pela fusão e redução de minérios contendo estes metais, sendo amplamente utilizadas pelas indústrias siderúrgicas para melhorar a qualidade do aço.

Portanto, as ferro-ligas como o próprio nome diz, são ligas de ferro com outros elementos químicos, como manganês, silício, cromo, níquel, nióbio, entre outros. Na siderurgia são matérias-primas fundamentais e sua falta impossibilitaria a produção de vários produtos siderúrgicos (LEITE et al., 2010; ABRAFE, 2013).

Segundo Mendes (2003), o silício produzido no Brasil é de ótima qualidade, sendo considerado um dos melhores do mundo, devido a alta qualidade da matéria-prima nacional (quartzo e carvão vegetal).

### **3.3 Qualidade do Carvão Vegetal para Produção de Ferro Ligas**

Um carvão vegetal considerado de boa qualidade para o uso industrial, deve apresentar parâmetros físicos, químicos e mecânicos que auxiliem, ou, até mesmo, sejam necessários às etapas do processo produtivo da liga de ferro. São basicamente quatro as funções desempenhadas pelo carvão vegetal no interior do alto forno siderúrgico: fornecimento de

energia na forma de calor, recuperação do poder reductor do dióxido de carbono, sustentação da carga do mineral e, possibilitar a percolação gasosa pelo leito. Logo, o carvão vegetal deve apresentar características tecnológicas compatíveis com as funções que o mesmo exerce durante o processo de termorredução do minério de ferro (COUTO, 2014).

As principais propriedades analisadas para avaliação da qualidade do carvão vegetal é determinada por suas propriedades físicas e químicas: densidade, poder calorífico superior, resistência mecânica ou friabilidade, umidade e composição química (carbono fixo, cinzas e materiais voláteis). Outras propriedades também são investigadas no carvão, visando determinar sua qualidade.

De acordo com Oliveira et al. (1982), as propriedades do carvão usualmente investigadas e utilizadas como parâmetros de qualidade são densidade, porosidade, poder calorífico superior, resistência mecânica, reatividade, rendimento gravimétrico e rendimento em líquido pirolenhoso.

De acordo com Santos (2008), para uso siderúrgico, teores ideais de cinzas presentes no carvão vegetal devem ser inferiores a 1% e, este teor varia entre 0,5% e 4%. A alta presença de cinzas no carvão vegetal pode indicar possível contaminação deste com resíduos do solo, não sendo desejável estas substâncias, pois além de reduzir o poder calorífico do produto, causa desgaste no alto-forno e pode comprometer a qualidade da liga, com consequentes formações de trincas e fissuras.

Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão vegetal para uso siderúrgico está compreendida entre 75% e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos alto-fornos, para o mesmo consumo desse termoreductor. Rocha & Klitzke (1998) dizem que o efeito da quantidade de carbono fixo num determinado carvão vegetal é refletido na utilização do forno por volume e, ressaltam que, quanto maior a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado no forno pelo carvão, restando mais espaço para o minério a ser reduzido.

O carvão vegetal é um insumo energético com propriedades físicas e químicas extremamente variáveis e, conseqüentemente, deve ser rotineiramente submetido a testes avaliativos de qualidade. No entanto, é necessário ressaltar que o termo “carvão de boa qualidade” é muito genérico, ou seja, para determinar a qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos, é necessário determinar a sua resistência, haja vista que, quanto menor a resistência, maior será a geração de finos e de pó (moinha) durante o manuseio, no transporte e na utilização dessa matéria prima (ANDRADE e DELLA LUCIA, 1995).

De modo geral, um carvão vegetal para uso siderúrgico deve ser fisicamente denso, pouco friável, de granulometria uniforme e suficientemente resistente.

### **3.4 Densidade do Carvão Vegetal**

Em se tratando de qualidade do carvão vegetal, a densidade é considerada um dos melhores índices. A densidade do carvão vegetal é afetada pela matéria-prima que o originou e pelo processo de carbonização, como a temperatura final e a taxa de aquecimento do processo.

Segundo Mendes et al., (1982), a densidade do carvão afeta diretamente as suas propriedades físicas, podendo variar em função da granulometria e da presença de trincas. Para Pimenta e Barcelos (2000), menor densidade do carvão vegetal tem como consequência uma menor utilização do volume no alto-forno. Esses mesmos autores relatam que, para uso siderúrgico, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível.

A densidade tem sido citada, por diversos autores como um dos parâmetros mais importantes em termos da determinação da qualidade do carvão vegetal. Algumas pesquisas têm reportado o estudo das correlações entre a densidade do carvão vegetal e a densidade da madeira que o originou, destacando-se os trabalhos de DOAT & PETROFF (1978), BRITO & BARRICHELO (1980) e BRITO et al., (1981).

No caso da utilização do carvão vegetal em siderurgia, a densidade é uma propriedade bastante importante, pois segundo (GOMES & 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.

Segundo Oliveira et al., (1982), existem três métodos para se expressar a densidade do carvão vegetal. Um primeiro método consiste em se determinar o peso do carvão contido em uma caixa com volume de 1 m<sup>3</sup>. A relação entre o peso obtido e o volume é denominada de densidade a granel, expressa em kg.m<sup>-3</sup>. O segundo método prevê a subtração do volume dos vazios entre os vários pedaços de carvão da medida realizada para densidade a granel. Mede-se assim, o volume dos vários pedaços considerando-se os poros internos como ocupados pelo material do carvão vegetal, o que se denomina densidade aparente. Por fim, a densidade verdadeira é a expressão do terceiro método que diz respeito à medida da densidade da

substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente descontando-se o volume da porosidade interna.

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 nos alto-fornos. As demais formas de expressão da densidade do carvão vegetal ficam quase que condicionadas a trabalhos acadêmicos de laboratório, por envolverem peças de carvão de menores dimensões e menores amostragens e, portanto, sem grande aplicação prática.

### **3.5 Friabilidade do Carvão Vegetal**

A geração de finos ocorre naturalmente devido a friabilidade do carvão vegetal, a qual é a propriedade associada à susceptibilidade do produto em se desfazer em finos quando submetido à abrasão e choques mecânicos. É afetada pela umidade, pelo diâmetro e pelo comprimento da madeira carbonizada (CARNEIRO et al., 2013).

Mendes et al., (1982) verificaram que a friabilidade, ou seja, a maior ou menor resistência do carvão vegetal a geração de finos esta relacionada com o condicionamento da madeira antes da carbonização a saber: umidade, diâmetro e comprimento. A carbonização rápida de madeira com maior teor de umidade tende a produzir carvão menos estável. Já é bastante conhecida a "influência do diâmetro da madeira na susceptibilidade de formação de trincas durante a carbonização. Tomando uma matéria mais frágil, durante o manuseio há maior produção de finos, bem como durante a carbonização. As trincas e fissuras internas do carvão constituem-se em zonas de concentração de tensão e, segundo Tarkow, citado por Mendes et al., (1982), a fonte de tais concentrações pode ser atribuída à grande impermeabilidade da região central, o cerne das peças de madeiras. O teste de tamboramento é normalmente utilizado para medida da friabilidade do carvão vegetal procura caracterizá-lo do ponto de vista da geração de finos, durante o seu manuseio. Este teste é importante, já que permite comparação entre carvão vegetal em diferentes etapas do processo que este é utilizado a partir de diferentes matérias primas e condições de carbonização. Com o teste de tamboramento podem estabelecer-se condições que, certamente irão produzir carvão mais ou menos friável (MENDES et al., 1982).

O carvão vegetal é altamente friável e, esta propriedade preocupa muito os profissionais envolvidos no seu processo de fabricação, transporte, estocagem e peneiramento

e, principalmente, aos seus consumidores, desde a indústria metalúrgica ao uso domiciliar (GOMES e OLIVEIRA, 1980).

Devido a sua alta friabilidade, o carvão vegetal sofre uma considerável degradação durante a sua produção e utilização, gerando uma grande quantidade de finos. Segundo Machado e Andrade (2004), no manuseio do carvão desde a produção até a sua entrada no alto forno são gerados em torno de 25% em peso de finos, abaixo de 9,52 mm de diâmetro. Diante da grande massa de carvão vegetal manuseada por uma indústria siderúrgica, essa elevada geração de finos ocasiona grande perda de material energético, pois estes apesar de estarem abaixo da granulometria especificada para utilização no alto-forno são ricos em carbono.

De acordo com OLIVEIRA (1977), quanto à friabilidade especialmente, em sendo o carvão vegetal altamente friável devido a fatores como processo de fabricação, estocagem, peneiramento, transporte e outros, a geração de finos desde a fabricação até sua utilização é da ordem de 25%, distribuídos da seguinte forma:

- nas carvoarias: 3,7%;
- carregamento e transporte: 5,8%;
- armazenamento: 6,3%; e
- peneiramento 9,4%.

Finos de carvão vegetal é um problema tanto para o alto-forno quanto para o rendimento total do processo. Parte dos finos não chega a ser utilizado no processo, se perdendo nas etapas de transporte e manuseio. No alto forno a geração de finos diminui a permeabilidade da carga, reduzindo a produtividade e comprometendo a operação adequada.

Uma das possibilidades de reaproveitamento desses finos de carvão corresponde a injeção nas ventaneiras dos altos-fornos siderúrgicos (MACHADO; ANDRADE, 2004), o uso como condicionante para substrato de mudas (SOUCHIE et al., 2011) e a briquetagem para possibilitar a aplicação como redutor em alto-fornos ou para a geração de energia (LUCENA et al., 2008; PEREIRA et al., 2008).

### **3.6 Tamanho Médio das Partículas**

O tamanho médio do carvão vegetal está usualmente relacionado com a permeabilidade da carga no alto-forno. Granulometrias muito baixas acarretam cargas com baixa permeabilidade, prejudicando a eficiência das reações metalúrgicas (PIMENTA, 2000).

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 de fluidização do reductor (BRITO, 1993). Dimensões maiores de um alto-forno exigem uma granulometria maior do carvão (PIMENTA, 2000).

O ensaio granulométrico tem a finalidade de verificar o tamanho médio do carvão e a proporção de finos existentes. O tamanho médio do granel do carvão vegetal é importante, pois está usualmente relacionado com a possibilidade de uso no alto-forno. Assim como um alto-forno de maior porte deve possuir uma carga melhor preparada, o tamanho médio do carvão deve ser maior do que o utilizado em fornos menores.

A distribuição granulométrica (ou tamanho médio) do carvão vegetal depende diretamente da sua resistência mecânica, principalmente abrasão e queda e, pode variar de acordo com a espécie e a metodologia de carbonização adotada.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Caracterização da Área de Estudo**

A pesquisa foi desenvolvida em áreas de produção de carvão vegetal com *Eucalyptus* sp., pertencentes a uma empresa de metalurgia situada no litoral norte da Bahia (latitude de 12° 25' 50" Sul e longitude de 38° 19' 40" Oeste). Nessa empresa são produzidas mensalmente aproximadamente 12.000 toneladas de carvão vegetal para fabricação do ferro silício.

O clima predominante na região é do tipo Aw (clima tropical úmido), segundo a classificação de Köppen, com um período de chuvas e outro de estiagem bem definidos. A precipitação média anual é de 1.500 mm e a temperatura média anual está entre 23 e 27°C.

Os solos predominantes da região são do tipo Latossolo Vermelho, com relevo plano a levemente ondulado, possuindo uma textura variando de argilosa a arenosa.

Na empresa existem 25 mil hectares de reflorestamento com *Eucalyptus* sp. de um total de 64 mil hectares de área, com os povoamentos distribuídos em nove (9) municípios baianos.

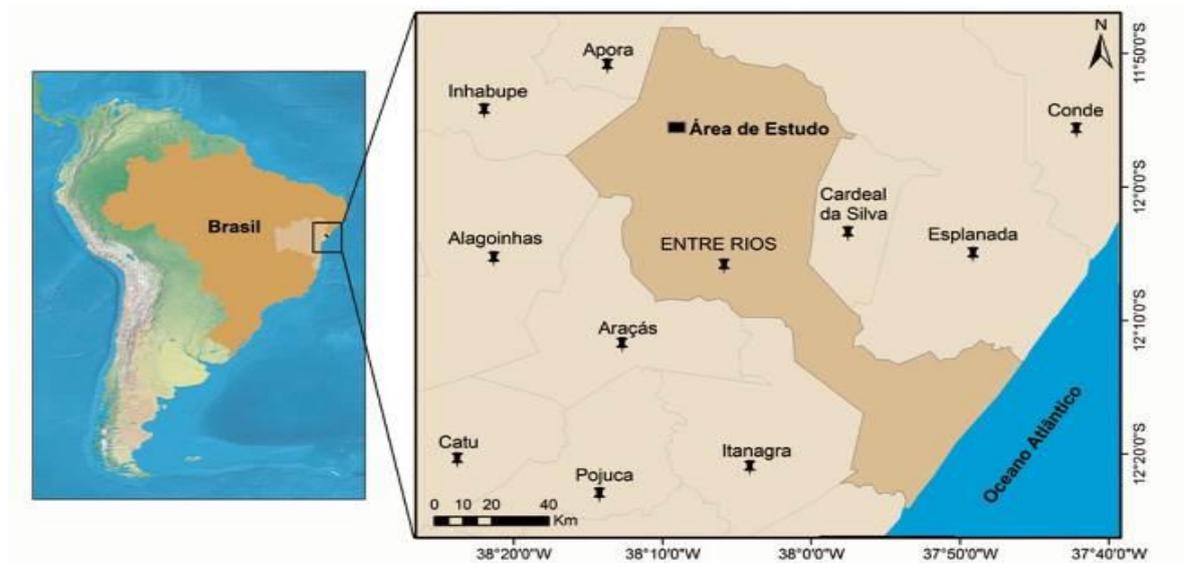


Figura 1: Localização da área estudada.

## 4.2 Descrição dos Dados Utilizados

Os dados utilizados foram provenientes das análises físicas de carvão vegetal realizadas no laboratório de qualidade do carvão vegetal da empresa.

Após a coleta, os materiais eram encaminhados para o laboratório onde foram determinadas suas propriedades físicas: densidade a granel, tamanho médio das partículas e teor de finos de acordo com as normas da ABNT.

## 4.3 Identificação das Amostras

O carvão vegetal analisado foi coletado em três locais diferentes. O material foi coletado em duas unidades de produção de carvão vegetal e na fábrica da metalurgia. As duas unidades de produção de carvão vegetal se diferenciam pelo fato de uma estar a 35 quilômetros distantes da fábrica e a outra a 100 quilômetros. A unidade que fica a 35 quilômetros, apresenta o trecho em estrada de terra. Já a outra unidade apresenta o trajeto todo em asfalto.

Assim, as amostras de carvão vegetal foram coletadas para serem analisadas no laboratório, antes e após o transporte do carvão vegetal. Antes do transporte o material foi coletado nas próprias unidades de produção de carvão vegetal. E após o transporte o carvão vegetal foi coletado na fábrica da metalurgia durante o descarregamento.

Os materiais foram identificados em quatro (4) tratamentos, sendo:

- Tratamento 1: Carvão vegetal coletado na unidade de produção distante 100 quilômetros da fábrica.

- Tratamento 2: Carvão vegetal coletado na fábrica da metalurgia vindo da unidade de produção distante a 100 quilômetros da fábrica.

- Tratamento 3: Carvão vegetal coletado na unidade de produção distante 35 quilômetros da fábrica.

- Tratamento 4: Carvão vegetal coletado na fábrica da metalurgia vindo da unidade de produção distante a 35 quilômetros da fábrica.

Em cada tratamento realizou-se (3) repetições. Cada repetição foi avaliada em dias diferentes da coleta dos materiais para amostrar o carvão vegetal produzido em diversas fornadas e em expedições da matéria prima para a fábrica em datas diferentes.



Figura 2: (a) Carvão vegetal estocado no pátio da unidade de produção antes do transporte para a fábrica, (b) unidade de produção de carvão vegetal.



Figura 3: Carvão vegetal sendo descarregado na fábrica após o transporte.

#### 4.4 Coleta do Carvão Vegetal

A amostragem do material foi realizada nas duas Unidades de Produção de Carvão Vegetal da empresa e, também, na fábrica da metalurgia.

O carvão vegetal utilizado para as análises físicas foi coletado ao longo das pilhas de estocagem dessa matéria prima no pátio das unidades de produção antes do transporte e após o transporte, durante o descarregamento dessa matéria prima na fábrica da metalurgia.

Utilizou-se uma pá de cabo longo, como determinado pela norma da ABNT, NBR 6923/1981. Foram coletadas amostras brutas de 200 litros. Utilizou-se “bombonas plásticas” com este volume. Cada amostra representa a produção de um forno.



Figura 4: Pá de metal e “bombona plástica” com capacidade de 200 litros para coleta do carvão vegetal.

#### 4.5 Determinação da Densidade a Granel do Carvão Vegetal

Para a determinação da densidade a granel do carvão vegetal obteve-se o peso deste contido em um recipiente com volume de 200 litros. Para evitar qualquer interferência, padronizou-se a determinação da densidade a granel. Após o material chegar no laboratório, o primeiro procedimento realizado com o material no laboratório é a determinação da densidade a granel. A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada de acordo com a equação abaixo:

$$D = \frac{M1 - M2}{V}$$

Onde:

D – Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)

M1 – Massa do carvão vegetal + Massa do recipiente (Kg)

M2 – Massa do recipiente (Kg)

V – Volume do recipiente (m<sup>3</sup>)

#### 4.6 Determinação do Tamanho Médio das Partículas

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma da ABNT NBR 7402/1982. Primeiramente, o carvão vegetal foi colocado na peneira superior do agitador de peneiras. Em seguida, o equipamento foi ligado durante 25 segundos e, então, cada fração do carvão retida nas respectivas peneiras foi pesada e calculada as percentagens que cada massa representava da massa inicial. Foram utilizadas onze peneiras com diferentes malhas mais o fundo (100mm, 76.20mm, 64.00mm, 50.00mm, 38.10mm, 32.00mm, 19.10mm, 12.70mm, 9.52mm, 6.32mm e o fundo). A equação utilizada para a determinação da granulometria foi a seguinte:

$$TM = ( B ( a - c ) + ( C ( b - d ) + ..... + L ( k - m ) + 100 x l ) x 0,005$$

em que:

TM= tamanho médio das partículas (mm);

a,b,c,d,...k,l,m. = abertura das malhas (mm);

A,B,C,D,...,K,L,M. = percentagens acumuladas (%).



Figura 5: Agitador de peneiras

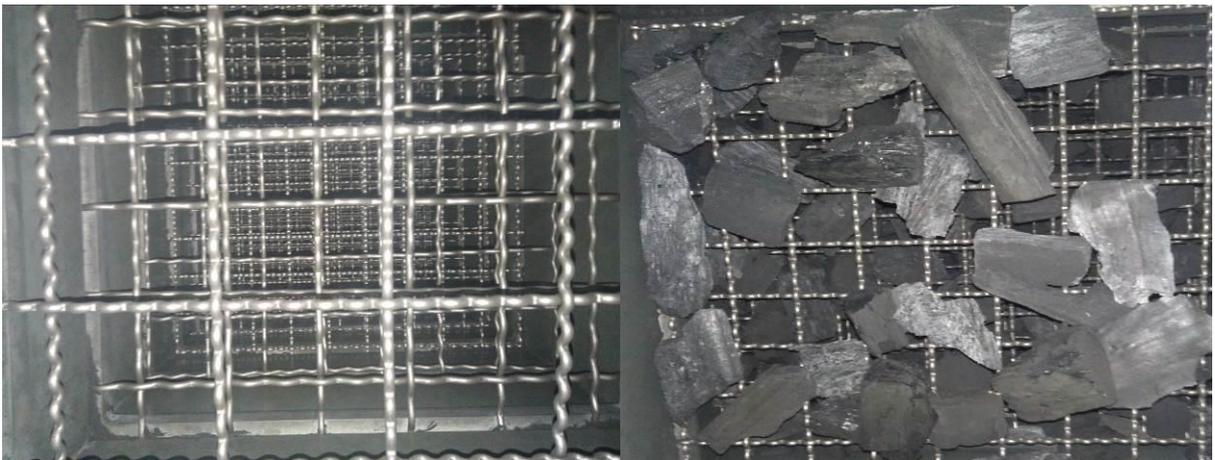


Figura 6: (a) Peneiras com diferentes granulometrias, (b) carvão vegetal retido nas peneiras com tamanhos de partículas diferentes.

#### 4.7 Determinação do Teor de Finos

Considerou-se como finos a fração do carvão que passou através de peneira de 9,52 mm de abertura, ou seja, o carvão vegetal retido na peneira de 6,32mm e no fundo são considerados finos. Para tanto foram peneiradas as amostras de carvão vegetal e, então, determinadas suas porcentagens de finos pela seguinte relação:

$$\text{Teor de finos (\%)} = 100 (\text{massa de finos/massa de carvão})$$

Toda a massa do carvão vegetal foi disposta sobre o conjunto de peneiras com onze granulometrias diferentes. O conjunto de peneiras foi agitado automaticamente durante 25 segundos. O material com granulometria menor que 9,52 mm foi pesado e calculado seu percentual em relação a massa total peneirada.



Figura 7: Finos de carvão vegetal com granulometria menor que 9,52mm. À esquerda material retido na peneira de 6,32mm e a direita material retido no fundo.

#### 4.8 Análise Estatística

As propriedades físicas do carvão vegetal foram analisadas estatisticamente utilizando o *software* RStudio versão 3.1.2.

Assim, os dados foram processados e submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o teste F e, quando a existência de diferença significativa entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de *Scott-Knott*, adotando-se o nível de significância igual a 5 %.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Propriedades Físicas do Carvão Vegetal

O tamanho médio das partículas, o teor de finos e a densidade a granel do carvão vegetal estão representados nas figuras 8, 9 e 10, respectivamente. Cada tratamento foi constituído por três repetições, a fim de se avaliar a qualidade de cada uma das propriedades anteriores.

#### 5.1.1 Tamanho Médio das Partículas

A variação no tamanho médio das partículas (figura 9) entre os tratamentos pode ser explicada pelo manuseio e transporte do carvão vegetal, o diâmetro da madeira e a condução da carbonização também influenciam esta propriedade, parâmetros esses, que podem explicar a diferença nas repetições dentro do mesmo tratamento. O transporte do carvão vegetal das fazendas até a fábrica faz com que este se quebre, devido ser um produto altamente friável e com baixa resistência mecânica.

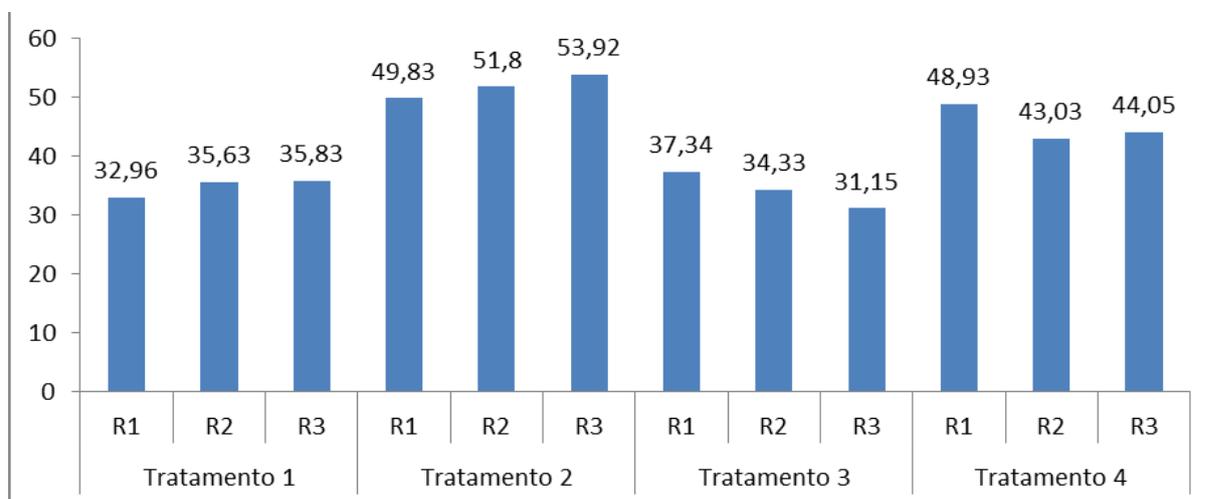


Figura 8: Resultados do tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos.

O tamanho médio das partículas do carvão vegetal nos tratamentos 2 e 4 são maiores que nos tratamentos 1 e 3 pelo fato de que, nas unidades de produção estes terem sofrido menos quedas e abrasão comparativamente ao carvão que foi transportado para a fábrica. O tamanho médio ideal das partículas de carvão (granulometria) para o processo da produção do ferro silício é aproximadamente 40 mm, para estas poderem conseguir atravessar o alto forno

durante sua queima. O carvão vegetal com granulometria abaixo de 40 mm é consumido também, porém se gasta um maior volume de matéria prima para reagir com a liga de ferro.

Neste sentido, o carvão vegetal deve apresentar uma maior resistência mecânica para não sofrer com o manuseio e transporte, por que senão suas partículas chegam ao local de uso com um tamanho menor do que é considerado ideal na produção. Vale ressaltar que a densidade e a umidade do material genético, bem como a condução da carbonização também influenciam na resistência mecânica do carvão vegetal.

Portanto, para ter uma matéria prima com qualidade para a produção do ferro silício, torna-se necessário a escolha de um material genético com propriedades físicas, químicas e anatômicas adequadas para obter um carvão vegetal com características determinantes para produzir a liga. Durante o processo da carbonização é importante conduzir a queima da madeira de forma adequada e ter cuidados ao manusear o carvão vegetal a fim de evitar a sua quebra e tentar preservar os tamanhos das partículas.

### 5.1.2 Teor de Finos

De acordo com os resultados da figura 9, o teor de finos encontrado nos tratamentos 1 e 3 são maiores quando comparados aos tratamentos 2 e 4. Esse aumento na geração de finos da matéria prima coletada na fábrica está associado ao manuseio, seja durante o descarregamento dos fornos, a montagem das pilhas e ao próprio carregamento do produto nas carretas e ao transporte do carvão vegetal que se desloca das unidades de produção até a fábrica.

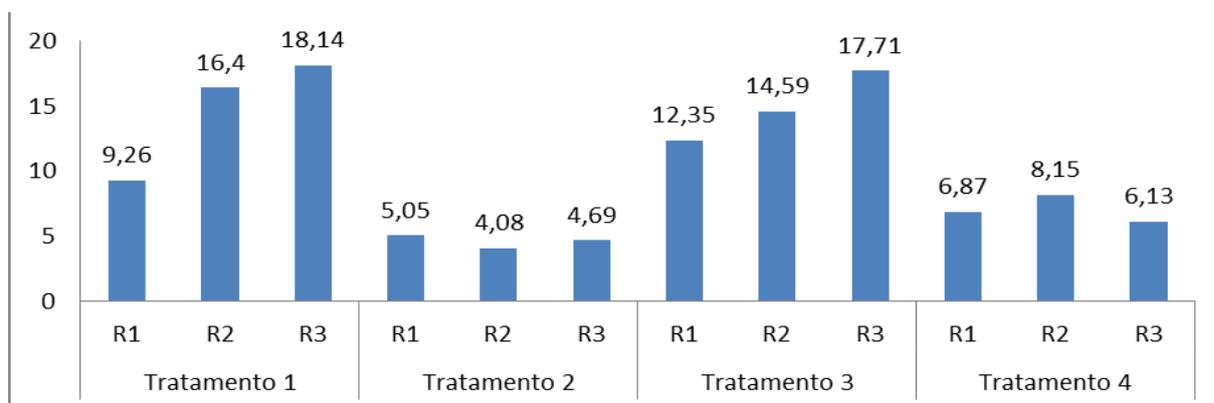


Figura 9: Resultados do teor de finos (%) de carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos.

Tal aumento se deve a diminuição do tamanho das partículas onde há geração de partículas menores que 9,52 mm o que é considerado como finos. A grande diferença do teor de finos entre as repetições no mesmo tratamento pode ser explicado pelo processo de

carbonização e, a taxa e aquecimento durante a carbonização da madeira. A umidade e a densidade da madeira, a idade e o diâmetro das toras e o material genético também influenciam na geração de finos, devido estes fatores estarem diretamente ligados a resistência do carvão vegetal produzido.

Quanto maior o teor de finos maiores perdas, aumentando os custos de produção do carvão vegetal e, também, do ferro silício. A produção da tonelada de carvão vegetal tem um custo em torno de R\$540.00/t. O teor de finos nas unidades de produção correspondeu à aproximadamente 6% e, portanto, para produzir uma tonelada de carvão vegetal se perde como resíduo, o valor de R\$33,60. Assim, considerando-se uma produção mensal de 12 mil toneladas de carvão vegetal tem-se um montante de perda de R\$403.200,00, referente apenas às unidades de produção. Quando se calcula o montante com o carvão vegetal na fábrica, após o transporte, esse valor chega a um (1) milhão de reais, considerando o teor de finos com aproximadamente 14%. A literatura informa que a perda com finos é em torno de 25% até a matéria prima chegar ao alto forno (OLIVEIRA, 1977).

Com isso, é extremamente importante não gerar finos durante o processo para evitar perdas na produção, aumento no custo do carvão vegetal e no preço final da liga, que consumirá mais matéria prima para alcançar sua qualidade. Como a geração de finos durante o processo de carbonização é inevitável, torna-se interessante gerar algum subproduto deste resíduo, a fim de diminuir perdas econômicas.

### **5.1.3 Densidade a Granel**

A densidade a granel nos tratamentos 1 e 3 (figura 10) apresentou maior que nos tratamentos 2 e 4 (figura 10) pelo motivo do aumento do finos e da diminuição do tamanho médio das partículas. Com as partículas menores, o carvão vegetal se ajeita melhor no recipiente em que sua densidade a granel é determinada, fazendo com que esta aumente.

Este aumento na densidade a granel indica que há menos espaços vazios no volume que o carvão vegetal ocupa. Essa redução nestes espaços se deve ao fato da matéria prima estar com o tamanho médio das partículas pequeno e, um alto teor de finos. Assim, esses dois últimos parâmetros eleva o peso do material, aumentando a densidade a granel.

Dessa maneira, a alta densidade a granel do carvão vegetal não é um fator favorável para a qualidade do mesmo, pois revela que a matéria prima está com os parâmetros de tamanho médio das partículas e teor de finos indesejados para a produção do ferro silício.

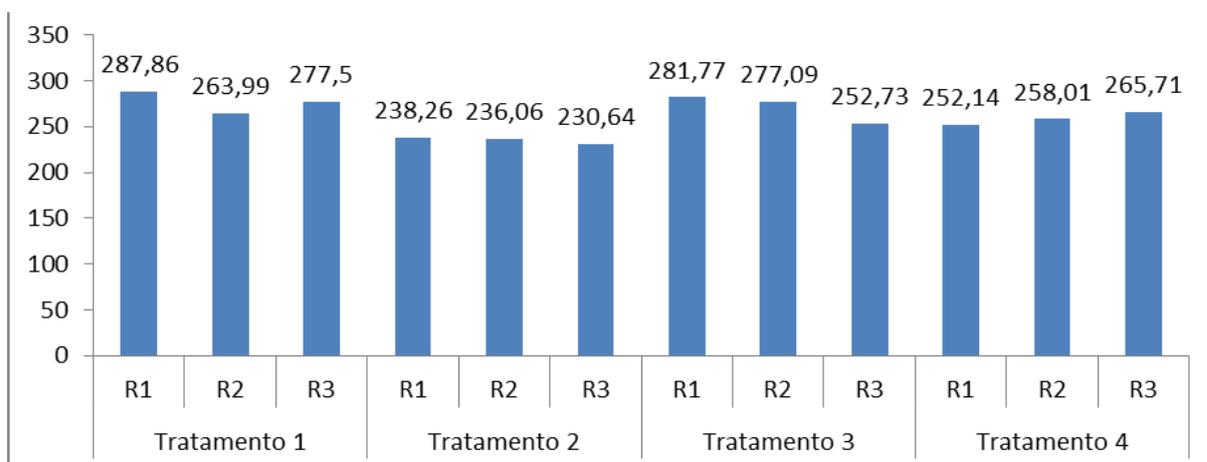


Figura 10: Resultados da densidade a granel ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) do carvão vegetal nas repetições dos quatro tratamentos.

## 5.2 Relações Entre as Propriedades Físicas

De acordo com o teste de médias (tabela 1) dos tratamentos realizados verificou-se que, estatisticamente o tamanho médio das partículas diferem entre os tratamentos realizados na fábrica (tratamentos 1 e 3) e os tratamentos realizados nas fazendas (tratamentos 2 e 4) o que explica que com o manuseio e transporte do carvão vegetal, as partículas tendem a diminuir de tamanho. Dentro dos dois tratamentos realizados na unidade de produção também ocorreu diferença estatística, isso pode ser explicada pela diferença do material genético que foi carbonizado estando com diâmetro da madeira, umidade e condução da carbonização, não padronizados.

Tabela 1: Valores médios das propriedades físicas do carvão vegetal. Tamanho médio das partículas (mm), teor de finos (%) e densidade a granel ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Tratamento	Tamanho Médio das Partículas (mm)	Teor de Finos (%)	Densidade a Granel ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
1	34,51 c	14,60 a	276,45 a
2	51,85 a	4,61 b	234,99 b
3	34,27 c	14,88 a	270,53 a
4	45,33 b	7,02 b	258,62 a

Médias seguidas por uma mesma letra, em cada coluna, não diferem estatisticamente. (Scott-Knott,  $p > 0,05$ )

Analisando o teor de finos na tabela 1 nota-se que os tratamentos 1 e 3 diferem estatisticamente entre os tratamentos 2 e 4. As médias mostraram que o teor de finos nas

unidades de produção (tratamentos 2 e 4) são menores que as médias dos tratamentos na fábrica. Durante o transporte do carvão vegetal das fazendas para a fábrica, o carvão vegetal sofre quedas e abrasões, o que faz com que o carvão quebre e gere cada vez mais partículas pequenas que são classificadas como finos ou moinha.

A densidade a granel (tabela 1) do carvão vegetal foi diferente estatisticamente apenas no tratamento 2 em relação aos tratamentos 1,3 e 4. O esperado é que os tratamentos 2 e 4 fossem estatisticamente iguais por terem sido coletado nas unidades de produção. Mas o que explica a densidade maior do tratamento 4, é o fato do mesmo ter apresentado média menor no tamanho médio das partículas e maior teor de finos quando comparado ao tratamento 2. Tais propriedades influenciam na densidade a granel. A geração de finos aumenta devido ao fato de em cada processo o mesmo sofrer quedas e abrasão, diminuindo a granulometria do carvão vegetal.

Por meio da análise estatística, o tipo de pavimentação das estradas não indicou diferença na qualidade das propriedades físicas do carvão vegetal avaliado.

A matriz de correlação (tabela 2) mostra que existe uma grande correlação entre as três propriedades físicas analisadas do carvão vegetal. O tamanho médio das partículas correlacionado com a densidade a granel e o teor de finos apresentaram um valor alto, mostrando assim que há uma relação de efeito de uma propriedade sobre a outra. O valor negativo entre elas mostra que a correlação apresenta caráter inversamente proporcional de uma propriedade física com a outra. As figuras (5, 6 e 7) mostram de maneira mais clara essa situação. A densidade a granel apresentou valor positivo quando correlacionado com o teor de finos, o que demonstra que estas duas variáveis apresentaram caráter diretamente proporcionais, além de terem uma correlação alta, indicando que há efeito de uma característica sobre a outra.

Tabela 2: Matriz de correlação entre as variáveis analisadas do carvão vegetal.

	Tamanho Médio das Partículas (mm)	Densidade a Granel (Kg.m <sup>3</sup> )	Teor de Finos (%)
Tamanho Médio das Partículas (mm)	1		
Densidade a Granel (Kg.m <sup>-3</sup> )	-0,95858	1	
Teor de Finos (%)	-0,99178	0,920745	1

### 5.2.1 Densidade a Granel x Tamanho Médio das Partículas

De acordo com a figura 11, há uma relação entre as propriedades analisadas, existindo uma tendência da densidade a granel do carvão vegetal aumentar, à medida que diminui o tamanho médio das partículas. Tal relação deve-se ao fato de em um mesmo volume caber mais carvão com partículas menores, ocasionando menos espaços vazios e, neste sentido, fazendo com que aumente a densidade a granel. Verificou-se também que os valores do gráfico com densidade acima de  $260 \text{ Kg.m}^{-3}$  a maioria são de amostras coletas na fábrica.

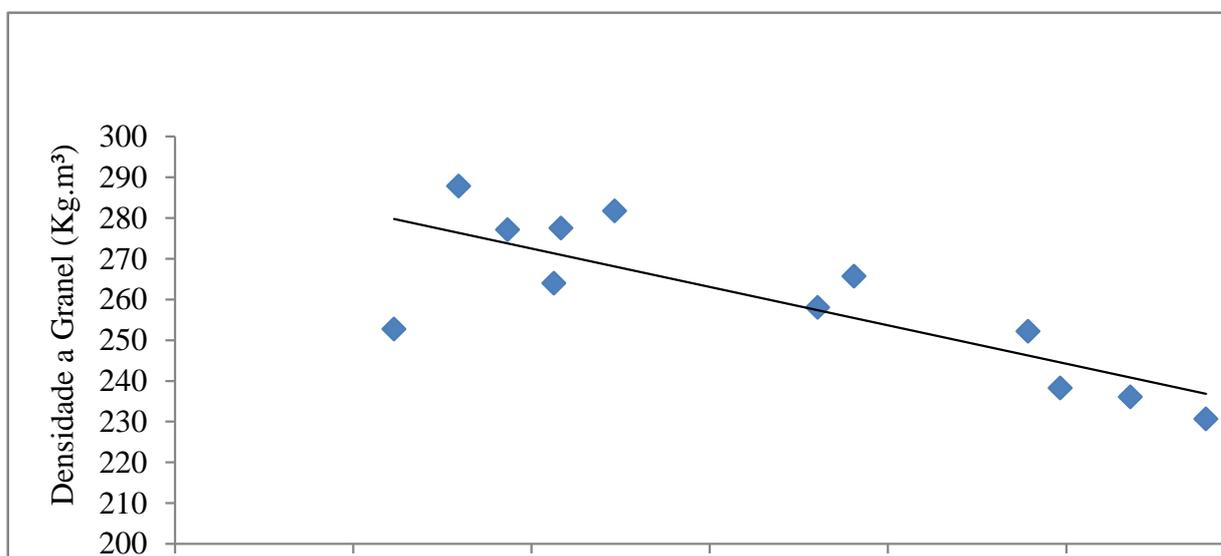


Figura 11: Gráfico da dispersão entre a densidade a granel ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) e o tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal analisado em laboratório.

### 5.2.2 Teor de Finos x Tamanho Médio das Partículas

Por intermédio da figura 12 percebe-se que quanto maior o tamanho médio das partículas do carvão vegetal, menor o teor de finos. Essa relação deve-se a partícula com tamanho maior ter sofrido apenas o manuseio da descarga do forno, apresentando granulometrias maiores quando comparado com o material coletado na fábrica após o transporte. Este apresenta menor tamanho nas partículas e alta densidade a granel.

Na produção do ferro silício partículas com granulometrias maiores são mais importantes porque conseguem atravessar o alto forno sem ser queimada totalmente na superfície do mesmo.

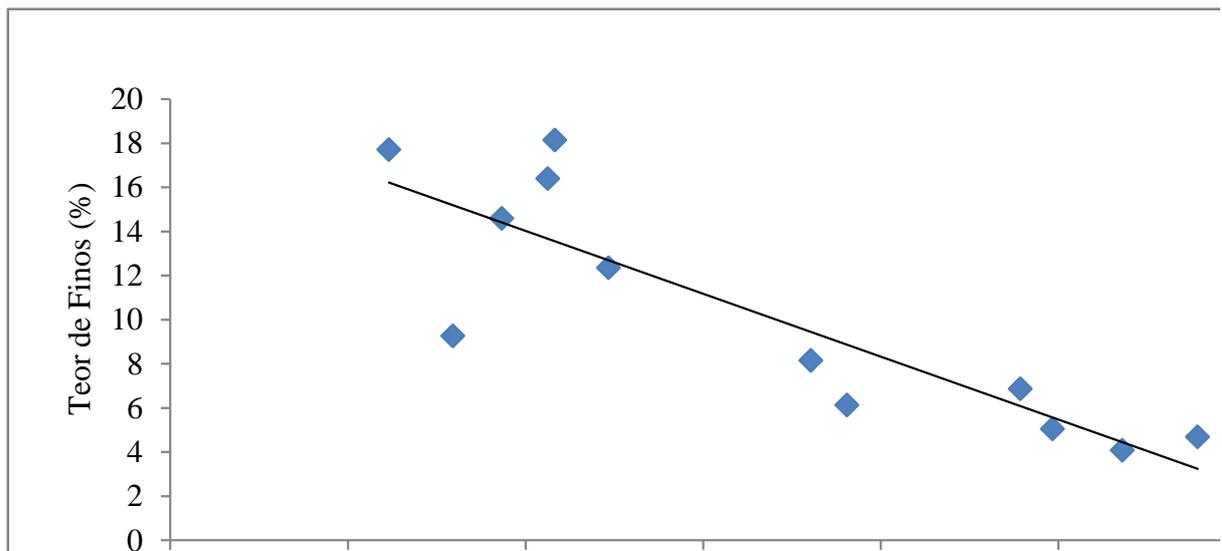


Figura 12: Gráfico da dispersão entre o teor de finos (%) e o tamanho médio das partículas (mm) do carvão vegetal analisado em laboratório.

### 5.2.3 Teor de Finos x Densidade a Granel

A densidade a granel e o teor de finos apresentaram tendência diretamente proporcionais de acordo com a figura 13. Ou seja, à medida que é gerado mais finos, a densidade a granel do carvão vegetal tende a aumentar. A relação entre estas duas propriedades deve-se ao fato de um alto teor de finos (partículas menores), gerar mais peso no material.

A densidade a granel com valor alto mostra que em seu volume há mais finos que foram gerados durante o processo. Este volume de finos não é interessante para a produção do ferro silício, pois além de aumentar o custo final do produto, acarreta em formação de gases no alto forno com risco de explosões.

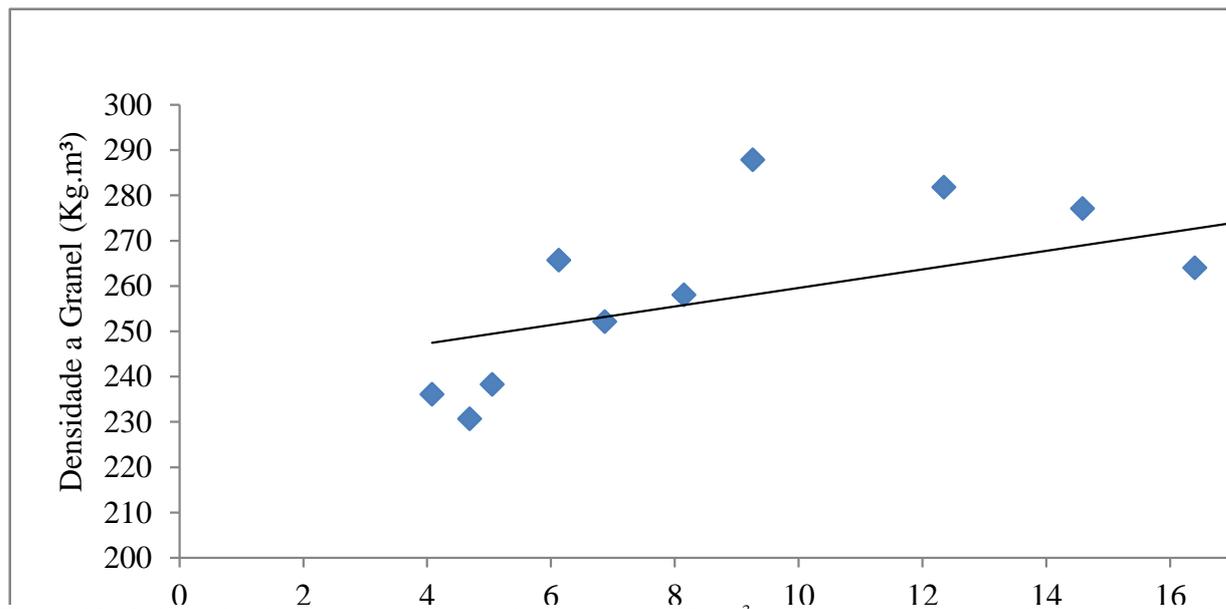


Figura 13: Gráfico da dispersão entre a densidade a granel ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) e o teor de finos (%) do carvão vegetal analisado em laboratório.

## 6. CONCLUSÕES

- O tamanho médio das partículas influencia a densidade a granel do carvão vegetal, pois quanto menor o tamanho destas, maior a densidade a granel. Assim, quanto maior a densidade a granel, maior o teor de finos do carvão vegetal.
- O manuseio e o transporte do carvão vegetal influenciam diretamente nas propriedades físicas e na qualidade desta matéria prima.
- O teor de finos é o fator que gera maior impacto na produção da liga do ferro silício. Cada percentual no aumento do teor de finos aumenta o custo do processo.
- As três propriedades analisadas apresentaram relação entre elas. O tamanho médio das partículas tem efeito inverso com a densidade a granel e o teor de finos. Estas duas últimas propriedades apresentaram relação direta.
- A empresa deve otimizar o processo de carregamento da carreta de carvão vegetal, a fim de evitar quedas que o mesmo sofre, até sua colocação no local de transporte. Deve-se diminuir também a quantidade de quedas que o carvão sofre nas esteiras rolantes, até este chegar ao alto forno.

- Selecionar materiais genéticos com maior resistência mecânica para produção do carvão vegetal, bem como regular o corte das florestas para a idade de sete anos.
- Padronizar o processo de carbonização para produzir um carvão vegetal de qualidade, a fim de se obter um ferro silício com propriedades superiores e menor custo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Associação brasileira de normas técnicas**. NBR 7402/82 - Carvão vegetal – Determinação granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1982.

ABNT. **Associação brasileira de normas técnicas**. NBR 6923/81 - Carvão vegetal Amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, RJ, 1981

ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 146 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FERROLIGAS E DE SILÍCIO METÁLICO - ABRAFE. **Produtos finais: ferroligas e Silício Metálico**. Disponível em: <<http://abrafe.ind.br/produtos.htm>>. Acesso em: 26 de jun. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. Normas técnicas NBR 8112. Brasília: 1983.

BRITO, J.O & BARRICHELO, L.E.G. Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus. Circular técnica. IPEF, Piracicaba (146): 1-12, jun.1982.

BRITO, J.O & BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2 – densidade da madeira x densidade do carvão. IPEF, Piracicaba (20): 121-6, 1980.

BRITO, J.O. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Circular técnica IPEF, N.181, 1993.

CARNEIRO, A.C.O.; SANTOS, R.C.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C. Conversão direta da madeira em calor e energia. In: “Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais”. Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 355 – 378.

COUTO, A. M. Influência das características anatômicas, químicas e físicas da madeira de Eucalyptus e Corymbia na qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. TESE UFLA – Lavras, MG. 2014. 173 Pág.

DOAT, J. & PETROFF, G. Pyrolyse des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. Bois et forêts des tropiques, Nogentsur-Marne (177): 51-64, 1978.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION ON THE UNITED NATIONS. **Produção mundial de carvão vegetal.**

Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>>.

Acesso em: 24 mai. 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEMA). **Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, com prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade.** Relatório de requisitos legais. Belo Horizonte. 2010. 62p.

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.

GUARDABASSI, P. M. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Energia)- Universidade São Paulo, São Paulo, 2006.

JUVILLAR, J. B. Tecnologias da transformação da madeira em carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Comp.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 158 p. (Série Publicações Técnicas, n. 1).

LEITE, A. A. F.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: relatório setorial: ferroligas.** Brasília: CNI, 46 p. 2010.

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

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Produção e utilização do carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 76-89.

MENDES, W. **Caracterização de escórias e recuperação do silício.** 2003. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, SP, 2003.

OLIVEIRA, J. B. de; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade. Belo Horizonte, 1982. p. 112-136, 173 p.

OLIVEIRA, J. B. et al. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. (Comp.). Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 393 p. (Série Publicações Técnicas, n. 8).

OLIVEIRA, J. V. - Análise econômica do carvão vegetal. In: SEMINÁRIO SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1, 1977. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. C. et al. A produção de carvão vegetal: teoria e prática. Belo Horizonte, 2006.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal - importância do conhecimento fundamental**. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. Energia da madeira. Curitiba: FUPEF, 1998. 86 p. (Série Didática).

SAMPAIO, R. S. Produção de metais com biomassa plantada. In: MELLO, M. G. (Org.). Biomassa: energia dos trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: LabMídia, 2001, p. 164.

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.