

UFRRJ

**INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

DISSERTAÇÃO

**Utilização de Resíduo Celulósico na Composição de
Briquetes de Finos de Carvão Vegetal**

Elizabeth Lemos Benício

2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO CELULÓSICO NA COMPOSIÇÃO DE
BRIQUETES DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

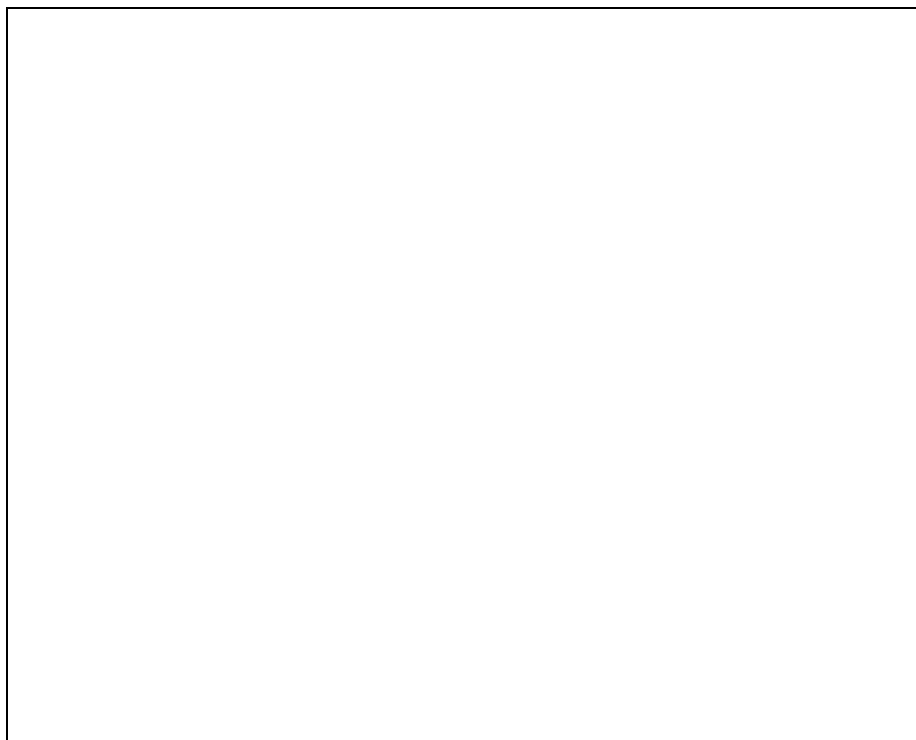
ELIZABETH LEMOS BENÍCIO

Sob a orientação do Professor
Alexandre Monteiro de Carvalho

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ
Julho, 2011

UFRRJ / Biblioteca Central / Divisão de Processamentos Técnicos .



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

ELIZABETH LEMOS BENÍCIO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: ___/___/_____

Alexandre Monteiro de Carvalho. Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Fabio Minoru Yamaji. Prof. Dr. UFSCar

Marisa Fernandes Mendes. Prof^a. Dr^a. UFRRJ

A Deus.

Aos meus estimados pais Paulo Benício
(em memória) e Marleni Lemos Benício.

Aos meus queridos irmãos Paulo Roberto Lemos
Benício, Carlos Eduardo Lemos Benício e Delma
Lemos Benício.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Ao professor orientador Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho, pelos ensinamentos, pela atenção, pelo apoio e dedicação na realização deste trabalho.

Ao professor Azarias Machado de Andrade que tanto me ajudou orientando e cedendo o espaço do Laboratório de Energia da Madeira para a confecção e produção dos briquetes.

Ao amigo André Tarcizo que me ajudou na idéia do projeto e cedeu a moinha de carvão vegetal.

Aos estagiários Ananias Junior e Rodrigo Braga que tanto me ajudaram na produção dos briquetes e ensaios.

Ao professor e coordenador da Pós-graduação Roberto Carlos Costa Lelis por toda atenção despendida a mim.

À empresa de Papel Schweitzer - Mauduit do Brasil, pela importante e fundamental contribuição no fornecimento do resíduo celulósico para execução deste trabalho.

Aos professores Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji e Prof. Dr. José Cláudio Caraschi da Universidade Federal de São Carlos/UFSCar-Campus de Sorocaba e Universidade Estadual Paulista/UNESP- Campus de Itapeva pela ajuda nos ensaios de poder calorífico.

Aos meus familiares e ao Sandro que muito me incentivaram, me entenderam, me apoiaram em todos os momentos.

À minha amiga Flávia Rebello por toda ajuda.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu agradecimento sincero.

Muito Obrigado...

BIOGRAFIA

ELIZABETH LEMOS BENÍCIO, filha de Paulo Benício (em memória) e Marleni Lemos Benício, nascida em Barra Mansa - RJ, aos vinte e sete dias de junho do ano de 1967.

Ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, onde se graduou em 2004 com o título de Licenciatura em Química.

Ingressou no Centro Universitário Geraldo Di Biase, onde concluiu o Curso de Especialização em Gestão, Planejamento e Ecologia, em nível de Pós-Graduação "Lato Sensu", em janeiro de 2010.

Iniciou em março de 2009, o curso de Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

RESUMO

BENÍCIO, Elizabeth Lemos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal**. 2011. 55p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2011.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade dos briquetes produzidos a partir do material de baixa granulometria, classificado como finos de carvão vegetal, considerado resíduo do processo de transporte, manuseio e empacotamento do carvão. A moinha de carvão foi coletada na cidade de Volta Redonda, Rio de Janeiro, em uma indústria produtora de briquetes de carvão vegetal. Como componente adicional do processo de briquetagem foi avaliada a utilização de outro material residual, o “resíduo celulósico” também chamado de “lama”, gerado na decantação dos efluentes da indústria de produção de papel. O trabalho foi dividido em duas etapas ou fases, sendo que foram utilizados os seguintes parâmetros para produção dos briquetes; Fase I: granulometria de 3 mm para os finos de carvão, cinco diferentes proporções de resíduo celulósico: 25%, 30%, 35%, 40% e 45%; na Fase II foi acrescentada uma porcentagem fixa de 10% de amido (aglutinante tradicional da indústria de briquetes de carvão) e porcentagens de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de resíduo celulósico; foi aplicada na prensagem dos briquetes uma pressão de 13 ton/cm², a qual foi realizada em uma prensa de controle manual onde foi utilizado um molde fabricado em aço inoxidável para dar forma a cada briquete. A avaliação da qualidade dos briquetes foi feita por meio de ensaios físicos, mecânicos e químicos, sendo estes: umidade de equilíbrio, densidade aparente; teste de tamboramento e classificação granulométrica; resistência à compressão; análise química imediata, porcentagem de voláteis, carbono fixo e cinzas; e determinação do poder calorífico superior. Assim, foi possível verificar que a utilização conjunta do amido de milho como aglutinante e do resíduo celulósico pode ser realizada, produzindo em determinadas composições, briquetes resistentes e de boa qualidade e que briquetes analisados se mostraram uma alternativa interessante no aproveitamento conjunto de dois tipos de resíduos, contribuindo para uma melhoria na gestão ambiental dos processos citados como geradores destes materiais (indústria de papel e celulose e segmentos consumidores de carvão vegetal).

Palavras-chave: carvão, briquete, resíduos.

ABSTRACT

BENÍCIO, Elizabeth Lemos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, **Use of cellulose residue in the composition of briquettes of charcoal fines**. 2011. 55p. Dissertation (Master Science in Environmental and Forestry Science). Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2011.

The present work had as objective to evaluate the quality of the briquettes made of fines charcoal, considered residue of the transport process and packing process of the charcoal. The fines were collected in the city of Volta Redonda, Rio de Janeiro, at a charcoal briquette industry. As additional component of the briquette production process was also evaluated the use of another residual material, the "cellulose residue", generated in the precipitation of the effluent treatment of the paper production. The research was divided in two stages or phases, and the following parameters were used for the briquette production; Phase I: 3 mm size for the fine of charcoal, five different proportions of cellulose residue: 25%, 30%, 35%, 40% and 45%; in the Phase II a fixed percentage of 10% of corn starch was increased (traditional binder of charcoal briquette industry) and percentages of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% of cellulose residue. In the briquette production was applied of 13 ton/cm² pressure, which was accomplished in a manual press, where was used a mold manufactured in a stainless steel to give a format to each briquette. The evaluation of the quality of the briquettes was made by physical, mechanics and chemical tests: moisture, apparent density; rotation test and particle size distribution; resistance to the compression; chemical analysis, and calorific value. So, we observed that the combined use of cornstarch as a binder and cellulosic waste can be performed, producing in certain compositions, briquettes resistant and good quality briquettes analyzed and proved an interesting alternative in the joint use of two types of waste, contributing to improved environmental management processes referred to as generators of these materials (pulp and paper industry and consumer segments charcoal).

Word-key: charcoal, briquette, use of residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de briquetes de finos de carvão vegetal	7
Figura 2. Estrutura química da amilose (a) e da amilopectina (b).....	10
Figura 3. Detalhes do resíduo celulósico do processo de fabricação do papel.....	12
Figura 4. Detalhes da produção de briquetes de carvão vegetal da empresa Eco-briquetes, de Volta Redonda/RJ. (a) e (b) briquetes após secagem; (c) moinha de carvão; (d) secagem em estufa; (e) e (f) empacotamento e estocagem	14
Figura 5. “Mingau gelatinoso” de amido de milho	15
Figura 6. Preparo das misturas das matérias-primas pra confecção dos briquetes.....	16
Figura 7. Detalhes do molde em aço inox utilizado na prensagem e formação dos briquetes ..	16
Figura 8. Prensagem dos briquetes.....	17
Figura 09. Briquetes produzidos em formato de uma pequena almofada	17
Figura 10. Medição do volume e massa dos briquetes para determinação da densidade aparente.....	18
Figura 11. Medição e aplicação de carga nos ensaios de resistência à compressão	20
Figura 12. Máquina universal de ensaios Contenco UMC 300.....	20
Figura 13. Mufla utilizada ao longo da análise química imediata contendo os cadinhos com as amostras dos briquetes.....	21
Figura 14. Tambor rotativo utilizado nos ensaios de tamboramento	22
Figura 15. Peneiras com malhas de diferentes tamanhos utilizadas na avaliação do tamboramento dos briquetes.....	22
Figura 16. Calorímetro Ika Werke, modelo C500 Control utilizado na determinação do PCS	23
Figura 17. Gráficos da granulometria dos briquetes da Fase I após os ensaios de tamboramento	29
Figura 18. Gráficos da granulometria dos briquetes da Fase II após os ensaios de tamboramento	34
Figura 19. Gráfico da correlação entre a densidade aparente e a carga de ruptura encontrada no ensaio de resistência à compressão dos briquetes (R = coeficiente de correlação)	37
Figura 20. Gráfico da correlação entre a densidade aparente e a % de material retido na peneira de 25 mm no ensaio de tamboramento (R = coeficiente de correlação).....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Resultados médios de densidade aparente (g/cm^3) dos briquetes produzidos na Fase I considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem	26
Tabela 02. Resultados médios de resistência à compressão (carga de ruptura em kgf) dos briquetes produzidos na Fase I considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem.....	27
Tabela 03. Valores da distribuição granulométrica após o ensaio de tamboramento - Fase I	28
Tabela 04. Resultados médios de poder calorífico superior (PCS) a 0% de umidade, em kcal/kg, dos briquetes produzidos na Fase I considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem.....	30
Tabela 05. Resultados médios de densidade aparente (g/cm^3) dos briquetes produzidos na Fase II considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem.....	31
Tabela 06. Resultados médios de resistência à compressão (carga de ruptura em kgf) dos briquetes produzidos na Fase II considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem.....	32
Tabela 07. Valores da distribuição granulométrica após o ensaio de tamboramento - Fase II	33
Tabela 08. Resultados médios de poder calorífico superior (PCS) a 0% de umidade, em kcal/kg, dos briquetes produzidos na Fase II considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem.....	35
Tabela 09. Resultados de teor de materiais voláteis (%), teor de cinzas (%) e carbono fixo (%) obtidos nas análises químicas imediatas	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1	Histórico	4
2.2	Definições e vantagens dos briquetes.....	5
2.3	Fatores que influenciam na qualidade do briquete	6
2.4	O processo de briquetagem de finos de carvão	6
2.5	Aglutinantes.....	8
2.5.1	Amido de milho.....	9
2.5.2	Resíduo celulósico.....	11
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1	Obtenção e preparação dos finos de carvão vegetal e resíduo celulósico	13
3.2	Confecção dos briquetes.....	15
3.3	Avaliações e ensaios.....	18
3.3.1	Densidade aparente.....	18
3.3.2	Umidade de equilíbrio higroscópico.....	19
3.3.3	Resistência à compressão	19
3.3.4	Análise química imediata	20
3.3.5	Teste de tamboramento.....	22
3.3.6	Poder calorífico superior	23
3.4.	Tratamentos considerados e delineamento estatístico	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1	FASE I.....	26
4.1.1	Densidade aparente.....	26
4.1.2	Resistência à compressão	27
4.1.3	Granulometria - ensaio de tamboramento	28
4.1.4	Poder Calorífico Superior.....	30
4.2	FASE II.....	31
4.2.1	Densidade aparente.....	31
4.2.2	Resistência à compressão	31
4.2.3	Granulometria - ensaio de tamboramento	32

4.2.4 Poder Calorífico Superior.....	35
4.3 ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS (FASES I e II).....	36
4.4 CORRELAÇÕES	37
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO	45

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por recursos energéticos pelo fato do ser humano buscar bens e conforto gera ao meio ambiente uma grande quantidade de sobras no processo de produção, exploração, transformação e utilização, que podem prejudicar a qualidade de vida das espécies que habitam o planeta.

A necessidade de se pensar em tecnologias sustentáveis para produção de energia reaproveitando recursos, que em algum momento, já foram considerados como “lixo” ou um problema ambiental é um desafio que precisa de alternativas para não se desfazer de um resíduo sem tirar proveito algum dele como, por exemplo, a incineração sem a preocupação de recuperação de energia.

Aumentar a participação de fontes renováveis e promover a substituição de derivados de petróleo por derivados de biomassa como fonte de energia, são caminhos que podem contribuir em muito para se resolver as questões energéticas do nosso país.

O uso dos resíduos agro-florestais para fins energéticos, por meio da briquetagem é, do ponto de vista ambiental, uma forma de se gerar energia limpa e renovável, levando-se em conta a não emissão de agentes poluentes e a redução dos desmatamentos indesejáveis. Vislumbra-se uma série de vantagens sócio-econômicas e ambientais para os países que investem na produção e comercialização de combustíveis a partir de resíduos agro-florestais (BEZZON, 1997).

Destacam-se entre os resíduos agro-florestais utilizados nos processos de compactação para fins energéticos, o bagaço e a palha de cana, os resíduos da madeira e os do carvão.

O reflorestamento e o reaproveitamento de resíduos oriundos das florestas para reduzir a devastação indiscriminada da mata nativa têm como proposição a reutilização desta biomassa, na conversão de um novo combustível, utilizando como meio a reciclagem dos resíduos na fabricação de produtos, que tragam a vantagem de diminuir poluentes, responsáveis por impactos ambientais negativos e que possuem, por outro lado, grande potencial energético (MAGOSSO, 2007).

A gestão dos resíduos envolve fases ou etapas diferentes e ao mesmo tempo básicas, iniciando-se pelo estudo e caracterização precisa da definição de sua origem e do fluxo dos produtos, e posteriormente, a análise técnica e econômica das soluções alternativas para produção, para administração e eliminação dos resíduos (QUIRINO, 2002).

Especificamente, no caso dos resíduos classificados como material de baixa granulometria, ou “finos” de carvão vegetal, quando estes apresentam granulometria abaixo de 9 mm, ainda podem ser injetados nas ventaneiras dos alto-fornos das indústrias siderúrgicas, entretanto, granulometrias abaixo de 2 mm são indesejáveis neste setor, devido a problemas com a maior contaminação deste material com terra e, conseqüentemente, maior geração de cinzas.

No caso do empacotamento do carvão vegetal para uso doméstico, os finos são gerados principalmente pelas sucessivas quebras do material ao longo do transporte, peneiramento e próprio empacotamento, gerando uma porcentagem de resíduo indesejável pelo consumidor.

Uma das alternativas mais interessantes atualmente existentes para a re-utilização de resíduos de pequena granulometria de diversos setores industriais é a briquetagem, a qual vem se mostrando como um excelente processo de reciclagem, que utiliza a compactação de biomassas na produção de combustível sólido, que poderão ser utilizados posteriormente em vários processos que, tradicionalmente, utilizam lenha, carvão vegetal e mineral como fonte de energia.

A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. No caso do carvão vegetal, usa-se, geralmente, um ligante, que pode ser de várias naturezas, porque esta é a maneira mais econômica de compactá-lo. O processo exige bons conhecimentos sobre as forças coesivas entre os sólidos, adesividade do ligante, comportamento reológico do conjunto partícula-ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas, química de superfície e mudanças físicas e químicas durante o processo de aquecimento (SALEME, 1992).

A briquetagem do carvão vegetal na forma de finos se faz através da compactação de uma mistura destes finos de carvão com um aglutinante, dentro de matrizes ou moldes, onde o aglutinante deve proporcionar a coesão desta mistura. É importante que se leve em consideração alguns aspectos importantes para a produção destes briquetes como a afinidade entre as partículas dos finos de carvão e o aglutinante.

Um fator importante que se deve levar em consideração é a composição química do aglutinante, que deve ser isenta de compostos que na combustão podem favorecer a produção de gases tóxicos. No caso do briquete ser utilizado para fins industriais, mais especificamente para indústria siderúrgica, ele também deve funcionar como termorredutor.

O preço final da produção também deve ser estudado para se conhecer a viabilidade ou não da produção destes briquetes. No Brasil, também se tem a prática de misturar os briquetes de carvão vegetal com o carvão vegetal nas embalagens para comercialização.

Normalmente os briquetes de carvão vegetal são utilizados para uso doméstico e eles devem apresentar dentro de suas características principais, a resistência ao manuseio, acendimento fácil, e como já mencionado a isenção de gases tóxicos.

No caso específico do mercado doméstico, o consumo de carvão vegetal para churrasco é elevado na população urbana do Brasil. Assim, por exemplo, em São Paulo são produzidas 108.360 toneladas por ano, sendo que 64% vão para o consumo doméstico (churrasco) e 36% para o consumo em estabelecimentos comerciais, como pizzarias, churrascarias e restaurantes (REZENDE & SANTOS, 2010).

Uma pesquisa de mercado direcionada ao consumidor doméstico de carvão vegetal mostrou que a maioria dos consumidores não tem preferência por marcas ou tipos de carvão. Quando questionados sobre o fator determinante na decisão de compra, a maioria respondeu que em primeiro lugar estava a disponibilidade do produto sem se importar com a marca, deixando, em segundo lugar, o preço. Isso evidencia que a concorrência entre marcas é praticamente nula, possibilitando que novos produtos possam disputar este mercado (FELFLI, 2003, citado por CARVALHO & BRINCK, 2004).

Para diferentes usos, o briquete também deve apresentar diferentes propriedades química, física, mecânica, geométrica, teor de umidade, entre outras.

O aglutinante mais usado na produção destes briquetes é o amido industrial de milho não-refinado, sendo que um briquete para uso doméstico típico contém normalmente 85% de carvão vegetal, 6 a 10% de aglutinante (amido) e 5 a 8 % de umidade. Os briquetes apresentam geralmente forma quadrada, com os cantos arredondados (tipo almofada), volume de 30 cm³ e densidade na faixa de 0,4 a 0,7 g/cm³. (FONTES et al., 1984)

Para uso siderúrgico são indicadas as seguintes características: um teor de cinzas abaixo de 12%, materiais voláteis abaixo de 15%, carbono acima de 73%, teor de enxofre abaixo de 0,5% e resistência mecânica à compressão superior a 70 kgf (QUIRINO, 2002).

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a fabricação de briquetes de finos de carvão vegetal utilizando, adicionalmente, em sua composição, o material residual da indústria de papel e celulose chamado ao longo deste estudo de “resíduo celulósico”.

Na realização dos procedimentos metodológicos o trabalho teve ainda os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a utilização do resíduo celulósico, em substituição parcial e total ao amido de milho industrial, utilizado tradicionalmente como aglutinante para a briquetagem de finos de carvão vegetal;
- Caracterizar através de ensaios físico-químicos os briquetes produzidos;
- Avaliar o processo de briquetagem dos finos de carvão vegetal;
- Discutir a utilização conjunta de dois resíduos industriais na obtenção de um novo produto a partir da briquetagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Histórico

A aglomeração manual de finos teve início com o carvão mineral na China e na Inglaterra, com a utilização de ligantes de origens minerais, vegetais e até mesmo animal. A fabricação comercial mecanizada de briquetes de carvão mineral originou-se na França, em 1842 (MELO, 2000).

Até a Segunda Guerra Mundial foram produzidas grandes quantidades de briquetes de carvão mineral em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras. Em 1915, foi realizada pela primeira vez, a briquetagem do carvão vegetal em uma fábrica no Tenesse, Estados Unidos, que produzia metanol pela destilação destrutiva da madeira, em que os finos de carvão vegetal, subprodutos do processo, eram briquetados usando-se alcatrão de madeira como aglutinante (MELO, 2000).

Henry Ford, famoso empreendedor da Ford Motor Company, foi também um dos pioneiros na produção de briquetes e na preocupação com o meio ambiente, na questão do reaproveitamento de resíduos. Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela Ford Motor Company, em Michigan, Estados Unidos, em que a matéria-prima eram aparas de madeira. As aparas eram carbonizadas, o carvão moído e briquetado, utilizando como ligante amido e água (ANTUNES, 1982).

Em 1848, foi concedida uma patente para William Easby, para um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos. A utilidade e a vantagem da descoberta foram que, através desse processo, um artigo de pequeno valor, quase desprezível, poderia ser convertido em um artigo valioso, para uso como combustível de navios a vapor, forjas, culinária e outras finalidades, assim economizando o que antes era perdido (BROSCH & FURUNO, 1968).

No Brasil, não existe uma tradição industrial na produção de briquetes de carvão vegetal ou de resíduos ligno-celulósicos. Segundo Quirino (2003), cerca de 30 a 40 usinas de briquetagem foram registradas no país, como produtoras de briquetes de variados resíduos ligno-celulósicos (QUIRINO, 2003).

No Brasil, duas empresas destacam-se na produção de briquetes a partir de finos de carvão vegetal, localizadas no estado de Santa Catarina e na cidade de Sete Lagoas/MG. Apesar de se apresentar como o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo, o Brasil não tem tradição de uso de briquetes de carvão (PEREIRA, 2009).

O consumo de briquetes, em nível mundial, é um mercado crescente, principalmente na época do verão nos Estados Unidos e na Europa Ocidental. A produção mundial está em torno de 1.500.000 t/ano.

Os principais produtores de briquetes são Alemanha, México, Equador, Croácia, África do Sul e Estados Unidos, sendo que a produção americana é de 900.000 t/ano, concentrada principalmente nos estados da Carolina do Norte e Carolina do Sul. Neste país, o carvão é produzido principalmente a partir de resíduos de agriculturas, serragem e aparas de madeira, o que contribui para um produto de baixo teor de carbono fixo (PEREIRA, 2009).

2.2 Definições e vantagens dos briquetes

O termo resíduo está ligado a tudo aquilo que resta de um processo de exploração ou produção, de transformação ou utilização, sendo também considerado toda substância, material ou produto destinado por seu proprietário ao abandono. O descarte indevido do resíduo pode causar poluição nos recursos hídricos, inutilização de áreas que poderiam ser mais bem aproveitadas e poluição de maneira geral (QUIRINO, 2003).

A briquetagem é um processo de densificação de resíduos. Todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de umidade exigido pelo processo. Essa técnica possui a vantagem de poder transformar um resíduo de baixíssima densidade em um material de densidade elevada e alta qualidade energética (QUIRINO, 2003).

Segundo informações disponíveis em <http://www.briquetes.com.br> (2009), existe uma série de vantagens em torno do uso dos briquetes de uma forma geral, sendo que a maioria delas se adapta aos briquetes de finos de carvão vegetal, como por exemplo:

- o uso dos briquetes reduz a quantidade de árvores cortadas;
- os briquetes são liberados pelo IBAMA dispensando licenças, como de transporte;
- o briquete pode estar disponível o ano inteiro;
- apresenta menor umidade: o briquete tem 10 a 12% de umidade, enquanto a lenha muitas vezes possui teores acima de 30% de umidade;
- possui regularidade térmica;
- gera menos cinza e fumaça;
- polui menos do que outros tipos de combustíveis (lenha, carvão e óleo);
- é de fácil manuseio;
- é mais higiênico e possui boa aparência;
- os briquetes são produzidos em tamanhos padrões;
- o poder calorífico do briquete chega a ser 2,5 vezes maior do que o da lenha;
- devido à baixa umidade, na sua utilização, a temperatura se eleva rapidamente;
- espaço de armazenagem reduzido, possibilitando assim a manutenção de estoques reguladores e de emergência;
- possibilita menor variação do peso na comercialização;
- menor índice de poluição e
- ecologicamente correto.

2.3 Fatores que influenciam na qualidade do briquete

A granulometria da matéria-prima é uma das principais variáveis na produção dos briquetes, ela influencia diretamente na densidade, na coesão e na quantidade de aglutinantes a ser usado para a briquetagem.

Na produção de briquetes, a granulometria influi diretamente no consumo de ligantes e na resistência final. O grau de moagem considerado correto é o que produz uma quantidade de pó suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, evitando a desagregação na prensagem. O material, que sai do moinho, passa em uma peneira vibratória e os pedaços retidos são recirculados (ANTUNES, 1982).

As principais características dos aglutinantes utilizados na produção dos briquetes devem ser: alta taxa aglutinante; inexistência de material inerte em sua composição; barato e abundante; simplicidade de uso; alta resistência mecânica; resistência à umidade; e boas condições de operacionalidade.

Em alguns aglutinantes podem ocorrer reações químicas com o material compactado que conferem boas características ao briquete, como é o caso da cal e do melão que reagem com o carvão formando uma camada de proteção à água. Outros aglutinantes podem ter propriedades lubrificantes e funcionam reduzindo a fricção entre as partículas, aumentando a compactação e servindo também como um agente intermediário entre o briquete e as ferramentas. Alguns exemplos são: óleos, amido seco, talco, ceras e grafite (SALEME, 1992, citado por MELO, 2000).

A seleção do aglutinante é feita em função do custo e do uso final que se pretende para o briquete. Um briquete típico contém cerca de 87% de carvão, 8% de amido e 5% de umidade. A porcentagem exata de ligante influencia em um melhor resultado na produção de um briquete de qualidade (ANTUNES, 1982)

Para que se tenha uma aglomeração eficiente, a umidade da massa a ser briquetada deve estar compreendida entre 10% a 20%. Devido à umidade, o aglutinante, a temperatura e a pressão dos cilindros, os briquetes são modelados geometricamente em tamanhos e formas homogêneas.

No caso de se usar amido em pó, este é misturado ao carvão juntamente com 5 a 10% de água. É desejável deixar a mistura esfriar levemente antes de enviá-la à prensa. Isto permite que a massa adquira um grau de coesão maior do que o grau de adesão, contribuindo para evitar formação de trincas e a colagem de material dentro das cavidades da prensa.

A intensidade e o período de aplicação da pressão variam com as características do material e com o tipo de prensa. A alimentação insuficiente resulta em um briquete frágil e de baixa densidade (ANTUNES, 1982).

2.4 O processo de briquetagem de finos de carvão

Segundo Moro (1987), uma metodologia típica para a briquetagem de finos de carvão deve consistir nas seguintes etapas:

- **Moagem do carvão:** a moagem é necessária para evitar partículas muito grandes que prejudiquem a ação dos materiais ligantes. Normalmente, são utilizados moinhos de martelo e

a faixa granulométrica ideal, geralmente, encontra-se abaixo de 3 mm, sendo função da natureza do carvão, do tipo de prensa, da forma e do tamanho do briquete;

- **Mistura com o aglutinante:** o aglutinante é um material que tem a função de unir as partículas do carvão. A escolha do tipo e da quantidade de aglutinante é o ponto mais crítico na manufatura dos briquetes, sendo a etapa mais sensível aos custos do processo;

- **Prensagem:** a briquetagem propriamente dita resulta da aplicação de pressão, em que prensas sobre a massa do carvão fazem com que o briquete adquira resistência e formato geométricos definidos.

- **Secagem:** alguns ligantes são adicionados com água ao briquete, proporcionando uma umidade alta ao produto final. Por esse motivo eles devem ser secos, o que geralmente é conseguido com a passagem de ar quente e seco em uma estufa e

- **Estocagem e embalagem:** os briquetes são armazenados em silos de estocagem dimensionados para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Em seguida, são empacotados para consumo.

Um fluxograma da produção de briquetes de finos carvão vegetal é apresentado na Figura 1.

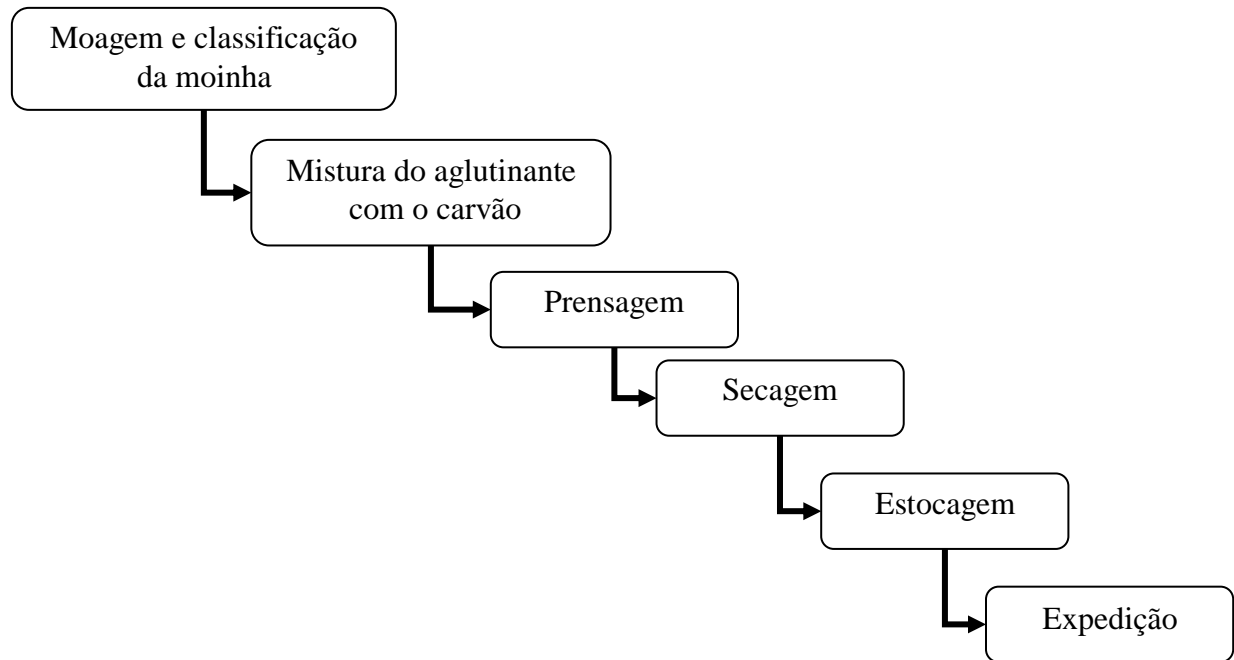


Figura 1. Fluxograma de briquetes de finos de carvão vegetal. Fonte: Melo (2000)

O trabalho de Lucena et al. (2008) descreve os processos utilizados na compactação de resíduos, os quais podem ser utilizados e/ou adaptados para a prensagem dos finos do carvão vegetal, sendo eles:

- Prensa extrusora de pistão mecânico: tecnologia desenvolvida desde o princípio do século e bastante conhecida no mundo. Um pistão ligado excêntrica a um grande volante força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone.
- Prensa extrusora de rosca sem fim - processo muito usado para resíduos, no exterior. Apresenta excelentes resultados. Seu princípio mecânico é semelhante às marombas da indústria cerâmica. É um equipamento de fácil manutenção e de investimento favorável se comparado aos outros tipos também produzidos no exterior.
- Prensa hidráulica - equipamento que usa um pistão acionado hidráulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. Não é um processo extrusivo e a pressão aplicada geralmente é menor que em outros métodos, produzindo briquetes de menor densidade. No entanto, é o processo com maior número de fabricantes na Europa. Não existe no Brasil este tipo de equipamento para compactar resíduos, que seria semelhante às máquinas de produzir comprimidos e pastilhas.
- Peletizadora - é um equipamento que opera pelo processo extrusivo. É o princípio dos equipamentos de produção de ração animal, onde há necessidade de injeção de vapor para aquecer e corrigir a umidade. Estes equipamentos vêm sendo experimentados para compactação de resíduos com resultados razoáveis.

Segundo descreve Melo (2000), na produção em série, além da prensa de extrusão, que é essencial na função de realizar a união do carvão com o aglutinante, definindo o formato geométrico, a resistência mecânica e o aumento da densidade, são necessários ainda o pulverizador, o misturador e a estufa, equipamentos que dão subsídios à produção diminuindo o tamanho da partícula do carvão vegetal, homogeneizando, dando plasticidade e reduzindo a umidade e conseqüentemente garantindo a resistência mecânica, respectivamente.

2.5 Aglutinantes

O estudo do melhor material ligante é de fundamental importância no processo de briquetagem. O aglutinante escolhido não deve prejudicar as características energéticas do carvão, diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas, e seu custo não poderá inviabilizar economicamente o briquete (FONTES et al., 1989).

Os aglutinantes podem ser classificados em três tipos: matriz, filme e químico.

- **Aglutinantes tipo matriz** - formam uma matriz contínua, envolvendo completamente as partículas. São exigidas quantidades razoáveis do aglutinante porque, geralmente, as substâncias são pouco resistentes e dependem de uma fase contínua em torno das partículas individuais. Ex: alcatrão vegetal e mineral, asfalto ou piche de petróleo;

- **Aglutinantes tipo filme** – são usados geralmente como soluções ou dispersões, como o álcool, a acetona, o tetracloreto de carbono, entre outros, porém a água se destaca como o solvente mais comum. Quando úmidos, os briquetes apresentam baixa resistência, e quando secos observa-se alta resistência. No caso de materiais orgânicos ou produtos celulares, a água estimula a adesão pelas forças de Van der Waals, devido ao aumento da área verdadeira de contato entre partículas. Ex: silicato de sódio, água, amido, melão, os lignosulfatos e outros, e
- **Aglutinantes químicos** – são aqueles aglutinantes que dependem de reações químicas efetivas dos componentes do aglomerado entre si ou entre o aglutinante e o material que está sendo aglomerado. Os aglutinantes químicos podem ser do tipo matriz ou filme, dependendo, principalmente, da resistência e das características dos produtos das reações. Ex: Ca(OH)_2 + melão; Ca(OH)_2 + CO_2 MgO + Fe_2O_3 ; silicato de sódio + CO_2 ; e outros (PIETSCH, 1976, citado por QUIRINO, 1991).

2.5.1 Amido de milho

O grânulo de amido é constituído de moléculas de amilose e amilopectina associadas entre si por pontes de hidrogênio, formando áreas cristalinas radialmente orientadas. Entre estas áreas cristalinas existem regiões amorfas, nas quais as moléculas não têm uma orientação particular.

As áreas cristalinas mantêm a estrutura do grânulo e controlam o comportamento do amido na água. É por este motivo que o grânulo de amido exibe uma capacidade limitada de absorção e água, embora seja constituído de polímeros solúveis ou parcialmente solúveis neste líquido. O arranjo cristalino no grânulo de amido tem sido objeto de inúmeros estudos. Entretanto, as características das áreas cristalinas, a nível molecular, ainda não foram totalmente determinadas. (SOLOMONS, 1996)

Morfologicamente o amido é formado por anéis de crescimento concêntricos, com aproximadamente 30% da estrutura do grânulo é amorfa, onde se encontra maior parte da amilose e 70% encontra-se na forma cristalina predominantemente a amilopectina, mas esta porcentagem de amilose ou amilopectina pode ser alterada por manipulação genética.

Os grânulos quando suspensos em água fria incham, aumentando seu diâmetro de 30 a 40%. Ao ser aquecido entre 50 a 70°C apresenta algumas modificações físicas conhecidas como gelatinização aumentando ainda mais seu diâmetro cerca de 20 a 40% (TEIXEIRA, 1998).

A amilose é uma macromolécula constituída de 250 a 300 resíduos de D-glicopirranose, ligadas por pontes glicosídicas α -1,4, que conferem à molécula uma estrutura helicoidal e a amilopectina também é uma macromolécula, menos hidrossolúvel que a amilose, constituída de aproximadamente 1400 resíduos de α -glicose ligadas por pontes glicosídicas α -1,4, ocorrendo também ligações α -1,6, que dão a ela uma estrutura ramificada com uma enorme quantidade de hidroxilas disponíveis para interações intermoleculares com o carvão vegetal (LIMA, 2001).

A estrutura química da amilose e da amilopectina pode ser observada na Figura 2.

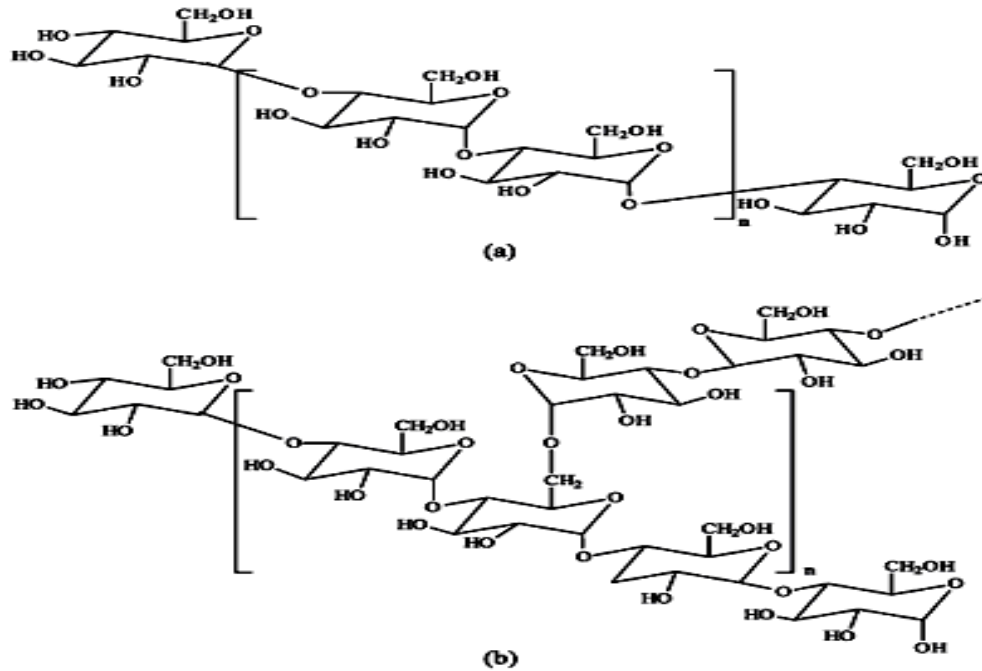


Figura 2. Estrutura química da amilose (a) e da amilopectina (b). Fonte: Corradini ,2005

O amido devido à sua estrutura química pode, melhorar muito as propriedades físicas do briquete podendo influenciar as cargas elétricas entre: fibras, finos e carga mineral podendo adequá-los às necessidades tecnológicas.

O amido é o principal responsável pelas propriedades tecnológicas que caracterizam grande parte dos produtos processados, uma vez que contribui para diversas propriedades de textura em alimentos, possuindo aplicações industriais como espessante, estabilizador de colóides, agente gelificante e de volume, adesivo, na retenção de água, dentre outros (SINGH et al., 2003).

O efeito da adição de amido pode ser mais bem explicado quando se consideram: Forças de atração entre o amido solubilizado e sólidos (fibras e carga mineral), forças de van der Waals e pontes de hidrogênio nas regiões não iônicas do amido. A atração eletrostática por conta das pontes de hidrogênio nas regiões catiônicas do amido tem fundamental importância para se explicar o comportamento aglutinante do amido, adsorção do amido sobre a superfície das partículas sólidas, floculação dos finos e cargas mineral pelo amido e aumento da força de atração das partículas sólidas durante o processo de drenagem e secagem do briquete.

Sob certas condições específicas, um átomo de H (hidrogênio) é atraído por duas forças de dois átomos simultaneamente, ao invés de apenas um, passando a atuar como uma ponte entre eles. Reconhece-se que a ponte de hidrogênio possui um caráter fracamente iônico, e é formada entre os átomos fortemente eletronegativos como o F, O e N. Atua também em menor proporção e sob condições específicas, entre os átomos menos eletronegativos, como o C e o Cl (RUSSEL, 1981).

A necessidade de uma pré-gelatinização do amido cru existe por ele apresentar uma limitada capacidade de absorção de água na forma de pó, o que dificulta a fluidez no momento da mistura com o carvão vegetal. Uma suspensão de amido quando submetida ao aquecimento a uma determinada faixa de temperatura (intervalo de gelatinização) inicia o processo de intumescimento dos grânulos por absorção de água e rompimento das ligações de hidrogênio no seu interior. Durante este processo, poderá ser absorvido um volume de até vinte vezes seu peso (TAVARES, 1993).

A gelatinização é a perda da birrefringência, que é um fenômeno que acontece com os grânulos de amido onde as moléculas são capazes de formar ligações de hidrogênio sempre que se encontrarem paralelas umas às outras (SOUZA, 2000).

2.5.2 Resíduo celulósico

A formação do resíduo celulósico (estudado e utilizado neste trabalho) ocorre no processo de produção do papel, a partir da desagregação da celulose branqueada, com cerca de 5% de umidade, em equipamentos específicos - hidrapulpers - que tornam o conjunto de fibras prensadas novamente uma polpa/massa bastante diluída.

Após uma nova operação de refino das fibras desta polpa, a mesma é encaminhada para a máquina de produção de papel que utilizará esta massa como a principal matéria-prima na formação do papel. A máquina de papel realiza o processo de distribuição da polpa em uma tela rotativa, formando a folha e realizando a sua secagem.

O processo de secagem na máquina de papel tem início numa "mesa plana" onde, por meios de drenagem e vácuo, um grande volume de água é retirada da massa. É neste momento que a drenagem e os processos a vácuo provocam a retirada de fibras junto com a água, gerando um material residual, que posteriormente será decantado e constituirá o lodo na estação de tratamento de efluentes posteriormente - tratado como resíduo celulósico neste trabalho (BORGES, 2010 – comunicação pessoal).

Esse resíduo já foi utilizado como matéria-prima em outras unidades industriais, como em olarias, na fabricação de tijolos e telhas, mas agora devido aos entraves burocráticos da legislação ambiental as parcerias para reaproveitamento destes resíduos são praticamente inexistentes (BORGES, 2010 – comunicação pessoal).

A Figura 3 apresenta imagens do resíduo celulósico tratado nos parágrafos anteriores.



Figura 3. Detalhes do resíduo celulósico do processo de fabricação do papel.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Rural do Rio de Janeiro junto aos Laboratórios de Processamento Mecânico de Madeira (armazenamento de material e medições), Laboratório de Energia da Madeira (confeção dos briquetes e análise química imediata) e Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira (ensaios físico-mecânicos), ambos pertencentes ao Departamento de Produtos Florestais, do Instituto de Florestas, DPF/IF/UFRRJ.

Os itens a seguir descrevem a obtenção do material, as operações realizadas na confecção e avaliação dos briquetes e a metodologia utilizada na avaliação dos dados obtidos.

3.1 Obtenção e preparação dos finos de carvão vegetal e resíduo celulósico

Os resíduos de finos de carvão vegetal que serviram de matéria-prima para a confecção dos briquetes avaliados no estudo, foram provenientes de moinha de carvão vegetal de eucalipto limpa, com baixa porcentagem de cinzas, pulverizada a partir de carvão vegetal “graúdo” da Empresa Eco-Briquetes, situada no município de Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro.

A empresa Eco-briquetes é uma empresa de pequeno porte que produz briquetes de carvão vegetal a partir da coleta de material residual de empacotadoras e comercializadoras de carvão no município de Volta Redonda, e utiliza em seu processo de produção, como aglutinante, o amido de milho em teores de 10%, além da secagem em estufas dos briquetes e compactação por extrusora. A Figura 4 apresenta detalhes dos briquetes produzidos pela Eco-briquetes.

Para a pesquisa, a moinha coletada foi previamente fragmentada através de golpes manuais para que originasse uma menor granulometria e, em seguida, foi utilizada uma peneira classificatória com malha de porosidade igual a 3,0 mm.

Depois de obtida a granulometria desejada, foram recolhidas três amostras dos finos de carvão vegetal para determinação da umidade. Estes teores de umidade foram obtidos pesando as três amostras e colocando na estufa regulada a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ e pesadas por vários dias seguidos até que se obtivesse a estabilidade. De posse destes valores, foram calculados os seguintes teores de umidade 8,4%, 7,6% e 5,9%.

O resíduo celulósico foi coletado na indústria de papéis Schweitzer-Mauduit do Brasil, situada no município de Barra do Piraí, no Estado do Rio de Janeiro.

A partir de laudos técnicos fornecidos pela empresa foram obtidas as informações da composição do resíduo no momento da coleta:

- cerca de 15 a 20% dos sólidos são fibras de celulose;
- sólidos fixos de 16% a 20%;
- sólidos voláteis de 3%;
- cálcio entre 750 e 800 mg/kg e
- alumínio entre 105 e 250 mg/kg.

Desse resíduo celulósico foram recolhidas cinco amostras para determinação da umidade, estes teores de umidade foram obtidos pesando as cinco amostras antes e após a colocação na estufa regulada a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ (até peso constante).

Os valores de umidade encontrados para o resíduo celulósico foram considerados na quantificação dos diferentes teores (porcentagem em relação ao peso seco do material) avaliados nos tratamentos de confecção dos briquetes ao longo do estudo.



Figura 4. Detalhes da produção de briquetes de carvão vegetal da empresa Eco-briquetes, de Volta Redonda/RJ. (a) e (b) briquetes após secagem; (c) moinha de carvão; (d) secagem em estufa; (e) e (f) empacotamento e estocagem.

3.2 Confeção dos briquetes

Para a avaliação da hipótese sugerida neste trabalho, de utilizar o resíduo celulósico como componente dos briquetes de finos de carvão vegetal, ao longo da confecção dos briquetes foram consideradas duas etapas metodológicas ou duas fases do trabalho, que são detalhadas a seguir.

Na primeira etapa, ou Fase I, foram avaliados briquetes constituídos essencialmente da moinha de carvão vegetal e do resíduo celulósico em diferentes proporções, avaliando a participação do resíduo celulósico também como aglutinante, ou seja, nesta Fase I não foi inserido na composição dos tratamentos o amido de milho.

As porcentagens de resíduo celulósico na composição dos tratamentos avaliados na Fase I foram de 25%, 30%, 35%, 40% e 45% em relação à massa seca dos componentes do briquete.

Na segunda etapa do trabalho, ou Fase II, a composição dos briquetes considerou porcentagens de resíduo celulósico de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, adicionalmente a 10% de amido de milho, ainda utilizado na função de aglutinante do briquete.

Os tratamentos considerados, assim como a análise estatística utilizada na verificação e análise dos resultados do trabalho são detalhados no item 3.4 - Delineamento experimental e análise estatística.

A mistura entre os finos de carvão vegetal e o resíduo celulósico foi feita manualmente com a preocupação de uma maior homogeneização possível entre as partículas de carvão e o resíduo celulósico garantindo um material uniforme, com plasticidade e com consistência necessária.

Como foi mencionado acima, nos briquetes da Fase II, além da moinha de carvão vegetal e o resíduo celulósico, na mistura foi acrescentado o “mingau gelatinoso” de amido de milho que foi preparado utilizando 20g de amido dissolvido em 50 mL de água, que foi acrescentado em 75 mL de água fervente para atingir a textura desejada da gelatinização. A partir deste procedimento foram feitas, nas proporções desejadas, as demais bateladas do “mingau gelatinoso” (Figura 5).



Figura 5. “Mingau gelatinoso” de amido de milho.

Os briquetes foram efetivamente produzidos em uma composição de equipamentos formados por uma prensa manual marca RIBEIRO-15ton e um molde de aço inox desenvolvido pelo Laboratório de Energia da Madeira do DPF/IF/UFRRJ. O sistema produziu um briquete por vez, sendo que foram produzidos um total de 20 briquetes para cada Fase do trabalho comentada anteriormente.

Os briquetes foram produzidos em formato de “pequenas almofadas”. As dimensões da forma utilizada foram de 50 mm de diâmetro por 17 mm de concavidade.

A pressão máxima aplicada nos briquetes foi de 13 toneladas, mantida durante 5 minutos. Esta condição a qual foram escolhidas as pressões e o tempo mantido foram estabelecidos após vários testes.

Para efeito de comparação, metade dos briquetes produzidos foram submetidos à secagem em estufa regulada a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e a outra metade foi levada para secagem ao ar livre por um período de 15 dias, tanto na fase 1 quanto na fase 2 do trabalho.

Após este tempo de secagem os briquetes foram pesados e transferidos para uma câmara fria com condições de umidade e temperatura controlada, sendo umidade a relativa de 65% e a temperatura ambiente de 20°C . Os briquetes permaneceram na câmara por um período de, aproximadamente, 90 dias até que sua umidade fosse estabilizada.

A seqüência apresentada pelas Figuras 6 a 9 apresentam detalhes do processo de confecção dos briquetes.



Figura 6. Preparo das misturas das matérias-primas pra confecção dos briquetes.



Figura 7. Detalhes do molde em aço inox utilizado na prensagem e formação dos briquetes.



Figura 8. Prensagem dos briquetes.



Figura 9. Briquetes produzidos em formato de uma pequena almofada.

3.3 Avaliações e ensaios

Os itens a seguir descrevem os ensaios e metodologias utilizadas ao longo do trabalho na avaliação dos briquetes produzidos.

3.3.1 Densidade aparente

A determinação da densidade aparente dos briquetes foi realizada através da adaptação da metodologia descrita por Trugilho et al. (1990), para a determinação da densidade de amostras de madeira, através do método de imersão e variação do peso do líquido.

Este método baseia-se no princípio de Arquimedes, onde a perda aparente de peso de um corpo imerso em um líquido é igual ao peso do líquido deslocado. Verifica-se que o empuxo sofrido pela amostra é igual ao produto de seu volume pela densidade do líquido. Assim, admitindo-se que para a água a densidade é igual a $1,000 \text{ g/cm}^3$, conclui-se que a diferença de peso indicada na balança corresponde ao volume da amostra.

No caso dos briquetes avaliados neste trabalho, cada um deles foi envolvido em um filme plástico para impermeabilização, que evitou que ocorresse a umidificação da amostra. Assim, os briquetes foram, um a um, submersos em um becker contendo água sobre uma balança.

O volume do filme plástico foi considerado desprezível no cálculo da densidade em g/cm^3 , que foi realizado após a pesagem de cada briquete segundo a relação entre a massa obtida e o volume determinado conforme descrito no parágrafo anterior.

Na determinação da densidade aparente, todos os 20 briquetes produzidos em cada fase do trabalho foram avaliados um a um.

A Figura 10 apresenta imagens da determinação do volume de um dos briquetes avaliados por meio do método de imersão e variação do peso do líquido, e da determinação da massa ou peso por pesagem simples.



Figura 10. Medição do volume e massa dos briquetes para determinação da densidade aparente.

3.3.2 Umidade de equilíbrio higroscópico

Como descrito no item 3.2, para o controle da umidade dos briquetes, tanto os que foram secos em estufa, como os que permaneceram ao ar livre por 15 dias para secagem, foram posteriormente encaminhados para a câmara climática por um período longo, onde permaneceram sob condições controladas de 65% de umidade relativa e 20°C por cerca de 90 dias até apresentarem peso constante e teor de umidade de equilíbrio com aquele ambiente estabelecido na câmara, para que a partir deste estado os briquetes fossem submetidos aos ensaios.

A seguir, ao longo da realização dos procedimentos descritos no item 3.3.4 – análise química imediata, os teores de umidade de equilíbrio apresentados pelos diferentes tratamentos foram determinados, onde se verificou a baixa variação do teor de umidade de equilíbrio entre os briquetes, em torno de 10% de U%.

O fato de manter os briquetes por um longo período na câmara climática para estabilização e homogeneização da umidade de equilíbrio, teve como objetivo fazer com que as amostras comparadas nos diferentes ensaios não possuíssem diferenças significativas de umidade e pudessem ser assim comparadas entre si.

Tanto para a quantificação da umidade de equilíbrio quanto para a análise química imediata foram considerados e avaliados como repetições um total de 12 briquetes por tratamento.

3.3.3 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, do Departamento de Produtos Florestais, do Instituto de Florestas - DPF/IF/UFRRJ para determinar o comportamento mecânico do briquete quando submetido a uma determinada carga ou esforço.

No teste de aplicação de carga foi utilizada a máquina universal de ensaios, marca Contenco, modelo UMC-300, com capacidade de 30 toneladas, que utiliza o software Pavitest ao longo da realização dos testes e determinação dos resultados. A célula de carga utilizada foi de 10 toneladas, sendo avaliados três briquetes como repetições de cada tratamento. (Figura 11).

A carga foi aplicada na parte superior dos briquetes individualmente. Para cada corpo-de-prova foi aferido o diâmetro e a altura com paquímetro digital.

A Figura 12 ilustra a medição de um dos briquetes, a realização a aplicação da carga e o mesmo briquete após a ruptura.



Figura 12. Medição e aplicação de carga nos ensaios de resistência à compressão.



Figura 11. Máquina universal de ensaios Contenco UMC 300.

3.3.4 Análise química imediata

Para a realização da análise química imediata utilizou-se a metodologia e procedimentos descritos pelas normas ASTM 1762/1964 (adaptada por Oliveira et al., 1982) e ABNT NBR 8633/84 (1984). Para um total de 12 repetições, ou 12 briquetes, de cada tratamento foi utilizada uma porção que foi levada para ser macerada, utilizando-se um macerador e um pistilo de porcelana.

A moinha de cada briquete foi peneirada utilizando duas peneiras classificatórias, sendo uma superior a 40 mesh e outra inferior a 60 mesh. Para as análises subsequentes, utilizaram-se as frações que atravessaram a peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh.

A seguir a amostra retirada foi conduzida para a estufa regulada a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, dentro de um vidro âmbar de 10 cm de altura e 2,5 cm diâmetro destampado por, aproximadamente, 48 horas.

Depois deste período foi determinada a umidade de equilíbrio higroscópico na qual os briquetes se apresentavam após o período de condicionamento descrito no item 3.3.1. Para cada repetição foi então pesado 1,0 g de amostra de briquete dentro de um cadinho previamente pesado e tarado. Cada cadinho foi tampado e conduzido a uma mufla do Laboratório de Energia da Madeira, do DPF/IF/UFRRJ, a temperatura de $950 \pm 10^\circ\text{C}$ (Figura 13), onde permaneceu por dois minutos sobre a porta aberta, por 3 minutos na borda da mufla e por 6 minutos no interior da mufla com a porta fechada.

Retirado da mufla, cada cadinho contendo as amostras foi conduzido à estufa regulada a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 5 minutos e, em seguida, foi colocado no dessecador com sílica por 10 minutos para a pesagem em balança analítica e o cálculo do teor de materiais voláteis, determinado pelo peso de 1,0 g da amostra inicial menos a massa da amostra após ser conduzida à mufla a temperatura de $950 \pm 10^\circ\text{C}$.

Para a determinação do teor de cinzas e o teor de carbono fixo, foi utilizada a mesma amostra e o mesmo cadinho da determinação do teor de materiais voláteis.

O cadinho após ser pesado em balança analítica, foi conduzido à mufla novamente com temperatura ajustada para $750 \pm 10^\circ\text{C}$, com a porta da mufla fechada, onde permaneceu por um período de 6 horas. Retirado o cadinho da mufla, a amostra foi conduzida à estufa regulada a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 5 minutos. Em seguida, foi colocada no dessecador com sílica por 10 minutos e pesada em balança analítica. O teor de cinzas foi calculado utilizando o valor da pesagem dos cadinhos após passar pela mufla à temperatura de $950 \pm 10^\circ\text{C}$. Este valor menos o valor obtido após a amostra permanecer 6 h a temperatura de $750 \pm 10^\circ\text{C}$.

Para o cálculo do teor de carbono fixo subtrai-se do peso da amostra inicial o peso relativo ao teor de materiais voláteis somado do peso relativo ao teor de cinzas.



Figura 13. Mufla utilizada ao longo da análise química imediata contendo os cadinhos com as amostras dos briquetes.

3.3.5 Teste de tamboramento

O objetivo do teste de tamboramento foi determinar a resistência dos briquetes frente à ação combinada entre a abrasão e a queda, apresentando assim o índice de friabilidade e produção de finos quando este material é submetido às ações mecânicas que simulam o manuseio, transporte e empilhamento.

O teste consiste em submeter um tambor com briquetes previamente pesados a um número determinado de rotações com velocidade pré-fixada e constante (Figura 14).

Após o período de rotação, estes briquetes são submetidos a peneiras com malhas de diferentes tamanhos, 25mm, 15mm, 5mm, 1,5mm e 1mm (Figura 15).

Não existe uma Norma específica para o teste de tamboramento de briquetes, todavia foi feita uma adaptação à Norma para teste de tamboramento de carvão vegetal ABNT - MB1375/1980.

Os briquetes foram avaliados no tamboramento, seguindo as condições de 30 rpm na rotação do tambor durante 2 minutos, sendo avaliadas três repetições para cada tratamento.



Figura 14. Tambor rotativo utilizado nos ensaios de tamboramento.



Figura 15. Peneiras com malhas de diferentes tamanhos utilizadas na avaliação do tamboramento dos briquetes.

3.3.6 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior de um combustível determina a quantidade de energia que está disponível no material e que é liberada da câmara de combustão, através de uma reação química. O número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível é expressa em kcal/kg para combustíveis sólidos e kcal/m³ para combustíveis gasosos. Quanto maior for o poder calorífico maior é a energia do combustível (JARA, 1989).

O poder calorífico poder ser determinado teoricamente através da composição química do briquete ou experimentalmente utilizando equipamentos como bombas calorimétricas e calorímetros. No Sistema Internacional, o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma (BRIANE & DOAT, 1985).

Para a determinação do poder calorífico teórico é necessário o conhecimento da composição química elementar do briquete e na prática este cálculo pode ser inviável, se não houver este conhecimento.

O poder calorífico é dividido em poder calorífico inferior (PCI) ou poder calorífico útil e o poder calorífico superior (PCS). A diferença entre os dois, é que no PCI, a água formada entra na forma de vapor, enquanto que no PCS, a água encontra-se na fase líquida. A diferença em valor entre os dois é a quantidade de calor necessária para evaporar a água contida nos gases de exaustão. Tanto o PCS quanto o PCI são obtidos através de calorimetria (PERES, 2007).

No presente trabalho, para a caracterização do poder calorífico superior, foi utilizada a norma ABNT NBR 8633/84 com o auxílio de um calorímetro de marca Ika Werke, modelo C5000 Control (Figura 16), sendo os ensaios realizados ao longo de uma parceria estabelecida entre o Departamento de Produtos Florestais - IF/UFRRJ, a UFSCar - Campus de Sorocaba/SP e o Laboratório de Tecnologia de Extrativos Florestais da UNESP - Universidade Estadual Paulista- Campus de Itapeva/SP.

A partir dos briquetes produzidos em cada tratamento, foram selecionados aproximadamente, três briquetes já testados no ensaio de resistência à compressão e foram produzidas sub-amostras (misturando-se estes três briquetes partidos) das quais cada tratamento foi avaliado a partir de duas repetições no ensaio de poder calorífico superior.



Figura 16. Calorímetro Ika Werke, modelo C500 Control utilizado na determinação do PCS.

3.4. Tratamentos considerados e delineamento estatístico

Conforme descrito anteriormente, no presente trabalho foram consideradas duas etapas, ou fases (Fase I e Fase II) ao longo dos procedimentos metodológicos adotados e conseqüente delineamento experimental.

Na Fase I foram considerados dois fatores de avaliação, sendo o primeiro fator o “teor (ou porcentagem) de resíduo celulósico” presente na composição dos briquetes e o segundo fator o “processo de secagem”.

Nesta primeira fase, para o fator teor de resíduo foram considerados cinco níveis: 25%; 30%; 35%; 40% e 45% (em relação à massa seca do briquete), e para o fator processo de secagem foram considerados dois níveis: secagem em estufa e secagem ao ar livre.

Assim, a Fase I foi avaliada estatisticamente segundo um experimento fatorial do tipo 5x2, totalizando 10 tratamentos descritos a seguir:

- briquete de finos de carvão com **25% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**25% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**30% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**30% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**35% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**35% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**40% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**40% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**45% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**45% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**

Na segunda fase do estudo, ou Fase II, o resíduo celulósico foi inserido na composição do briquete juntamente com o amido de milho, aglutinante tradicionalmente utilizado na confecção de briquetes de carvão, que foi fixado em 10% em todos os tratamentos. Nesta etapa foram inseridos teores de “resíduo celulósico” nas porcentagens de 0% (testemunha), 5%, 10%, 15%, 20% e 25% .

Assim, os tratamentos considerados na Fase 2 foram os seguintes:

- briquete de finos de carvão com 10% de amido de milho e **5% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**5% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**10% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**10% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**15% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**15% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**20% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**20% de resíduo celulósico com secagem em estufa;**
-**25% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**
-**25% de resíduo celulósico com secagem ao ar livre;**

Os resultados obtidos para cada tratamento foram avaliados e discutidos a partir da observação da média, coeficientes de variação e análises de variância - ANOVA, que considerou os níveis dos fatores de variação entre os tratamentos e suas interações.

Para as médias obtidas nos ensaios em que a análise de variância apresentou valor de F significativo foram realizados os testes de comparação de média de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Apenas para a avaliação da análise química imediata não foram consideradas as diferentes metodologias de secagem dos briquetes. Para estes resultados a análise estatística considerou um experimento inteiramente casualizado.

Para a análise estatística, especificamente no cálculo das análises de variância e testes de comparação de médias, foi utilizado o software ASSISTAT Versão beta 7.6 (2011), de uso livre e disponível na homepage <http://www.assistat.com>. O software ASSISTAT indica o teste de comparação de médias que mais se adapta aos dados avaliados.

Adicionalmente, foram determinados os coeficientes de correlação linear entre os resultados dos ensaios de densidade aparente e resistência à compressão, e densidade aparente e tamboramento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos sub-itens a seguir são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio realizado nos briquetes obtidos, em cada fase do estudo. Os resultados foram discutidos a partir da análise das médias, desvios padrões, coeficientes de variação e respectivos testes de comparações estatísticas entre as mesmas, além da observação das correlações entre parte das variáveis estudadas.

No Anexo 1 encontram-se as análises de variância que precederam à comparação das médias determinadas para cada ensaio ou variável.

4.1 FASE I

4.1.1 Densidade aparente

A Tabela 01 apresenta os resultados obtidos para a variável densidade aparente dos briquetes obtidos na **Fase I**.

Tabela 01. Resultados médios de **densidade aparente** (g/cm^3) dos briquetes produzidos na **Fase I** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
25%	0,716 <small>(2,45)</small> bA	0,682 <small>(1,98)</small> bB
30%	0,755 <small>(2,47)</small> abA	0,700 <small>(2,34)</small> bB
35%	0,772 <small>(4,69)</small> aA	0,705 <small>(3,80)</small> bB
40%	0,663 <small>(3,27)</small> cA	0,675 <small>(2,26)</small> bA
45%	0,776 <small>(6,21)</small> aA	0,770 <small>(5,99)</small> aA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

A densidade aparente média dos briquetes produzidos com resíduo celulósico com aglutinante foi de $0,72\text{g/cm}^3$, correspondendo a aproximadamente 2,16 vezes a densidade média de diferentes espécies de carvão vegetal oriundos da madeira eucalipto, que segundo Brito e Barrichelo (1980) é de $0,332\text{g/cm}^3$.

Apresentam-se na Tabela 1 os valores médios de densidade aparente dos diferentes teores de resíduo celulósico avaliados, observando-se que os briquetes a 45% apresentaram maiores densidades e conseqüentemente melhor compactação, justificando assim os melhores resultados nos ensaios de tamboramento e resistência à compressão mecânica também nos briquetes produzidos com esta porcentagem de resíduo celulósico.

Segundo descreve o trabalho de Doat e Petroff (1975), observa-se uma correlação de média intensidade entre a densidade da madeira e a friabilidade do carvão bem como entre a densidade do carvão e a sua resistência à compressão mecânica.

Neste mesmo tratamento de 45% de resíduo celulósico não houve diferença estatística, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os parâmetros tipo de secagem e teor de resíduo celulósico. O coeficiente de variação foram baixos para todos os tratamentos indicando bastante homogeneidade dos briquetes.

As médias de densidade aparente dos briquetes secos em estufa também se apresentaram ligeiramente maiores. Isto pode ser explicado pelo fato da secagem acontecer de forma mais drástica e mais rápida, alterando assim o volume da peça já que a secagem ocorre de fora para dentro, ou seja, a água contida nas extremidades evapora primeiro, ocasionando um ligeiro encolhimento da peça em relação ao tamanho original e afetando assim a densidade final.

4.1.2 Resistência à compressão

A Tabela 02 apresenta os resultados obtidos para a variável resistência à compressão, representada pela carga de ruptura de cada briquete em kgf, dos briquetes obtidos na **Fase I**.

Tabela 02. Resultados médios de **resistência à compressão** (carga de ruptura em kgf) dos briquetes produzidos na **Fase I** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
25%	4,23 (30,74)	5,57 (22,89)
30%	7,67 (12,87)	11,03 (12,37)
35%	9,17 (14,73)	9,53 (11,70)
40%	11,93 (8,27)	12,07 (15,67)
45%	18,90 (13,35)	25,80 (22,83)

Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F de interação não foi significativo (Anexo, pg. 45).

Os briquetes com tratamento de 45% em teor de resíduo celulósico foram os que apresentaram melhores resultados quanto à resistência mecânica na Fase I, contudo estes valores ainda ficaram distantes do que foi sugerido por Quirino (1989), que destaca que, para uso siderúrgico os briquetes devem apresentar resistência mecânica (carga de ruptura) na compressão maior que 70kgf, o que tem implicações principalmente no transporte e manuseio.

Os briquetes secos ao livre apresentaram maior resistência mecânica à compressão que os secos na estufa. Já que a secagem na estufa acontece mais rapidamente, a quantidade de água que se movimenta do interior para a superfície geralmente é menor que a quantidade de água que está evaporando na superfície do briquete, sendo assim, o meio da peça não acompanha a contração da camada superficial, o que gera pontos de tensões e possíveis rachaduras, diminuindo a resistência mecânica.

4.1.3 Granulometria - ensaio de tamboramento

Após os ensaios de tamboramento aplicados aos briquetes, foram determinadas as porcentagens referentes às massas de material retido nas peneiras de 25mm, 15mm, 5mm, 1,5mm, 1mm e material menor que 1mm.

Os resultados dos ensaios de tamboramento dos briquetes obtidos na Fase I podem ser observados na Tabela 03 e foram avaliados a partir dos gráficos da Figura 17.

Tabela 03. Valores da distribuição granulométrica após o ensaio de tamboramento - Fase I:

Trat.	Granulometria	Briquetes Secos em Estufa		Briquetes Secos ao Ar Livre	
		Massa (g)	%	Massa (g)	%
25%	Total	381,08	100,0%	327,58	100,0%
	25mm	0,00	0,0%	0,00	0,0%
	15mm	0,00	0,0%	0,00	0,0%
	5mm	21,69	5,7%	10,36	3,2%
	1,5mm	23,76	6,2%	26,18	8,00%
	1mm	25,32	6,6%	24,20	7,4%
	< 1mm	310,31	81,4%	266,84	81,5%
30%	Total	287,74	100,0%	358,36	100,0%
	25mm	122,12	42,4%	157,37	43,9%
	15mm	20,60	7,2%	26,67	7,4%
	5mm	33,39	11,6%	37,70	10,5%
	1,5mm	24,34	8,5%	26,87	7,5%
	1mm	18,06	6,3%	32,78	9,2%
	< 1mm	69,23	24,1%	76,97	21,5%
35%	Total	424,53	100,0%	369,77	100,0%
	25mm	42,97	10,1%	26,65	7,2%
	15mm	113,05	26,6%	21,13	5,7%
	5mm	98,85	23,3%	95,97	26,0%
	1,5mm	49,99	11,8%	48,39	13,1%
	1mm	76,35	18,0%	18,04	4,9%
	< 1mm	43,32	10,2%	159,59	43,2%
40%	Total	322,76	100,0%	281,22	100,0%
	25mm	51,60	16,0%	69,08	24,6%
	15mm	31,98	9,9%	47,05	16,7%
	5mm	42,95	13,3%	58,62	20,8%
	1,5mm	46,12	14,3%	26,06	9,23%
	1mm	40,21	12,5%	15,59	5,5%
	< 1mm	109,90	34,0%	64,82	23,1%
45%	Total	404,09	100,0%	348,02	100,0%
	25mm	321,56	79,6%	267,83	76,9%
	15mm	29,75	7,4%	47,61	13,7%
	5mm	22,98	5,7%	16,49	4,7%
	1,5mm	7,79	1,9%	9,37	2,7%
	1mm	4,38	1,1%	6,68	1,9%
	< 1mm	17,63	4,4%	0,04	2,0%



Figura 17. Gráficos da granulometria dos briquetes da Fase I após os ensaios de tamboramento.

Com base nos gráficos dos diferentes teores de resíduo celulósico pode-se observar que o comportamento friável dos briquetes apresentou relação com as densidades e com a resistência mecânica, comprovando que os briquetes com 45% de resíduo foram no geral mais densos, mais resistentes e menos friáveis.

Já os briquetes com 25% de teor de resíduo celulósico se desmancharam completamente diante do teste de tamboramento, demonstrando a pouca interação intermolecular das moléculas da moinha de carvão vegetal.

4.1.4 Poder Calorífico Superior

A Tabela 04 apresenta os resultados obtidos para a variável poder calorífico superior (PCS) a 0% de umidade dos briquetes obtidos na **Fase I**.

Tabela 04. Resultados médios de **poder calorífico superior (PCS)** a 0% de umidade, em kcal/kg, dos briquetes produzidos na **Fase I** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
25%	4480,13 (0,19) aB	4611,23 (1,88) aA
30%	4467,95 (1,66) aB	4687,76 (0,54) aA
35%	4563,11 (0,88) aA	4589,14 (0,64) aA
40%	4256,14 (0,05) bB	4426,88 (0,46) bA
45%	4189,27 (0,75) bA	4241,33 (0,12) cA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

Para os tratamentos com 25%, 30% e 35% em teor de resíduo celulósico não houve diferença estatística significativa ao nível de 5% de probabilidade em relação ao poder calorífico, tanto nos processos de secagem na estufa como também no ao ar livre. Observou-se no entanto que os valores de poder calorífico dos tratamentos com as maiores quantidades de resíduos celulósico (40 e 45%) foram inferiores aos demais ao nível de significância avaliado.

Com exceção dos tratamentos com 35 e 45% de resíduo celulósico, os demais apresentaram valores estatisticamente superiores, para o PCS, nos briquetes produzidos a partir da secagem ao ar livre.

4.2 FASE II

4.2.1 Densidade aparente

A Tabela 05 apresenta os resultados obtidos para a variável densidade aparente dos briquetes obtidos na Fase II.

Tabela 05. Resultados médios de **densidade aparente** (g/cm^3) dos briquetes produzidos na **Fase II** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
Testemunha 0%	1,099 <i>(15,61)</i> aA	1,037 <i>(26,04)</i> aB
5%	1,097 <i>(7,68)</i> bA	0,914 <i>(7,15)</i> bB
10%	0,927 <i>(17,04)</i> bcA	0,906 <i>(11,17)</i> bA
15%	0,926 <i>(8,36)</i> bcA	0,903 <i>(9,98)</i> bA
20%	0,866 <i>(5,15)</i> cA	0,829 <i>(6,11)</i> bA
25%	0,825 <i>(21,18)</i> cA	0,790 <i>(7,87)</i> bA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

A densidade aparente nesta Fase II apresentou valores maiores que na Fase I, com uma diferença bastante acentuada no briquete que foi utilizado como testemunha, onde não houve presença do resíduo celulósico, notou-se também que a densidade decresceu com o aumento da porcentagem de resíduo celulósico e que a condição de secagem na estufa favoreceu o aumento da densidade.

Tanto nos briquetes secos em estufa quanto nos secos ao ar livre a testemunha apresentou valores estatisticamente superiores nos resultados de densidade aparente da Fase II, principalmente nos valores dos briquetes secos em estufa, onde se percebeu a tendência estatística de diminuição da densidade a partir da elevação do teor de resíduo celulósico nos briquetes.

4.2.2 Resistência à compressão

A Tabela 06 apresenta os resultados obtidos para a variável resistência à compressão, representada pela carga de ruptura de cada briquete em kgf, dos briquetes obtidos na Fase II.

Tabela 06. Resultados médios de **resistência à compressão** (carga de ruptura em kgf) dos briquetes produzidos na **Fase II** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
Testemunha 0%	70,8 (44,90)	85,4 (27,59)
5%	50,6 (29,89)	57,8 (45,75)
10%	22,4 (28,69)	39,6 (57,99)
15%	20,8 (15,73)	37,4 (37,89)
20%	23,4 (13,38)	36,4 (41,14)
25%	26,2 (27,71)	35,6 (43,23)

Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F de interação não foi significativo (Anexo 1 pg. 45).

Novamente foi possível, através dos resultados obtidos, observar a relação entre a densidade e a resistência mecânica dos briquetes.

Na Fase II, onde foi utilizado o amido, foram obtidos resultados bastante superiores de resistência à compressão em relação aos briquetes da Fase I, comprovando a interação das propriedades químicas do amido que influenciam as cargas elétricas entre as fibras, finos e carga mineral, interferindo no comportamento tecnológico do briquete.

Através dos resultados da Tabela 06, pode-se observar que os briquetes da Fase II apresentaram valores mais próximos à referência do trabalho de Quirino (1989), que indica valores de carga de ruptura próxima a 70 kgf para os briquetes de carvão. Nos resultados desta Fase II os coeficientes de variação foram maiores, indicam maior heterogeneidade das repetições e briquetes, e sugerindo que os procedimentos de manufatura dos briquetes podem ter tido maior variação, possivelmente por envolverem a junção do amido, moinha de carvão e resíduo celulósico.

4.2.3 Granulometria - ensaio de tamboramento

Após os ensaios de tamboramento aplicados aos briquetes da Fase II, foram determinadas as porcentagens referentes às massas de material retido nas peneiras de 25mm, 15mm, 5mm, 1,5mm, 1mm e material menor que 1mm (Tabela 07).

Assim como na descrição dos resultados da primeira fase do estudo, para os resultados obtidos na Fase 2 foram confeccionados os gráficos da Figura 18.

Tabela 07. Valores da distribuição granulométrica após o ensaio de **tamboramento - Fase II:**

Trat.	Granulometria	Briquetes Secos em Estufa		Briquetes Secos ao Ar Livre	
		Massa (g)	%	Massa (g)	%
Test. 0%	Total	374,12	100,0%	347,20	100,0%
	25mm	373,70	99,9%	333,00	95,9%
	15mm	0,00	0,0%	6,80	2,0%
	5mm	0,00	0,0%	0,00	0,0%
	1,5mm	0,00	0,0%	0,00	0,0%
	1mm	0,00	0,0%	5,00	1,4%
	< 1mm	0,42	0,1%	2,40	0,7%
	5%	Total	401,55	100,0%	373,80
25mm		178,60	44,5%	195,80	52,4%
15mm		96,60	24,1%	31,20	8,3%
5mm		33,60	8,4%	15,50	4,1%
1,5mm		45,70	11,4%	65,00	17,4%
1mm		7,80	1,9%	6,60	1,8%
< 1mm		39,25	9,8%	59,70	16,0%
10%		Total	308,90	100,0%	329,60
	25mm	259,70	84,1%	262,16	79,5%
	15mm	0,00	0,0%	7,91	2,4%
	5mm	5,60	1,8%	32,56	9,9%
	1,5mm	7,70	2,5%	12,20	3,7%
	1mm	6,10	2,0%	7,91	2,4%
	< 1mm	29,80	9,6%	6,92	2,1%
	15%	Total	342,70	100,0%	327,80
25mm		255,00	74,4%	262,50	80,1%
15mm		28,60	8,3%	12,10	3,7%
5mm		19,50	5,7%	7,90	2,4%
1,5mm		14,60	4,3%	20,50	6,3%
1mm		5,70	1,7%	11,40	3,5%
< 1mm		19,30	5,6%	13,40	4,1%
20%		Total	412,36	100,0%	388,60
	25mm	411,50	99,8%	322,70	83,0%
	15mm	0,00	0,0%	19,50	5,0%
	5mm	0,00	0,0%	6,80	1,7%
	1,5mm	0,00	0,0%	13,30	3,4%
	1mm	0,00	0,0%	3,80	1,0%
	< 1mm	0,86	0,2%	22,50	5,8%
	25%	Total	419,50	100,0%	397,85
25mm		384,40	91,6%	287,40	72,2%
15mm		12,70	3,0%	20,40	5,1%
5mm		6,10	1,5%	10,40	2,6%
1,5mm		5,80	1,4%	40,40	10,2%
1mm		2,70	0,6%	5,90	1,5%
< 1mm		7,80	1,9%	33,35	8,4%



Figura 18. Gráficos da granulometria dos briquetes da **Fase II** após os ensaios de **tamboramento**.

O teste de tamboramento para a Fase II evidenciou a eficiência do amido na função de aglutinante, contudo observou-se que o resíduo celulósico junto ao amido apresentou uma boa interação e bons resultados no quesito friabilidade, no tratamento onde foi inserido 5% de resíduo celulósico o comportamento do briquete fugiu do esperado, mas este fato pode ser atribuído a uma provável falha na compactação.

4.2.4 Poder Calorífico Superior

A Tabela 08 apresenta os resultados obtidos para a variável poder calorífico superior (PCS) a 0% de umidade dos briquetes obtidos na **Fase II**.

Tabela 08. Resultados médios de **poder calorífico superior (PCS)** a 0% de umidade, em kcal/kg, dos briquetes produzidos na **Fase II** considerando a interação entre os fatores teor de resíduo celulósico e processo de secagem:

Teor de resíduo celulósico	Processo de secagem	
	Estufa	Ar livre
Testemunha 0%	4427,83 <small>(0,40)</small> abA	4371,12 <small>(1,74)</small> aA
5%	4395,71 <small>(2,69)</small> abA	4490,52 <small>(0,23)</small> aA
10%	4477,26 <small>(0,52)</small> aA	4564,19 <small>(0,64)</small> aA
15%	4633,44 <small>(0,22)</small> aA	4386,88 <small>(0,98)</small> aB
20%	4191,42 <small>(0,56)</small> bB	4384,01 <small>(0,11)</small> aA
25%	4412,43 <small>(3,24)</small> abA	4442,04 <small>(4,22)</small> aA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

O poder calorífico da Fase II teve uma ligeira que em relação aos briquetes da Fase I. Em comparação aos briquetes desta mesma fase observou-se que quanto à porcentagem de resíduo celulósico, os resultados não diferiram estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5%, mas em relação à forma de secagem foi constatada diferença significativa no briquete que foi produzido com 20% de teor de resíduo celulósico.

4.3 ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS (FASES I e II)

A Tabela 09 apresenta os resultados médios obtidos nas análises químicas imediatas, incluindo a verificação do teor de umidade de equilíbrio das amostras obtidas a partir dos briquetes produzidos nas Fases I e II do trabalho conjuntamente.

Tabela 09. Resultados de teor de materiais voláteis (%), teor de cinzas (%) e carbono fixo (%) obtidos nas análises químicas imediatas:

Tratamento	Umidade de Equilíbrio (%)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
T1 - 25% Fase I	11,35 (9,85) a	27,08 (14,64) c	28,33 (18,94) a	44,58 (13,06)
T2 - 30% Fase I	10,93 (7,45) a	27,50 (28,49) bc	34,17 (20,54) a	38,33 (15,06)
T3 - 35% Fase I	10,66 (6,47) a	34,33 (13,22) a	27,83 (22,71) a	37,83 (17,01)
T4 - 40% Fase I	11,03 (6,94) a	26,67 (11,57) c	26,83 (14,72) a	46,50 (8,28)
T5 - 45% Fase I	10,87 (6,45) a	31,00 (9,33) abc	24,33 (31,80) a	44,67 (12,35)
T6 - 0% Fase II	10,78 (10,68) a	27,50 (14,50) bc	31,67 (18,23) a	40,83 (10,22)
T7 - 5% Fase II	10,96 (8,80) a	33,17 (13,29) ab	30,83 (16,70) a	36,00 (8,03)
T8 - 10% Fase II	10,95 (8,42) a	26,67 (12,21) c	36,25 (8,57) a	37,08 (6,94)
T9 - 15% Fase II	10,89 (6,94) a	36,67 (15,75) a	23,33 (16,68) a	40,00 (14,10)
T10 - 20% Fase II	10,91 (8,26) a	27,92 (11,97) bc	33,33 (16,10) a	38,75 (14,69)
T11 - 25% Fase II	10,95 (8,46) a	28,33 (11,49) bc	35,00 (12,18) a	36,67 (12,10)

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, segundo o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas avaliam as médias da mesma coluna, letras maiúsculas as médias da mesma linha. Os valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

Observou-se que na Fase I o teor de materiais voláteis teve um crescente aumento conforme foi aumentada também a porcentagem de resíduo celulósico nas amostras dos briquetes com 25%, 30% e 35%. Nas amostras com 40% e 45% apesar do resultado sair de um do comportamento linear crescente esperado, ainda assim ocorreram valores próximos.

Segundo Juvillar (1980), o carvão vegetal (base seca) apresenta em média a composição química de 5% em teor de cinzas, 25% em teor de materiais voláteis e 70% em teor de carbono fixo.

Este alto valor encontrado nas amostras para teor de cinzas pode ser explicado pela presença, no resíduo celulósico, de cargas (caulim, carbonato de cálcio, dióxido de titânio e silicato hidratado de magnésio) geralmente utilizadas para alterarem a alvura, a lisura, a opacidade e a gramatura do papel, além do uso de aditivos (colas, revestimentos, coligantes, dispersantes, antiespumantes, agentes preservativos, entre outros) que são utilizados para alterarem as propriedades físicas, químicas, mecânicas e ópticas do papel, e provavelmente também estão presentes no resíduo celulósico.

As cinzas constituem material de origem mineral, não-orgânica, inerte e não-combustível. O teor de carbono fixo e o poder calorífico dependem da quantidade de material orgânico presente no combustível (QUIRINO,1991).

No ensaio de análise química imediata, o carbono durante o processo permanece com uma parte dele contida e fixada no resíduo sólido e outra parte é desprendida juntamente com outros compostos na forma de gases, e este fato pode então justificar o baixo teor de carbono fixo e o valor de materiais voláteis acima da média esperada.

Na Fase II os resultados para teor de materiais voláteis, cinzas, e carbono fixo não foram discrepantes dos resultados da Fase I apesar da introdução do amido de milho na Fase II.

4.4 CORRELAÇÕES

Para incremento da discussão dos resultados obtidos foram avaliadas duas correlações entre os resultados de ensaios. Na primeira correlação foi verificada a variação dos dados de densidade básica dos briquetes produzidos (Fase I e Fase II em conjunto) em função da resistência à compressão ou carga aplicada até o momento da ruptura.

Através da Figura 19 podemos observar a alta correlação obtida entre a densidade e a carga de ruptura, comprovando a informação de que quanto maior for a densificação conseguida no processo de briquetagem, maior a capacidade do briquete suportar carga.

Os briquetes da Fase II apresentaram densidades bastante superiores aos fabricados na Fase I o que conseqüentemente leva a maiores resistências, fato que pode ser explicado pela presença do aglutinante tradicional, amido de milho, na composição dos briquetes.

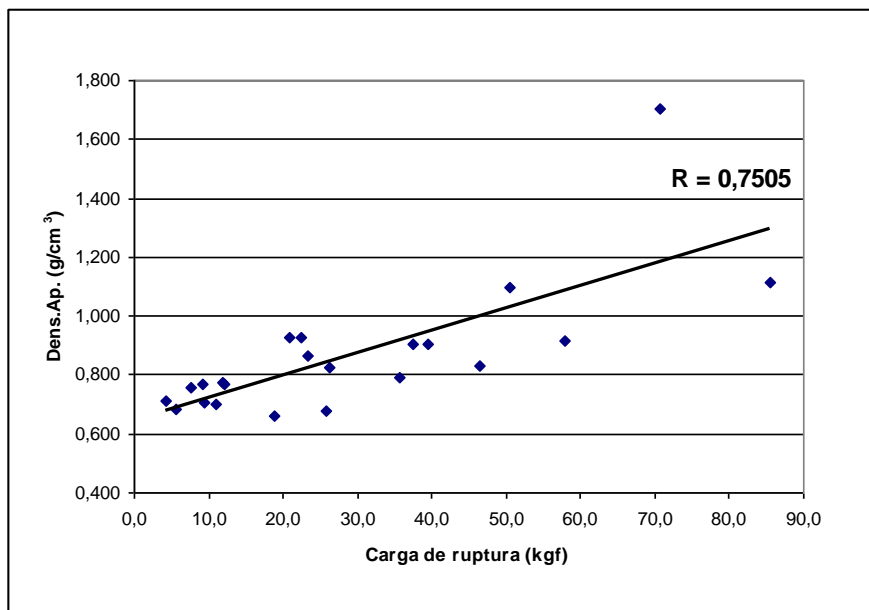


Figura 19. Gráfico da correlação entre a densidade aparente e a carga de ruptura encontrada no ensaio de resistência à compressão dos briquetes (R = coeficiente de correlação).

Embora com um coeficiente de correlação menor, 0,4884 (Figura 20), a correlação entre os dados de densidade aparente e a porcentagem de material retido na malha de 25 mm, no teste de tamboramento, indicou que os briquetes mais densos também foram os menos quebradiços e friáveis.

Sendo esta uma característica importante na produção de briquetes de finos de carvão, novamente ficou aparente a partir da análise dos resultados obtidos que a utilização dos aglutinante amido de milho possibilitou melhores resultados na resistência dos briquetes.

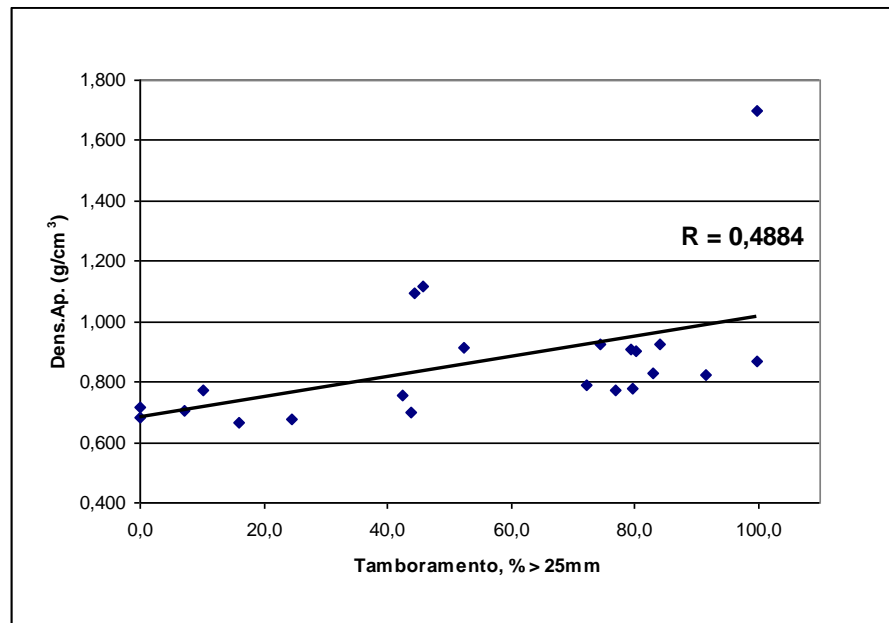


Figura 20. Gráfico da correlação entre a densidade aparente e a % de material retido na peneira de 25 mm no ensaio de tamboramento (R = coeficiente de correlação).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os resultados obtidos através dos ensaios propostos dos briquetes de finos de carvão vegetal, pode-se concluir que:

- os briquetes produzidos com finos de carvão vegetal e resíduos celulósicos se mostraram uma fonte viável para geração de energia e aproveitamento destes materiais, gerados como sub-produtos do mercado de carvão vegetal e da indústria de papel e celulose;

- os briquetes produzidos com o aglutinante tradicional (Fase II do trabalho) apresentaram maior densidade e menor friabilidade, o que levou a constatação de que a retirada total do amido de milho da composição dos briquetes foi prejudicial à sua qualidade;

- a utilização conjunta do amido de milho como aglutinante e do resíduo celulósico pode ser realizada, produzindo em determinadas composições, briquetes resistentes e de boa qualidade;

- o processo de secagem em estufa, de uma maneira geral, prejudicou a qualidade dos briquetes, sendo que em processos industriais deve-se analisar com cautela a necessidade de diminuir por demais o tempo da secagem, pois o que foi observado no presente trabalho é que a secagem ao ar livre obteve melhores resultados;

- os briquetes de carvão produzidos com o resíduo celulósico podem ser utilizados como fonte energética em segmentos onde a emissão de gases formados não compromete o produto, como por exemplo, as indústrias cerâmicas, que necessitam de matéria-prima para geração de energia em grande escala; além disso, o alto teor de cinzas formado por estes briquetes, ricos em minerais, podem eventualmente ser ainda utilizados como adubo mineral para agricultura;

- os briquetes analisados se mostraram uma alternativa interessante no aproveitamento conjunto de dois tipos de resíduos, contribuindo para uma melhoria na gestão ambiental dos processos citados como geradores destes materiais (indústria de papel e celulose e segmentos consumidores de carvão vegetal);

- novos estudos, que levem em consideração a questão dos custos envolvidos na logística da produção dos briquetes de finos de carvão em conjunto com os resíduos celulósicos devem ser realizados;

- estudos voltados à emissão de gases ao longo da combustão dos briquetes com a composição avaliada neste trabalho, podem gerar importantes resultados adicionais aos encontrados nesta pesquisa;

- através da experiência adquirida com este estudo, levantamento das informações disponíveis na literatura, e ainda a partir dos contatos com empresas envolvidas no trabalho (Eco-briquetes e Schweitzer - Mauduit do Brasil), foi possível evidenciar a importância do desenvolvimento de tecnologias adequadas ao consumo e aproveitamento de resíduos industriais, sendo a briquetagem uma alternativa interessante e muitas vezes viável, dependendo de fatores como a relação de oferta e demanda (matéria-prima e produto) e custos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, R.C. **Briquetagem de Carvão Vegetal**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte – MG, Série de Publicações Técnicas n.8, p: 197 -206, 1982.

ASSISTAT – ASSISTÊNCIA ESTATÍSTICA VERSÃO 7.6 BETA (2011) – Disponível em: <<http://www.assistat.com>> DEAG – CTRN -Universidade Federal de Campina Grande UFCG – 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8633/84**. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112/86**. Carvão vegetal – **Análise imediata**. São Paulo, 1986.

BEZZON, G. Métodos de compactação de biomassa. In: **Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa**. Manaus: EDUA/EFEL, 1997, p39-57.

BRIANE, D.; DOAT, J.; **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.; Correlações entre Características Físicas e Químicas da Madeira e a Produção de Carvão:Densidade da madeira x Densidade do carvão. **IPEF** n.20, p.101-113, jun. 1980.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **Briquetagem**. Rio de Janeiro. Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios, dez 2004, cap.15, p.613 a 636.

CORRADINI, E; **Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose**. **Polímeros**, São Carlos, v. 15, n. 4, Nov. 2005.

DOAT, J.; PETROFF, G. **La carbonization des bois tropicaux**. **Bois et forêts des tropiques**, Nogent-sur-Marne V.159, p. 55-72, jan./fev. 1975.

FELFLI, F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003, 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2003.

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JR., F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais/DPQ/IBDF, 1984.

FONTES, P.J.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. 1989. p.1-14.

JARA, E.R.P.; **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, n. 1797)

JUVILLAR, J.B.; **Tecnologias de transformação de madeira em carvão**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC - Série de Publicações Técnicas / SPT – Belo Horizonte, 1980.

LIMA, U. A. *et. al.*; **Biotecnologia Industrial**. Vol. 3. São Paulo: Blucher, 2001.

LUCENA, D.A.;MEDEIROS, R.D.; FONSECA, U.T.;ASSIS,P.S. Aglomeração de moínha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, 1996. V.4, n.4, p. 1-6, abr.-jun. 2008.

MAGOSSI, D.C.; **A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguaíva – Paraná**. 2007, 88p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Curitiba, 2007.

MELO, V. P. S.; **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. Viçosa, 2000. 53p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2000.

MORO, J.P.; Briquetagem de finos de carvão vegetal. In: 2ª JORNADA DE ENGENHARIA DOS PAÍSES DE LÍNGUA PROTUGUESA. Anais... Rio de Janeiro, 1987. v.1. p.1-14.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R.; **Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte, fundação CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1982,173p.

PEREIRA, F.A.; **Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de finos de carvão vegetal**. 2009. 50p. Viçosa, Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009.

PERES, S.; **Caracterização e Determinação do Poder Calorífico e do Número de Cetano de Vários Tipos de Biodiesel Através da Cromatografia.** Universidade de Pernambuco - Recife-PE, 2007, 6p.

PIETSCH, W.; **Roll Pressing** U.S.A.: Heiden, 1976, 137p.

QUIRINO, W. F. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Piracicaba, 1991, 64p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 1991.

QUIRINO, W. F., OKINO, E. Y. A. **Aspectos Técnicos da Briquetagem do Carvão Vegetal no Brasil.** Laboratório de Produtos Florestais -LPF - Série Técnica Nº 1, Brasília, 1989, 14p.

QUIRINO, W. F., VALE, A. T. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos.** Publicado na Revista da Madeira nº 89, abril, 2003, p. 100-106.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades.**-Viçosa, MG: UR. EPAMIG ZM, 2010. 80 p. (EPAMIG. Boletim Técnico, 95).

RUSSEL, J. B.; **Química Geral.** McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1981.

SALEME, J. E. F. **Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal.** Ouro Preto, Escola de Minas e Metalurgia, 1992, 19p.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SODHI, N. S.; GILL, B. S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v.81, n.219-231, 2003.

SOLOMONS, T. W. G; **Química Orgânica 2**, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1996, p 388-390.

SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T.. Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho. **Polímeros.** São Carlos, V. 10, n. 1, Mar. 2000.

TAVARES, D. Q.; **Contribuição ao estudo da estrutura do grânulo de amido de milho, tratamento térmico, hidrólise enzimática e permeação em gel.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 1993.

TEIXEIRA, M. A.V. et al . ; Ocorrência e caracterização do amido resistente em amidos de milho e de banana. **Ciênc. Technol. Aliment.** , Campinas, v. 18, n. 2, Maio, 1998.

TRUGILHO, P.F.; SILVA, D.A.; FRAZÃO, F.J.L.; MATOS, J.L.M. Comparação de métodos de determinação de densidade básica em madeiras. **Acta Amazônica**, V.20 p 307-319, 1990.

ANEXO

Densidade Aparente - FASE I

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.10/06/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator 1 (Teor de Resíduo)	4	0.08786	0.02196	26.4172 **
Fator 2 (Tipo de Secagem)	1	0.01521	0.01521	18.2996 **
Interação Fator 1 x Fator 2	4	0.01512	0.00378	4.5462 **
Tratamentos	9	0.11819	0.01313	15.7948 **
Resíduo	60	0.04989	0.00083	
Total	69	0.16807		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

40%	0.77279 a
35%	0.73864 b
30%	0.72707 bc
25%	0.69757 cd
45%	0.66907 d

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	0.73577 a
Ar Livre	0.70629 b

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
25%	0.7134 bA	0.6817 bB
30%	0.7546 abA	0.6996 bB
35%	0.7720 aA	0.7053 bB
40%	0.7759 aA	0.7697 aA
45%	0.6630 cA	0.6751 bA

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Densidade Aparente - FASE II

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator1(Teor de Resíduo)	5	0.96207	40.7699 **	
Fator2(Tipo de Secagem)	1	0.65254	27.6528 **	
Int. F1xF2	5	1.23950	0.24790	10.5053 **
Tratamentos	11	6.70240	0.60931	25.8208 **
Resíduo	108	2.54854	0.02360	
Total	119	9.25094		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

Test. 0%	1.40920 a
5%	1.00550 b
10%	0.91660 bc
15%	0.91425 bc
20%	0.84750 c
25%	0.80730 c

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	1.05713 a
Ar Livre	0.90965 b

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
Test. 0%	1.7012 aA	1.1172 aB
5%	1.0973 bA	0.9137 bB
10%	0.9274 bcA	0.9058 bA
15%	0.9257 bcA	0.9028 bA
20%	0.8662 cA	0.8288 bA
25%	0.8250 cA	0.7896 bA

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Resistência à Compressão - FASE I

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.11/06/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator1(Teor de Resíduo)	4	1024.42200	256.10550	46.7204 **
Fator2(Tipo de Secagem)	1	43.92300	43.92300	8.0127 *
Int. F1xF2	4	47.38867	11.84717	2.1612 ns
Tratamentos	9	1115.73367	123.97041	22.6155 **
Resíduo	20	109.63333	5.48167	
Total	29	1225.36700		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

25%	4.90000 c
30%	9.35000 b
35%	9.35000 b
40%	12.00000 b
45%	22.35000 a

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	10.38000 b
Ar Livre	12.80000 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
25%	4.2333	5.5667
30%	7.6667	11.0333
35%	9.1667	9.5333
40%	11.9333	12.0667
45%	18.9000	25.8000

Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F de interação não foi significativo para Fator 1 x Fator 2.

Resistência à Compressão - FASE II

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator1(Teor de Resíduo)	5	19066.73333	3813.34667	11.6210 **
Fator2(Tipo de Secagem)	1	3226.66667	3226.66667	9.8332 **
Int. F1xF2	5	407.73333	81.54667	0.2485 ns
Tratamentos	11	22701.13333	2063.73939	6.2892 **
Resíduo	48	15750.80000	328.14167	
Total	59	38451.93333		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$) . * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

Test. 0%	78.10000 a
5%	54.20000 ab
10%	31.00000 bc
15%	29.10000 c
20%	34.90000 bc
25%	30.90000 bc

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	50.36666 a
Ar Livre	35.70000 b

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
Test. 0%	70.8000	85.4000
5%	50.6000	57.8000
10%	22.4000	39.6000
15%	20.8000	37.4000
20%	23.4000	46.4000
25%	26.2000	35.6000

Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F de interação não foi significativo para Fator 1 x Fator 2.

Poder Calorífico Superior - FASE I

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFMG - Atualiz.11/06/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator1(Teor de Resíduo)	4	433026.12257	108256.53064	61.4174 **
Fator2(Tipo de Secagem)	1	71935.21458	71935.21458	40.8112 **
Int. F1xF2	4	26107.60277	6526.90069	3.7029 *
Tratamentos	9	531068.93992	59007.65999	33.4769 **
Resíduo	10	17626.36180	1762.63618	
Total	19	548695.30172		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

25%	4545.68000 a
30%	4577.85500 a
35%	4576.12300 a
40%	4341.50500 b
45%	4215.29700 c

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	4391.31900 b
Ar Livre	4511.26500 a

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
25%	4480.1300 aB	4611.2300 aA
30%	4467.9500 aB	4687.7600 aA
35%	4563.1100 aA	4589.1350 aA
40%	4256.1350 bB	4426.8750 bA
45%	4189.2700 bA	4241.3250 cA

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Poder Calorífico Superior - FASE II

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.12/06/2011

EXPERIMENTO FATORIAL - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator1(Teor de Resíduo)	5	144003.49059	28800.69812	4.3377 *
Fator2(Tipo de Secagem)	1	1688.57150	1688.57150	0.2543 ns
Int. F1xF2	5	116833.08702	23366.61740	3.5192 *
Tratamentos	11	262525.14911	23865.92265	3.5944 *
Resíduo	12	79676.26855	6639.68905	
Total	23	342201.41766		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Médias do Fator1 (Teor de Resíduo)

Test. 0%	4399.47300 ab
5%	4443.11200 ab
10%	4520.72300 a
15%	4510.15500 a
20%	4287.71200 b
25%	4427.23200 ab

Médias do Fator2 (Tipo de Secagem)

Estufa	4423.01300 a
Ar Livre	4439.78900 a

MÉDIAS DE INTERAÇÃO - Médias Fator 1 x Fator 2

Fator 1	Fator 2	
	Estufa	Ar Livre
Test. 0%	4427.8300 abA	4371.1150 aA
5%	4395.7100 abA	4490.5150 aA
10%	4477.2600 aA	4564.1850 aA
15%	4633.4350 aA	4386.8750 aB
20%	4191.4150 bB	4384.0100 aA
25%	4412.4300 abA	4442.0350 aA

Minúsculas: colunas, Maiúsculas: linhas

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Análise Química Imediata – FASES I e II

- Umidade de equilíbrio (%)

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFMG - Atualiz.13/06/2011

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	10	3.66928	0.36693	0.4587 ns
Resíduo	121	96.79227	0.79994	
Total	131	100.46155		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Umidade de equilíbrio (%) - Médias dos Tratamentos

T1	25% Fase I	11.35417 a
T2	30% Fase I	10.93333 a
T3	35% Fase I	10.66167 a
T4	40% Fase I	11.03083 a
T5	45% Fase I	10.86833 a
T6	0% Fase II	10.78000 a
T7	5% Fase II	10.96167 a
T8	10% Fase II	10.94833 a
T9	15% Fase II	10.88917 a
T10	20% Fase II	10.81083 a
T11	25% Fase II	10.94833 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

- Teor de Materiais Voláteis (%)

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.13/06/2011

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	10	1484.22727	148.42273	7.5369 **
Resíduo	121	2382.83333	19.69284	
Total	131	3867.06061		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Teor de Materiais Voláteis (%) - Médias dos Tratamentos

T1	25% Fase I	27.08333	c
T2	30% Fase I	27.50000	bc
T3	35% Fase I	34.33333	a
T4	40% Fase I	26.66667	c
T5	45% Fase I	31.00000	abc
T6	0% Fase II	27.50000	bc
T7	5% Fase II	33.16667	ab
T8	10% Fase II	26.66667	c
T9	15% Fase II	36.66667	a
T10	20% Fase II	27.91667	bc
T11	25% Fase II	28.33333	bc

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

- Teor de Cinzas (%)

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	10	2948.40909	294.84091	2.1607 *
Resíduo	121	16511.25000	136.45661	
Total	131	19459.65909		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Teor de Cinzas (%) - Médias dos Tratamentos

T1	25% Fase I	28.33333 a
T2	30% Fase I	34.16667 a
T3	35% Fase I	27.83333 a
T4	40% Fase I	26.83333 a
T5	45% Fase I	24.33333 a
T6	0% Fase II	31.66667 a
T7	5% Fase II	30.83333 a
T8	10% Fase II	36.25000 a
T9	15% Fase II	23.33333 a
T10	20% Fase II	33.33333 a
T11	25% Fase II	35.00000 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

- Carbono Fixo (%)

ASSISTAT Versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFMG - Atualiz.14/06/2011

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO - QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	10	1562.87879	156.28788	6.3621 **
Resíduo	121	2972.41667	24.56543	
Total	131	4535.29545		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$). ns não significativo ($p \geq .05$)

Carbono Fixo (%) - Médias dos Tratamentos

T1	25% Fase I	44.58333 ab
T2	30% Fase I	38.33333 bc
T3	35% Fase I	37.83333 c
T4	40% Fase I	46.50000 a
T5	45% Fase I	44.66667 ab
T6	0% Fase II	40.83333 abc
T7	5% Fase II	36.00000 c
T8	10% Fase II	37.08333 c
T9	15% Fase II	40.00000 abc
T10	20% Fase II	38.75000 bc
T11	25% Fase II	36.66667 c

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

* * *