

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

RICARDO REZENDE LUIZ DE OLIVEIRA

**MOLDAGEM DE BRIQUETES COM FINOS DE CARVÃO VEGETAL
AGLUTINADOS COM PARAFINA: CARACTERIZAÇÃO DE ALGUMAS
PROPRIEDADES**

Sorocaba
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

RICARDO REZENDE LUIZ DE OLIVEIRA

**MOLDAGEM DE BRIQUETES COM FINOS DE CARVÃO VEGETAL
AGLUTINADOS COM PARAFINA: CARACTERIZAÇÃO DE ALGUMAS
PROPRIEDADES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação para obtenção do título de Mestre em
Ciência dos Materiais

Orientação: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji
Co-Orientação: Prof^a. Dr^a. Jane M. F. de Paiva

Sorocaba
2013

Oliveira, Ricardo Rezende Luiz de
O48m Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com
parafina: caracterização de algumas propriedades / Ricardo Rezende Luiz de
Oliveira. -- Sorocaba, 2013.
00 f. : il. (color.) ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, *Campus*
Sorocaba, 2013

Orientador: Fábio Minoru Yamaji.

Banca examinadora: Ana L. P. S. M. Pincelli, Vagner Botaro.

Bibliografia

1. Biomassa. 2. Tecnologia da madeira. I. Título. II. Sorocaba -
Universidade Federal de São Carlos.

CDD 662

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.

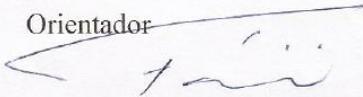
FOLHA DE APROVAÇÃO

RICARDO REZENDE LUIZ DE OLIVEIRA

**MOLDAGEM DE BRIQUETES COM FINOS DE CARVÃO VEGETAL
AGLUTINADOS COM PARAFINA: CARACTERIZAÇÃO DE ALGUMAS
PROPRIEDADES**

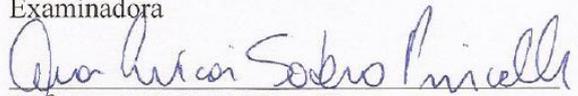
Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação, para obtenção do título de
Mestre em Ciência dos Materiais.
Universidade Federal de São Carlos.
Sorocaba, fevereiro de 2013.

Orientador



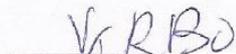
Dr. Fábio Minoru Yamaji
Universidade Federal de São Carlos/Campus Sorocaba

Examinadora



Dr.^a Ana L. P. S. M. Pincelli
Faculdade de Tecnologia - FATEC

Examinador



Dr. Vagner Botaro
Universidade Federal de São Carlos/Campus Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS DE SOROCABA

Rodovia João Leme dos Santos, km 110
Bairro Itinga
Telefone: (15) 3229-5941
CEP 18052-780 - Sorocaba - São Paulo – Brasil
<http://www.ppgcm.ufscar.br/> : ppgcm@ufscar.br



ATA GERAL DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE RICARDO REZENDE LUIZ DE OLIVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS, CURSO DE MESTRADO, DO CCTS - CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE – UFSCAR / CAMPUS SOROCABA.

Aos sete dias do mês de fevereiro de 2013, às 14:30h na Sala AT 11, do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, UFSCar - *campus* Sorocaba, reuni-se a Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, Prof^a. Dr^a. Ana Lúcia P. Sodero M. Pincelli, do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, campus Capão Bonito, sob a presidência do primeiro, para a Defesa de Dissertação de **RICARDO REZENDE LUIZ DE OLIVEIRA**, intitulada: **“Moldagem de Briquetes de Fino de Carvão Vegetal Aglutinados com Parafina: Caracterização de algumas Propriedades”**, de acordo com o regulamento do Programa, tendo o(a) candidato(a) recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FÁBIO MINORU YAMAJI

Prof. Dr. VAGNER ROBERTO BOTARO

Prof^a. Dr^a. ANA LÚCIA P. SODERO M. PINCELLI



Á meus pais David e Nair
Á meu irmão Renato

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por estar sempre comigo;

Aos meus pais David e Nair, pelo amor, incentivo e ajuda;

Ao meu irmão Renato pela ajuda e amizade;

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, pela orientação e amizade;

À Prof^a. Dr^a. Jane M. F. de Paiva, pela orientação e amizade.

Ao Prof. Dr. Vagner Botaro, pela contribuição, atenção e amizade;

Ao Prof. Dr. Fábio de Lima Leite pela excelente oportunidade oferecida e amizade;

Aos colegas de Mestrado e Doutorado pela amizade e boa convivência;

Á Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Campus Sorocaba/SP e ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, pela oportunidade e apoio;

Ao CNPQ, pela bolsa concedida.

RESUMO

OLIVEIRA, Ricardo. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: Caracterização de algumas propriedades. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades dos briquetes produzidos com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina. Para confeccioná-los foram utilizadas três frações de fino de carvão (20,35 e 60 mesh) e um aglutinante, a parafina. Inicialmente, o carvão foi fragmentado em pequenos pedaços, moído e peneirado e os finos foram assim produzidos, misturado e homogeneizado ao aglutinante em proporção de 15, 25 e 35%. As misturas realizadas foram levadas à estufa, para que a parafina se fundisse, e posteriormente levadas para a moldagem em prensa hidráulica de laboratório, onde foi aplicada uma pressão de 1250 Kgf.cm⁻² durante 30 segundos. De acordo com os resultados, os briquetes produzidos tiveram aumento no poder calorífico de acordo com o aumento no teor de aglutinante chegando a 8588 Kcal.kg⁻¹ nos briquetes aglutinados com 35% de parafina. O teor de cinzas, não foi afetado pelo aglutinante uma vez que a parafina não produziu cinzas em seu processo de combustão, resultado analisado através do ensaio por termogravimetria. Foi realizado também o teste de índice de combustão utilizando um dispositivo-teste, onde gráficos de temperatura vs. tempo e massa vs. tempo foram gerados a fim de se conhecer mais sobre propriedades dos briquetes no processo de combustão. A resistência mecânica foi de fato uma característica importante proporcionada aos briquetes pelo aglutinante parafina chegando a uma resistência a compressão diametral de 0,785 MPa, valor expressivo tendo em vista a ausência de resistência nos briquetes sem o aglutinante; e gerando finos, no ensaio de tamboramento, em porcentagem de 5,38%, evidenciando alta resistência mecânica, propriedade essencial no processo de transporte e armazenamento. O ensaio de distribuição da parafina no briquete mostrou que o aglutinante migrou para as extremidades, caracterizando-o como aglutinante tipo filme. Quanto maior o teor de aglutinante parafina, menor foi o teor de umidade dos briquetes. A absorção de umidade foi mínima com valores médios de 5%, isso evidencia a proteção à umidade proporcionada pelo aglutinante.

Palavras-chave: Biomassa. Bioenergia.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Ricardo. Moulding briquettes with fine charcoal bonded with paraffin: Characterization of some properties. 2013. Thesis (Master in Material Science) – Center for Science and Technology for sustainability, Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2013.

The aim of this study was to evaluate the properties of briquettes made from charcoal fines bonded with paraffin. To prepare them were used three fractions of fine coal (20, 35 and 60 mesh) and a binder, the paraffin. Initially, the coal was fragmented into small pieces, milled and sieved and the fines thus produced were mixed and homogenized to the binder in a proportion of 15, 25 and 35%. The mixtures were taken to the oven, so the paraffin is melted and then taken to a laboratory hydraulic pressure where was applied a compression force of 1250 Kgf.cm^{-2} for 30 seconds. According to the results, the briquettes produced had an increase in heating power in accordance with increase in the content of binder reaching $8588 \text{ kcal.Kg}^{-1}$ in briquettes bound with 35% of paraffin. The ash content was not affected by the binder since the paraffin produces no ash in the process of combustion. It was also accomplished the combustion index test using a combustion device, where temperature vs. time graphs and mass vs. time graphs were generated in order to learn more of its properties in the combustion process. The mechanical strength was indeed an important feature provided by the binder paraffin to the briquettes reaching a diametrical compression strength of 0.785 MPa, significant value compared to the lack of resistance in the briquettes without the binder, and generating fine in percentage of 5.38%, showing high mechanical strength, essential property in the process of transportation and storage. The assay distribution in paraffin briquette showed that the binder migrated to the edges, characterizing it as a binder type film. The higher the content of paraffin binder, the lower the moisture content of the briquettes. The moisture absorption was minimal with average values of 5%, presenting the moisture protection provided by the binder

Keywords: Biomass. Bioenergy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS ATÉ O SÉCULO XX E CENÁRIO PARA 2100	14
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA BIOMASSA	16
FIGURA 3 - PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	16
FIGURA 4 - DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO: (A) MICROFOTOGRAFIA ELETRÔNICA DE FRAGMENTOS DE CARVÃO; (B) ESTRUTURA LAMELAR DO CARVÃO; (C) ASPECTO DAS LAMELAS DE CARVÃO E (D) ESTRUTURA AROMÁTICA POLICÍCLICA CONDENSADA DE CARVÃO VEGETAL	17
FIGURA 5 - PAÍSES LIDERES EM PRODUÇÃO DE CARVÃO	18
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM MILHARES DE METROS CÚBICOS	19
FIGURA 7 - PRENSA EXTRUSORA DE PISTÃO MECÂNICO	22
FIGURA 8 - PRENSA EXTRUSORA DE ROSCA SEM FIM	22
FIGURA 9 - PRENSA HIDRÁULICA	22
FIGURA 10 - PRENSA PELETIZADORA	23
FIGURA 11 - MICROSCOPIA ATÔMICA APRESENTANDO O CRESCIMENTO EM ESPIRAL DE UM CRISTAL DE PARAFINA	27
FIGURA 12 - RESULTADO DE TERMOGRAVIMETRIA PARA A PARAFINA COMERCIAL E A PARAFINA PETROBRÁS/RELAM	28
FIGURA 13 - FINO DE CARVÃO VEGETAL	29
FIGURA 14 - PARAFINA A GRANEL	30
FIGURA 15 - CONJUNTO DE PENEIRAS E ORBITAL COM BATIDAS NO TOPO	31
FIGURA 16 - CAIXA VOLUMÉTRICA E VOLUME DE PREENCHIMENTO	34
FIGURA 17 - FOTO ILUSTRATIVA DO ANALISADOR DE TGA PYRIS	35
FIGURA 18 - BRIQUETE DE FINO DE CARVÃO VEGETAL AGLUTINADO COM PARAFINA	35
FIGURA 19 – MOLDES (A) E PRENSA HIDRÁULICA (B) UTILIZADA NA COMPACTAÇÃO DOS RESÍDUOS	36
FIGURA 20 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA NA EMIC (A) E ESQUEMA ILUSTRANDO AS FORÇAS APLICADAS AO BRIQUETE NO ENSAIO (B)	38
FIGURA 21 - EQUIPAMENTO (A) E ESQUEMA DE TESTE DE TAMBORAMENTO (B)	39
FIGURA 22 - ENSAIO DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO EM CÂMARA ÚMIDA	40
FIGURA 23 - BOMBA CALORIMÉTRICA	40
FIGURA 24 - BRIQUETE DE FINO DE CARVÃO VEGETAL E REGIÕES DEMARCADAS PARA O ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO DE AGLUTINANTE NO BRIQUETE	41
FIGURA 25 - DISPOSITIVO-TESTE PARA ÍNDICE DE COMBUSTÃO	42
FIGURA 26 – MÉDIAS DE PORCENTAGEM DE FINO DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NO ENSAIO DE GRANULOMETRIA	44
FIGURA 27 - ANÁLISE POR TERMOGRAVIMETRIA DA PARAFINA	47
FIGURA 28 - ANÁLISE POR TERMOGRAVIMETRIA DO FINO DE CARVÃO VEGETAL	48
FIGURA 29 - EXPANSÃO LONGITUDINAL DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 20 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA	51

FIGURA 30 - EXPANSÃO LONGITUDINAL DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 35 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA.....	52
FIGURA 31 - EXPANSÃO LONGITUDINAL DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 60 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA.....	52
FIGURA 32 - PANORAMA GERAL DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DIAMETRAL EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA NOS BRIQUETES DE GRANULOMETRIA DE 20, 35 E 60 MESH.	54
FIGURA 33 - ABSORÇÃO DE UMIDADE DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 20 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO	58
FIGURA 34 - ABSORÇÃO DE UMIDADE DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 35 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA.....	58
FIGURA 35 - ABSORÇÃO DE UMIDADE DOS BRIQUETES COM GRANULOMETRIA 60 MESH EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA.....	59
FIGURA 36 - GRÁFICO REPRESENTANDO A EVOLUÇÃO DO PODER CALORÍFICO EM FUNÇÃO DO TEOR DE PARAFINA	61
FIGURA 37 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 20 MESH.....	64
FIGURA 38 - CONSUMO DE MASSA DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE FRAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 20 MESH.	65
FIGURA 39 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 35 MESH.	66
FIGURA 40 - CONSUMO DE MASSA DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE DA FRAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 35 MESH.	67
FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 60 MESH.....	68
FIGURA 42 - CONSUMO DE MASSA DURANTE O TESTE DE COMBUSTÃO PARA BRIQUETES DE DA FRAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDO NA PENEIRA DE 60 MESH.	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE PARAFINA.....	28
TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES DO AGLUTINANTE PARAFINA.....	30
TABELA 3 - VALORES MÉDIOS DA PORCENTAGEM DE FINO DE CARVÃO RETIDO NAS PENEIRAS	43
TABELA 4 - VALORES MÉDIOS DA ANÁLISE IMEDIATA E DO PODER CALORÍFICO DO FINO DE CARVÃO VEGETAL E PARAFINA	44
TABELA 5 - DENSIDADE A GRANEL DO FINO DE CARVÃO VEGETAL EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	46
TABELA 6 - VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE APARENTE DOS BRIQUETES EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA	49
TABELA 7 - REDUÇÃO DE VOLUME DOS BRIQUETES (EM PORCENTAGEM) EM FUNÇÃO DO TEOR DE PARAFINA E GRANULOMETRIA.....	50
TABELA 8 - VALORES MÉDIOS EM PERCENTUAL DA EXPANSÃO LONGITUDINAL DOS BRIQUETES EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA E GRANULOMETRIA	50
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS BRIQUETES (MPa).....	53
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DO POTENCIAL DE FINOS GERADOS NO TESTE DE TAMBORAMENTO EM FUNÇÃO DO TIPO DE AGLUTINANTE E DA FRAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO VEGETAL RETIDA NAS PENEIRAS (MESH)	55
TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO DE FRIABILIDADE DE ACORDO COM A CETEC DESCRITA POR OLIVEIRA (1992)	56
TABELA 12 - VALORES MÉDIOS EM PERCENTUAL DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DOS BRIQUETES EM FUNÇÃO DO TEOR DE PARAFINA E DAS FRAÇÕES DE FINOS.....	57
TABELA 13 - VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO DO FINO DE CARVÃO EM RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE PARAFINA NO BRIQUETE	59
TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DA PORCENTAGEM DE PARAFINA EM RELAÇÃO A MASSA DE CADA REGIÃO PARA BRIQUETES COM FRAÇÕES DE 20 MESH	62
TABELA 15 - DISTRIBUIÇÃO DA PORCENTAGEM DE PARAFINA EM RELAÇÃO A MASSA DE CADA REGIÃO PARA BRIQUETES COM FRAÇÕES DE 35 MESH	62
TABELA 16 - DISTRIBUIÇÃO DA PORCENTAGEM DE PARAFINA EM RELAÇÃO A MASSA DE CADA REGIÃO PARA BRIQUETES COM FRAÇÕES DE 60 MESH	63
TABELA 17 - TEMPERATURAS MÁXIMAS E FINAIS ALCANÇADAS NO TESTE E PORCENTAGEM DE MASSA CONSUMIDA ATÉ A TEMPERATURA MÁXIMA (T. MÁX) E NA TEMPERATURA FINAL (T. FIN.)	64
TABELA 18 - TEMPERATURAS MÁXIMAS E FINAIS ALCANÇADAS NO TESTE E PORCENTAGEM DE MASSA CONSUMIDA ATÉ A TEMPERATURA MÁXIMA (T. MÁX) E NA TEMPERATURA FINAL (T. FIN.)	65
TABELA 19 - TEMPERATURAS MÁXIMAS E FINAIS ALCANÇADAS NO TESTE E PORCENTAGEM DE MASSA CONSUMIDA ATÉ A TEMPERATURA MÁXIMA (T. MÁX) E NA TEMPERATURA FINAL (T. FIN.)	67
TABELA 20 - VALORES MÉDIOS PARA O ÍNDICE DE COMBUSTÃO DOS BRIQUETES EM FUNÇÃO DO TIPO DE AGLUTINANTE E DA FRAÇÃO DOS FINOS.....	69
TABELA 21 - ESTIMATIVA DE CUSTO DA PARAFINA (EM REAIS), PARA BRIQUETES DE FINO DE CARVÃO VEGETAL AGLUTINADOS COM PARAFINA POR TONELADA COMERCIALIZADA.	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	14
2.2. CARVÃO VEGETAL	17
2.3. BRIQUETAGEM.....	20
2.4. PREPARAÇÃO DOS BRIQUETES	21
2.5. QUALIDADE DOS BRIQUETES	24
2.5.1. AGLUTINANTES	25
3. MATERIAIS	29
3.1. FINO DE CARVÃO VEGETAL.....	29
3.2. PARAFINA	29
4. MÉTODOS	31
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DA PARAFINA	31
4.1.1. <i>Ensaio de granulometria</i>	31
4.1.2. <i>Análise imediata (Teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas)</i>	32
4.1.2.1. <i>Teor de umidade</i>	32
4.1.2.2. <i>Teor de materiais voláteis</i>	32
4.1.2.3. <i>Teor de cinzas</i>	33
4.1.2.4. <i>Teor de carbono fixo</i>	33
4.1.3. <i>Poder calorífico superior (PCS)</i>	33
4.1.4. <i>Densidade a granel</i>	33
4.1.5. <i>Análise por termogravimetria</i>	34
4.2. PREPARAÇÃO DOS BRIQUETES	35
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES AGLUTINADOS COM PARAFINA.....	36
4.3.1. <i>Densidade aparente e Redução de volume</i>	36
4.3.2. <i>Expansão longitudinal</i>	37
4.3.3. <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	37
4.3.4. <i>Teste de tamboramento</i>	38
4.3.5. <i>Umidade de equilíbrio higroscópico</i>	39
4.3.6. <i>Poder calorífico superior</i>	40
4.3.7. <i>Distribuição do aglutinante no briquete</i>	40
4.3.8. <i>Índice de combustão</i>	41
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
5. RESULTADOS	43
5.1. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DA PARAFINA.....	43
5.1.1. <i>Ensaio de granulometria</i>	43
5.1.2. <i>Análise imediata e poder calorífico</i>	44
5.1.3. <i>Densidade a granel</i>	46
5.1.4. <i>Análise por termogravimetria</i>	47
5.2. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES AGLUTINADOS COM PARAFINA.....	48
5.2.1. <i>Densidade aparente e Redução de volume</i>	48
5.2.2. <i>Expansão longitudinal</i>	50
5.2.3. <i>Resistência à compressão diametral</i>	53
5.2.4. <i>Teste de tamboramento</i>	55
5.2.5. <i>Umidade de equilíbrio higroscópico</i>	56
5.2.6. <i>Poder calorífico superior</i>	59
5.2.7. <i>Distribuição do aglutinante parafina nos briquetes de fino de carvão</i>	61

5.2.8. <i>Índice de combustão</i>	63
6. ESTIMATIVA DE CUSTO	71
7. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a busca por novas alternativas para a geração de energia tem sido assunto frequente entre a comunidade científica e dentro deste contexto a biomassa se destaca em substituição a utilização de combustíveis de origem fóssil.

O carvão vegetal é uma fonte de energia renovável de expressiva importância em nosso país. Em média, cerca de um quarto da produção mundial de carvão vegetal advém do Brasil (PEREIRA, 2009) onde 80% é usado no setor siderúrgico na produção de ferro-gusa. De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE os altos fornos a carvão vegetal representam um potencial de 30% da produção de ferro-gusa no Brasil. De fato, a utilização do carvão vegetal como redutor é uma peculiaridade da indústria siderúrgica brasileira, evidenciando assim sua importância na produção de energia para o setor siderúrgico, responsável pelo consumo de em média 9% da energia gerada no país (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

Um problema associado à característica física do carvão vegetal é a sua friabilidade, ou seja, sua capacidade de se fragmentar em pequenos pedaços de acordo com o manuseio. Conforme Quirino (1991) *apud* Pereira (2009), durante as fases de produção, transporte e manuseio o carvão gera em torno de 25% de finos, dificultando ou até mesmo inviabilizando sua utilização. A predominância de práticas que visam à recuperação desses finos, também chamados resíduos de carvão vegetal, é essencial promovendo um redirecionamento do material para um determinado uso, evitando assim o seu descarte no meio ambiente.

Através da briquetagem, técnica onde a matéria prima, é compactada, é possível a “recuperação” desses finos, ou seja, a reutilização ou reuso dos finos na forma de combustível sólido, com características e propriedades físico-químicas conhecidas para serem aplicados, principalmente, na geração de energia térmica ou elétrica transformando-os em um produto com maior valor agregado (GOLDEMBERG, 2009).

Porém a “recuperação” dos finos de carvão vegetal é um desafio que se distingue daquele enfrentado pelos resíduos de biomassa não carbonizados. Grover e Mishra (1996) *apud* Chrisostomo (2011) sugerem a existência de vários mecanismos que permitem a ligação entre as partículas de biomassa não carbonizadas quando compactadas, como através da lignina usando temperatura ou por ligações de hidrogênio, no caso da biomassa compactada sem aquecimento.

O fino de carvão vegetal é composto basicamente por carbono, material não deformável sem qualquer mecanismo de ligação quando compactado, por isso, a maior dificuldade na produção de briquetes de fino de carvão vegetal é justamente a busca de um aglutinante que promova resistência mecânica ao briquete, característica essencial devido ao desgaste sofrido no transporte e armazenamento.

1.1.OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi a reutilização dos resíduos finos de carvão vegetal de Eucalipto, através da moldagem de briquetes com a incorporação de parafina, e avaliação de algumas propriedades, com destaque para análise química imediata (umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo), poder calorífico superior, e resistência mecânica à compressão diametral dos briquetes moldados.

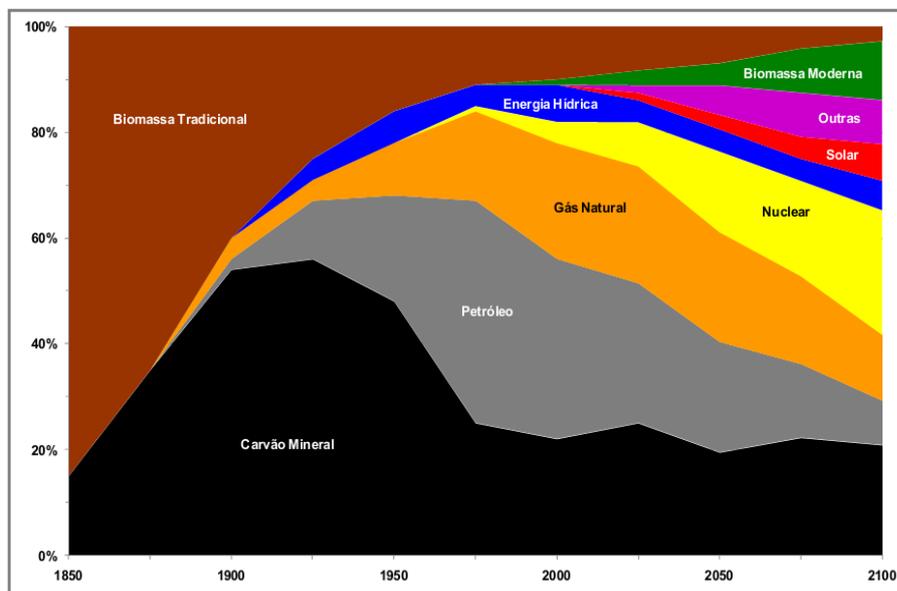
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

A biomassa é todo material orgânico, de origem não fóssil que possua energia disponível para queima, isso inclui todos os tipos de vegetais, ou seja, toda matéria orgânica de origem vegetal que pode ser utilizada na geração de energia (OMACHI, I. H. et al., 2004).

O uso da biomassa é conhecido desde as primeiras civilizações, na produção de fogo para alimentação e aquecimento, mas seu uso se tornou revolucionário com o advento da revolução industrial no século XVIII, onde novas tecnologias nos campos da indústria e transporte alteraram profundamente os sistemas produtivos e a vida da sociedade. As principais matérias primas utilizadas pela sociedade na geração de energia, até finais do século XIX e início do XX eram a biomassa tradicional, consumida de forma insustentável a partir de florestas nativas e o carvão mineral, material não renovável (NAKICENOVIC, 1998) (Figura 1).

FIGURA 1 - Fontes de energia utilizadas até o século XX e cenário para 2100



Fonte: NAKICENOVIC (1998).

Por volta de 1930, o cenário energético mundial mudou com o início da indústria petroquímica onde houve o desenvolvimento de novos produtos e novas tecnologias com maior eficiência para a geração de energia. Com a crise do petróleo, estabelecida entre 1970 e 1980 ficou evidente a dependência mundial deste produto fóssil. Foi dentro deste cenário que

a biomassa “moderna” foi novamente cogitada como alternativa, devido as suas características ambientais, ao preço e ao grande potencial de produção de energia (NAKICENOVIC, 1998).

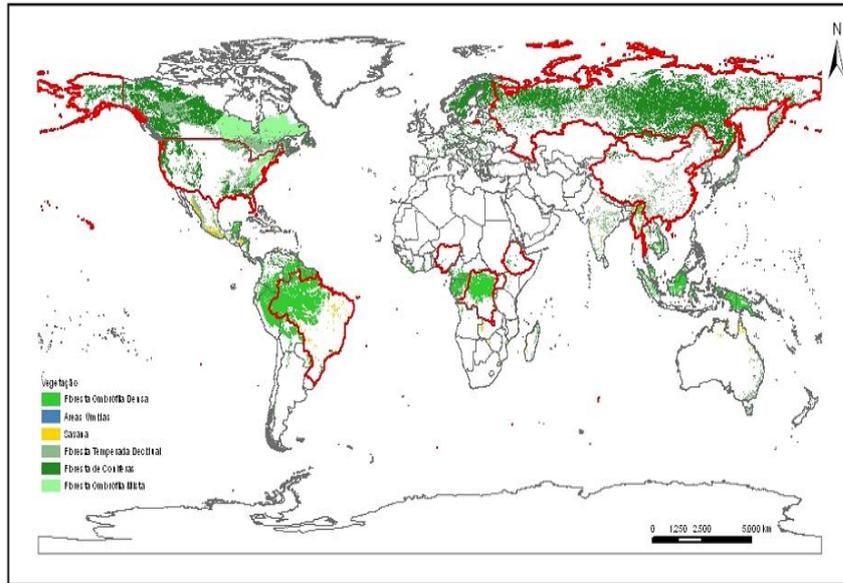
A biomassa “moderna”, material proveniente de madeira de reflorestamento, é uma fonte de energia renovável e sua importância tem crescido gradualmente devido a alguns fatores como: contribuição para a redução da pobreza em países em desenvolvimento, capacidade de produzir energia em todas as formas como: combustível, calor e eletricidade sem a necessidade de conversões de energia de alto custo e a ajuda na revitalização de áreas improdutivas aumentando a biodiversidade, a fertilidade do solo e a retenção de água (DERMIRBAS, 2009). Além disto, o uso da biomassa tem outro aspecto ambiental favorável já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera geralmente é compensada pela absorção no plantio da nova biomassa.

A contribuição de energia elétrica, no Brasil, proveniente do uso da biomassa está estimada em 8% e aproximadamente 55% dos 4 bilhões de m³ de madeira produzida é consumido diretamente como combustível sólido, seja na forma de madeira ou de carvão vegetal (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2012).

Tradicionalmente, enxofre e cinzas são considerados as principais impurezas dos combustíveis. A combustão do enxofre, presente nos combustíveis fósseis, gera o dióxido de enxofre (SO₂), que pode combinar-se com a água formando ácido sulfúrico diluído ou pode se transformar na atmosfera em outro composto potencialmente perigoso. O uso da madeira e carvão vegetal para produção de energia apresenta menores problemas de poluição quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que possuem um baixo teor de enxofre (CUNHA, et al, 1989).

A emissão de CO₂ emitida pela biomassa, geralmente é compensada pelo novo plantio da nova biomassa, sua distribuição geográfica é relativamente uniforme (figura 2) e tem grande potencial de produzir energias modernas que são convenientes para uso. Produz grande desenvolvimento do setor rural e seu atrativo custo a faz uma energia promissora em muitas regiões. Com diversas tecnologias disponíveis para converter biomassa em modernos sistemas de produção de energia, sua utilização tem crescido em muitos países.

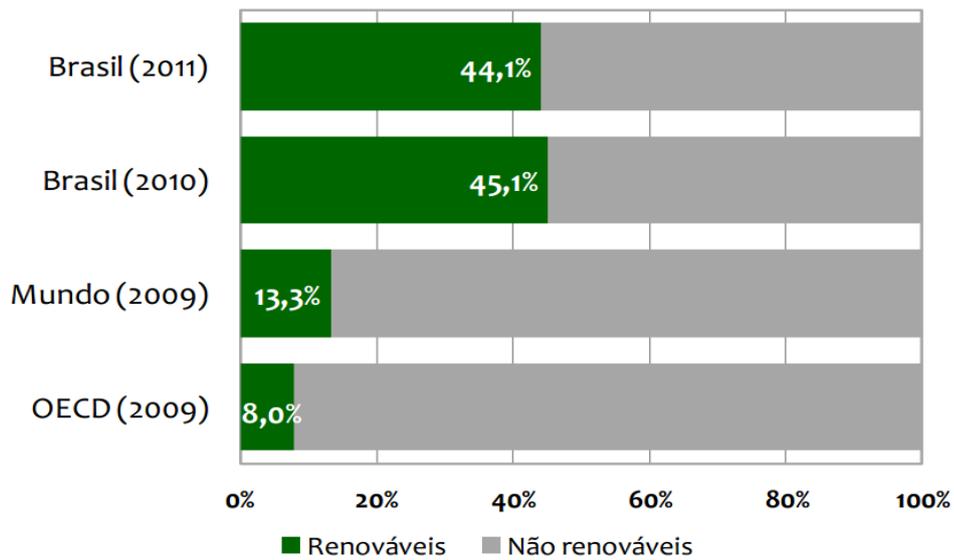
FIGURA 2 - Distribuição geográfica da biomassa



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2012

A utilização de fontes de energia renováveis tem sido alvo de estudos em diversos centros de pesquisa no Brasil e sua participação na matriz energética brasileira tem aumentado gradativamente chegando a 44,1% de participação no ano de 2011 (Figura3).

FIGURA 3 - Participação da energia renovável na matriz energética brasileira



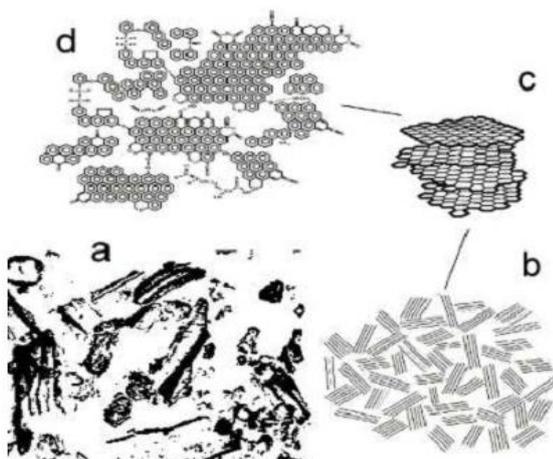
Fonte: AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2011.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2012) a energia proveniente do carvão vegetal e da lenha corresponde a 9,7% dos 44,1% da energia renovável na matriz energética brasileira.

2.2. CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal, também chamado carvão de biomassa, é produzido a partir da madeira pelo processo de carbonização ou pirólise. O carvão apresenta uma estrutura porosa, uma vez que a água e os compostos voláteis contidos na madeira foram eliminados, deixando espaços vazios. Cerca de 70 a 80% do volume do carvão vegetal é formado por poros. Logo, o carvão vegetal apresenta baixa densidade, variando de 200 a 400 Kg.m⁻³, dependendo do tempo de carbonização aplicado à madeira. Quimicamente o carvão é formado por uma estrutura policíclica aromática com alto grau de condensação, conforme pode ser observado na Figura 4 (BENITES, et al., 2010).

FIGURA 4 - Desenho esquemático mostrando: (a) microfotografia eletrônica de fragmentos de carvão; (b) estrutura lamelar do carvão; (c) aspecto das lamelas de carvão e (d) estrutura aromática policíclica condensada de carvão vegetal.



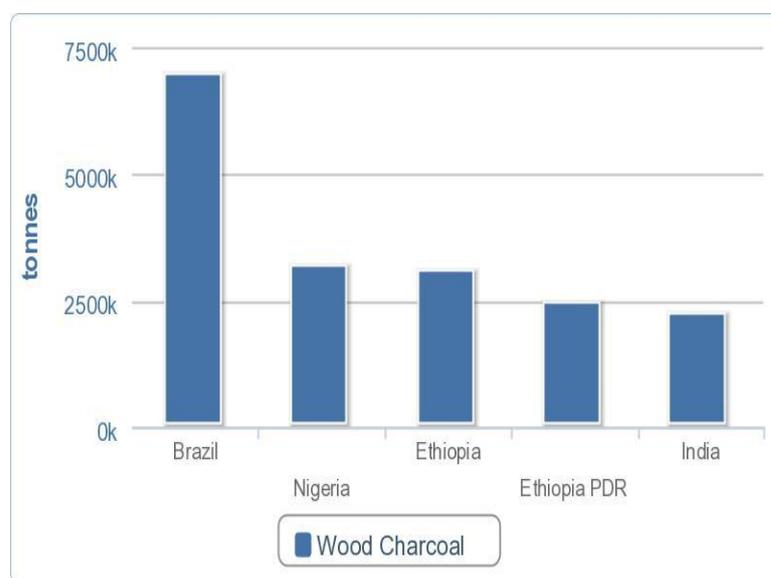
Fonte: BENITES, V. M et al, 2010.

Ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, no Brasil, o uso industrial do carvão vegetal continua sendo largamente praticado. O Brasil é o maior produtor mundial

desse insumo energético, com aproximadamente ¼ da produção mundial, seguido por países como Etiópia, Nigéria e Índia (Figura 5).

No setor industrial (quase 80% do consumo), o ferro-gusa, aço e ferro-ligas são os principais consumidores do carvão de lenha, que funciona como redutor e energético ao mesmo tempo. O setor residencial consome cerca de 9% seguido pelo setor comercial com 1,5%, representado por pizarias, padarias e churrascarias (PEREIRA, 2009).

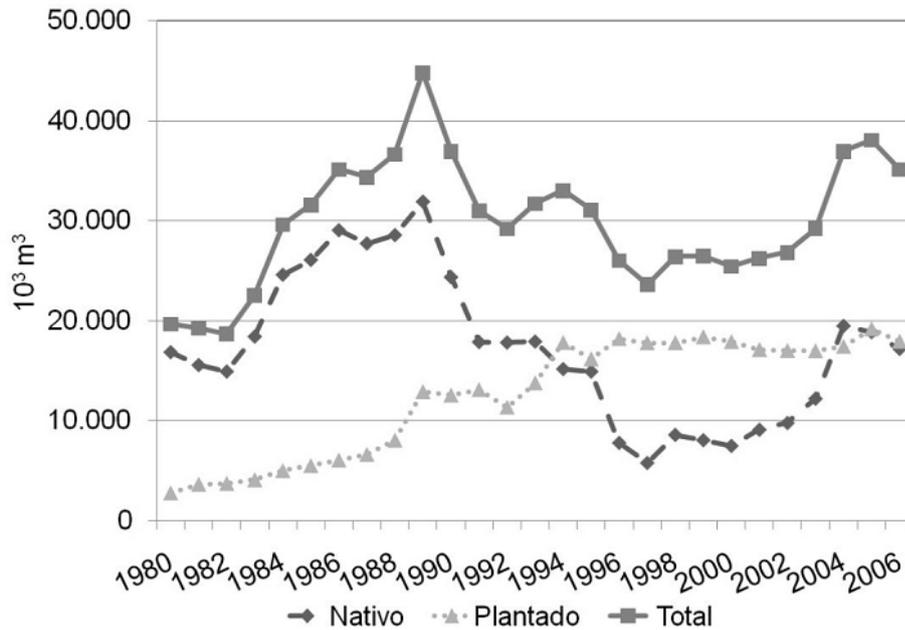
FIGURA 5 - Países líderes em produção de carvão



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2012

A produção de carvão vegetal ocorre pela carbonização da madeira em fornos de alvenaria, em processos dispersos, pouco mecanizados e altamente dependentes de trabalho humano. A produção de carvão vegetal no Brasil provém, em considerável porcentagem, ainda, da exploração de florestas nativas, apesar do aumento da utilização e importância do carvão de origem plantada (Figura 6).

FIGURA 6 – Evolução da produção de carvão vegetal em milhares de metros cúbicos



Fonte: ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA, 2007

O carvão adquirido pelas siderúrgicas, responsável pelo maior consumo do insumo, para o abastecimento de seus altos-fornos pode ter três origens: madeira nativa, extraída do desmatamento da floresta nativa pelos projetos de manejo autorizados pelo IBAMA; resíduos de serrarias (de 20% a 40%) onde é utilizado para a produção de carvão, em geral, a produção do carvão ocorre no próprio local onde existe a serraria e a partir do reflorestamento, madeira extraída dos projetos de reflorestamento de Eucalipto.

Após a extração, a madeira é levada para as carvoarias onde é carbonizada e transformada em carvão. Cada forno de uma carvoaria para ser preenchido, necessita de cerca de 16 m³ de madeira e gera 8 m³ de carvão. Em geral o preenchimento é feito manualmente. Depois da queima, o carvão é colocado diretamente no caminhão de tamanho padrão, chamado gaiola, e transportado para as siderurgias. Cada caminhão tem a capacidade de carregar 55 m³ de carvão (INSTITUTO OBSERVATÓRIO SOCIAL, 2006).

Um dos problemas associados à utilização do carvão vegetal se deve a uma propriedade física a ele associado, a friabilidade, ou seja, sua capacidade de se fragmentar em pequenas partículas. Desta forma, o carvão vegetal, durante as fases de produção, transporte, manuseio e peneiramento nas indústrias siderúrgicas, gera em torno de 25 por cento de finos

(QUIRINO, 1991), ou seja, resíduos que muitas vezes são responsáveis por grande impacto ambiental, quando descartados na natureza, além disso, são indesejáveis para a utilização em alguns setores, como por exemplo, em altos-fornos, onde são desejáveis carvão com alta resistência e formato geométrico específico (FONTES et al., 1989).

Dentro deste contexto, fica clara a necessidade da recuperação e reutilização desses finos, que possuem grande potencial energético, possível através de uma técnica chamada briquetagem. De acordo com a Associação Mineira de Silvicultura (2012) em 2011 o consumo de carvão vegetal no país foi de aproximadamente 36,7 milhões de mdc (unidade de medida para o carvão vegetal que equivale à quantidade de carvão em um metro cúbico), aproximadamente 9,17 milhões de toneladas evidenciando assim o potencial de geração de finos de carvão vegetal no Brasil.

A briquetagem de finos de carvão vegetal surge como uma forma de agregar valor a esse resíduo e oferecer ao mercado um produto de fácil trabalhabilidade, com a vantagem adicional de reduzir o impacto da exploração irracional das florestas.

2.3. BRIQUETAGEM

A briquetagem é uma técnica que consiste na compactação de pequenas partículas de material sólido com o objetivo de formar blocos compactos de forma definida e de alta densidade (DIEZ, 2012). Por meio deste processo, resíduos de beneficiamento agroindustrial convertem-se em um material de maior valor comercial podendo ser utilizados como combustíveis sólidos para a geração de energia.

A primeira patente relacionada à briquetagem foi concedida a Willian Easby, em 1848 (LYNC, 2005). O processo desenvolvido por Easby possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e formas variados. Por esse processo, materiais de pequeno ou nenhum valor agregado podiam ser transformados em um produto com elevado valor. Os materiais agora poderiam ser utilizados como combustível para máquinas a vapor, em forjas, na culinária e em outras aplicações.

No Brasil, uma das primeiras iniciativas de utilização industrial do processo de briquetagem ocorreu no início da década de 60 na CSBM – Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, na usina de João Monlevade, MG, com a instalação de um equipamento da empresa alemã Humboldt, para briquetagem de finos de carvão vegetal (PEREIRA, 2009).

A recente preocupação ambiental, resultando em leis cada vez mais rígidas, fez com que a briquetagem ganhasse um novo impulso de aplicação na indústria. Hoje ela se constitui em uma alternativa para a reutilização de rejeitos industriais (finos de carvão vegetal, turfa, plásticos, lixo biológico, limalhas metálicas e outros) seja como fonte de energia, ou seja, como matéria-prima agregando valor a esses resíduos.

Bathacharya et al. (1989) classificaram os processos de compactação de biomassa em duas categorias principais: compactação *quente em alta pressão* (CQ) e a *compactação fria a baixa pressão* (CF). O segundo tipo (CF) é o mais importante em relação à variedade de materiais que pode processar e as características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere implicitamente a este tipo de técnica. A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte.

A briquetagem é uma forma bastante eficiente para concentrar energia da biomassa convertendo resíduos em combustíveis sólidos de alta densidade energética (BEZZON, 1997).

2.4. PREPARAÇÃO DOS BRIQUETES

A preparação de briquetes pode ser realizada de diversas formas e de acordo com Chen (2009), os equipamentos empregados podem ser classificados em quatro grupos: prensa extrusora de pistão mecânico, prensa extrusora de rosca sem fim, prensa hidráulica e prensa peletizadora.

- Prensa extrusora de pistão mecânico (Figura 7) – tecnologia conhecida desde o início do século na qual um pistão ligado a um volante força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone.

FIGURA 7 - Prensa extrusora de pistão mecânico



Fonte: LIPPEL, 2012

- Prensa extrusora de rosca sem fim (Figura 8) – tecnologia muito utilizada no exterior na qual uma rosca sem fim produz briquetes com furo central em processo contínuo.

FIGURA 8 - Prensa extrusora de rosca sem fim



Fonte: LIPPEL, 2012

- Prensa hidráulica (Figura 9) – equipamento que usa um pistão acionado hidraulicamente que compacta o material sob uma força pré-determinada. Não possui característica extrusiva e a pressão aplicada é geralmente menor que em outros processos.

FIGURA 9 - Prensa hidráulica



Fonte: LIPPEL, 2012

- Prensa peletizadora (Figura 10) – processo extrusivo utilizado para a fabricação de pellets onde vapor é injetado para aquecer e corrigir a umidade.

FIGURA 10 - Prensa peletizadora



Fonte: LIPPEL, 2012

Um aspecto importante na escolha do equipamento correto, na produção de briquetes, está relacionado com a exigência de umidade do resíduo. Cada equipamento trabalha com uma margem de umidade máxima. As extrusoras de rosca e pistão mecânico trabalham com material a 10 – 12% de umidade. As de pistão hidráulico aceitam material com 18 – 20% de umidade e as peletizadoras trabalham com um conteúdo de umidade de no máximo 20%.

A produção dos briquetes é realizada através da técnica de briquetagem e sua metodologia empregada depende das propriedades e do estado do material a ser compactado. No Brasil, ainda não há uma metodologia ou normas específicas para a fabricação e comercialização de briquetes (VENDRASCO, 2009). De acordo com Carvalho (2004) as etapas do processo de produção de briquetes podem ser divididas em quatro fases:

- Preparação - Consiste na determinação das características de compactação do material a ser briquetado e do tipo de equipamento que deve ser utilizado. Em seguida o teor de umidade e o tipo de aglutinante (quando necessário) devem ser especificados. O ajuste da quantidade de água na mistura torna-se ainda mais importante quando são utilizados aglutinantes solúveis em água.
- Mistura - A mistura dos reagentes é uma das etapas mais importantes da briquetagem. É de fundamental importância que o aglutinante, quando utilizado, seja distribuído uniformemente por toda superfície do material a ser briquetado.

- Compactação - Consiste na aplicação de uma força de compressão com a finalidade de promover formato geométrico definido e resistência ao briquete.
- Secagem - Os briquetes podem ser aquecidos e, em seguida resfriados lentamente evitando assim a formação de fraturas proveniente de choques térmicos, permitindo assim o manuseio.

Para que o processo de briquetagem seja eficiente, torna-se fundamental o conhecimento das características do material para que no final do processo obtenha-se um produto de qualidade.

2.5. QUALIDADE DOS BRIQUETES

A qualidade dos briquetes está diretamente relacionada com as propriedades do resíduo e do aglutinante utilizado. O teor de cinzas, a umidade e principalmente a heterogeneidade no tamanho das partículas são fatores que comprometem a qualidade dos briquetes (COSTA, D. R. et al., 2010). Quanto maior a umidade menor será o desempenho na carbonização, pois uma parte da energia contida no resíduo é utilizada para aquecer e vaporizar essa umidade (FERRAGUTTI, et al., 2012).

As cinzas agregam todos os elementos que não são relevantes nas reações de combustão, como o potássio, fósforo, cálcio, entre outros, reduzindo o aproveitamento energético do briquete de biomassa. O conteúdo de cinzas recém-gerado pode ser dividido em: natural ou proveniente de contaminação. O teor de cinzas varia muito em função da espécie da madeira e de que parte a amostra foi retirada (cinza natural) ou, durante a colheita de resíduos, onde o material pode ser poluído através da adição de misturas de pedras e areia (cinzas provenientes de contaminação).

A granulometria dos resíduos também influencia na qualidade do briquete, ou seja, quanto menor a partícula melhor o processo de carbonização e maior resistência mecânica. Um dos estudos expressivos relacionado foi realizado por Melo (2000) que avaliou a qualidade dos briquetes produzidos com cinco granulometrias de finos de carvão vegetal, quatro proporções de alcatrão de madeira anidra e três pressões de compactação e concluiu que os briquetes confeccionados com as menores partículas de carvão apresentaram os melhores resultados

para composição química e características físicas e mecânicas. Observou também que a densidade aparente, a porosidade e a resistência mecânica dos briquetes foram influenciadas principalmente pela pressão de compactação, seguida da proporção de aglutinante.

De acordo com Oliveira (2010), questões relacionadas às propriedades e características dos briquetes devem ser estudadas, permitindo melhor orientação para o mercado, tanto para consumidores quanto para produtores. Assim cada briquete constitui-se em um energético sólido de características próprias.

A produção de briquetes de boa qualidade depende não só da quantidade de aglutinante ou ligante como também da qualidade do aglutinante a ser aplicado, Pereira (2009) estudando a viabilidade de aglutinantes como dextrina, silicato de sódio, farinha de babaçu, alcatrão de madeira e amido pré-gelatinizado constatou a inviabilidade do aglutinante silicato de sódio para uso siderúrgico, uma vez que o mesmo proporcionava uma elevada concentração de cinzas após a combustão. Entretanto, os principais fatores que determinam a quantidade de aglutinante a ser utilizado são: a superfície específica do material e a quantidade de partículas finas ou grossas.

Cruz (2008) em seu estudo de briquetes de fino de carvão, provenientes de *Eucalyptus* sp e *Schizolobium amazonicum* (Paricá), e aglutinantes à base de silicato de sódio e amido de milho, para geração de energia constatou que a adição de carvão de paricá aos briquetes diminui seu poder calorífico, assim como o aumento no percentual do aglutinante de silicato de sódio adicionado. O silicato de sódio aumenta o teor de cinzas dos briquetes, limitando seu uso no setor siderúrgico.

2.5.1. Aglutinantes

A utilização de aglutinantes no processo de fabricação de briquetes se justifica quando o material a ser compactado não possui características intrínsecas de aglutinação, ou seja, o briquete não forma após compactação ou suas características físicas ficam comprometidas.

De acordo com Quirino (1989), na produção de briquetes, principalmente de carvão vegetal, usa-se normalmente um aglutinante (cola) para facilitar e manter o empacotamento. Em princípio qualquer adesivo pode ser utilizado como aglutinante, sendo a escolha feita em função do custo e qualidade final desejada. O estudo do melhor material ligante é de fundamental importância no processo de briquetagem. O aglutinante utilizado não deve

prejudicar as características energéticas do briquete, diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas ou mesmo, ser utilizado em proporções em que seu gasto inviabilize economicamente o briquete (QUIRINO, 1989).

De acordo com Pietsch (1976), citado por Pereira (2009), os aglutinantes podem ser classificados em três tipos:

- Aglutinante tipo matriz – Esse tipo de aglutinante envolve as partículas do material formando uma matriz contínua. Normalmente exige-se uma quantidade razoável do ligante, pois é pouco resistente e depende de uma fase contínua que envolve todo o material. Exemplos de aglutinantes de matriz são: Alcatrão vegetal e mineral, asfalto ou piche de petróleo.
- Aglutinante tipo filme – Esse tipo de aglutinante é usualmente utilizado como solução ou dispersão, como o álcool, a acetona, o tetracloreto de carbono, entre outros, porém a água se destaca como solvente mais utilizado. Uma característica encontrada na aplicação deste aglutinante é a fragilidade do briquete quando úmido e resistente quando seco. Alguns aglutinantes possuem estas características como o silicato de sódio, amido, melão, os lignosulfatos e outros.
- Aglutinante químico – Os aglutinantes químicos são aqueles que dependem de reações químicas efetivas dos componentes do aglomerado entre si ou entre o aglomerante e o material que está aglomerado. Podem ser do tipo matriz ou filme, dependendo principalmente, da resistência e das características dos produtos da reação, são eles: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{melaço}$; $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2\text{MgO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$; silicato de sódio + CO_2 ; e outros.

Pereira (2009) estudou os efeitos da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de fino de carvão vegetal e constatou a viabilidade na utilização de aglutinantes como a Dextrina, Amido pré-gelatinizado, farinha de babaçu e Alcatrão vegetal. Cada aglutinante possui propriedades específicas tanto na combustão como no potencial de aglutinação e influenciam diretamente no comportamento do briquete como combustível sólido.

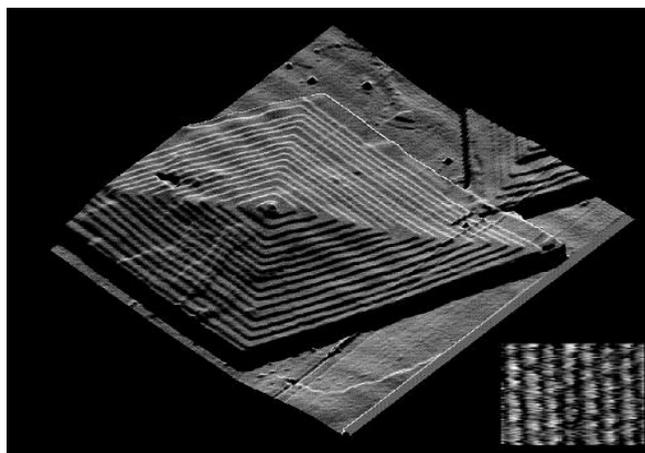
A parafina, hidrocarboneto de alta massa molar, é um material de origem fóssil proveniente do fracionamento do petróleo e que, à princípio, pode ser usado como aglutinante

nos briquetes de fino de carvão vegetal. Embora este aglutinante não seja de fonte renovável, suas propriedades físico-químicas e custo faz com que seu uso seja considerado uma alternativa na recuperação dos finos tendo em vista suas características físico-químicas.

A parafina foi descoberta por Carl Reichenbach e é conhecida por sua alta pureza, excelente brilho e odor reduzido. Possui propriedades termoplásticas e de repelência a água e é usada amplamente para a proteção de diversas aplicações como embalagens de papelão para a indústria alimentícia e revestimento de queijos e frutas. Seu ponto de fusão está situado entre 58°C e 62°C e não reage com a maioria dos reagentes químicos mais comuns. (MILNE, 2005)

A parafina presente no petróleo cru consiste, principalmente, de hidrocarbonetos, na faixa de C_{18} a C_{36} , também conhecidos como ceras e hidrocarbonetos naftênicos, compreendendo a faixa de C_{30} a C_{60} . Os hidrocarbonetos constituintes da parafina podem existir em vários estados da matéria, ou seja, sólido, líquido ou gás, dependendo das condições de temperatura e pressão a que são submetidos. Quando a parafina é resfriada, esta se transforma em sólido formando cristais em diferentes estruturas (Figura 11).

FIGURA 11 - Microscopia atômica apresentando o crescimento em espiral de um cristal de parafina



BARBOSA (2003)

Os hidrocarbonetos de alta massa molar possuem ponto de fulgor conhecido entre 202°C e 290°C e podem ser usados como combustível possuindo a vantagem de ser um produto não tóxico. As parafinas são classificadas de acordo com seu ponto de fusão (Tabela 1).

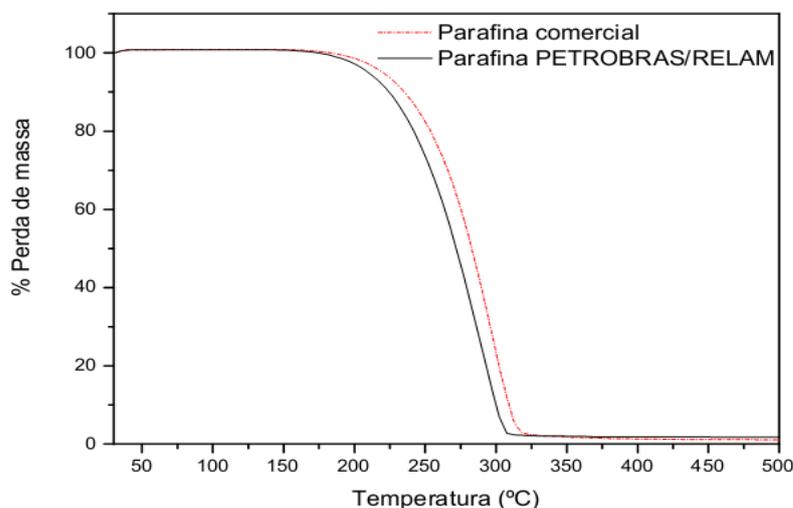
TABELA 1 - Caracterização dos diferentes tipos de parafina

Características	Parafina 120°/125°F	Parafina 130°/135°F	Parafina 140°/145°F	Parafina 150°/155°F	Parafina 170°/190°F
Ponto de Fusão (°C)	50,3	55,8	61,4	66,9	82,4
Densidade (g/cm ³)	0,78	0,81	0,81	0,91	0,84
Viscosidade (cSt)	3,49	4,39	6,01	5,53	N/D
Teor de óleo máx.(%p)	3,0	0,5	1 e 2	1,70	1,0
Penetração a 25°C(mm)	-	14	12	21	15
Ponto de fulgor (°C)	202	232	244	276	290

Fonte: PETROBRAS, 2012

Uma das características mais importantes do uso da parafina como aglutinante e combustível é sua perda de massa na combustão (Figura 12). Barbosa (2003), através da análise por Termogravimetria avaliou dois tipos de parafina, a comercial e o da PETROBRÁS/RELAM, parafina misturada com querosene.

FIGURA 12 - Resultado de termogravimetria para a parafina comercial e a parafina PETROBRÁS/RELAM



BARBOSA (2003)

A acentuada perda de massa durante a carbonização é um fator positivo no desempenho do briquete de fino de carvão vegetal, tendo em vista o potencial de volatilização da parafina sendo ela utilizada por dois motivos: pela resistência mecânica proporcionada e pela contribuição energética ao briquete.

3. MATERIAIS

3.1. FINO DE CARVÃO VEGETAL

O carvão utilizado neste trabalho provém da carbonização da madeira de Eucalipto, encontrado no comércio, geralmente, utilizado em lareiras, churrasqueiras e fogões a lenha. O carvão foi inicialmente fragmentado em pequenos pedaços sobre uma lona, com auxílio de uma barra de ferro e depois de homogeneizado foram triturados em um triturador de resíduos orgânicos marca Trapp modelo TR200, em seguida foram triturados novamente em um liquidificador de laboratório marca Siemsen modelo LS10 para reduzir ainda mais o tamanho das partículas visando à homogeneidade das mesmas gerando o fino de carvão (Figura 13).

FIGURA 13 - Fino de carvão vegetal



3.2. PARAFINA

O aglutinante utilizado foi a parafina, fornecida pela empresa GE QUÍMICA LTDA. O aglutinante (Figura 14) se encontrava na forma sólida a granel com especificações apresentadas na Tabela 2.

FIGURA 14 - Parafina a granel



TABELA 2 - Especificações do aglutinante parafina

Aglutinante	Ponto de fusão (ASTM D-87)	Teor de óleo (ASTM D-721)	Ponto de fulgor (ASTM D-92)	Densidade (ASTM D-1298)
Parafina	62,8 °C	2%	200 °C	0,9g/cm ³

Fonte: Rótulo do produto (GE QUÍMICA LTDA)

4. MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DA PARAFINA

O fino de carvão vegetal e a parafina foram caracterizados com a finalidade de se conhecer suas características físico-químicas, nos ensaios apresentados abaixo.

4.1.1. Ensaio de granulometria

A classificação das partículas de fino de carvão vegetal é feita através de peneiras com malhas de aberturas diferentes acopladas a um dispositivo vibratório. Foram utilizadas as peneiras de 10, 20, 35, 60 e 100 mesh e 100 gramas do material, o tempo de ensaio foi de 3 minutos.

Os finos de carvão vegetal foram primeiramente secos a $115 \pm 2^\circ\text{C}$ em estufa e em seguida foi feita a determinação da granulometria. As peneiras (Figura 15) foram acopladas a um agitador modelo MA 750, com sistema de agitação mecânica orbital de 250 RPM. O ensaio foi feito baseando-se na metodologia prescrita na norma NBR 7217. A porcentagem de resíduo retido nas peneiras é expressa por:

$$\%M = Mr/(Mt) \times 100$$

Sendo: $\%M$ é a porcentagem de resíduo retido em cada peneira; Mr a massa retida em cada peneira e Mt a massa total da amostra.

FIGURA 15 - Conjunto de peneiras e orbital com batidas no topo



4.1.2. Análise imediata (Teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas)

O ensaio de análise imediata foi realizado seguindo as orientações prescritas na norma NBR 8112 e refere-se aos ensaios de teor de umidade, teor de voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas.

4.1.2.1. Teor de umidade

As amostras dos finos de carvão vegetal foram primeiramente pesadas em balança analítica, em seguida foram secas em estufa com circulação de ar marca Marconi modelo ma035 (115 +/- 2°C) por 90 minutos com o posterior resfriamento em dessecador com sílica gel. Foram utilizadas amostras de 100 g do fino na análise. As amostras secas e resfriadas foram novamente pesadas em balança analítica. A diferença de peso após secagem permitiu a determinação do teor de umidade dos resíduos. O teor de umidade calculado é expresso por:

$$TU = \frac{M - M_f}{M_f} \times 100$$

Sendo: TU é o teor de umidade em %; M a massa inicial da amostra úmida e M_f a massa final da amostra seca, ambas em gramas.

4.1.2.2. Teor de materiais voláteis

Para determinar o teor de voláteis foi utilizado 1,0000g de cada material isento de umidade. Cada amostra foi adicionada em um cadinho de porcelana com tampa e posicionada na porta do forno mufla previamente aquecida a (900 +/- 10) °C, permanecendo nesta posição por 3 minutos. Em seguida o cadinho foi posicionado dentro do forno mufla com a porta fechada e permaneceu nesta posição por 7 minutos. Após esse processo o material foi resfriado em um dessecador com sílica gel até massa constante. O teor de material volátil pode ser expresso através da equação:

$$MV = \frac{M_i - M_f}{M}$$

Sendo: MV o teor de material volátil, em %; Mi é a massa inicial do cadinho mais a amostra; Mf é a massa final do cadinho mais a amostra e M é a massa da amostra seca.

4.1.2.3. Teor de cinzas

Foi determinado usando uma quantidade de 1,0000 g por amostra isenta de umidade. A amostra foi adicionada a um cadinho, previamente seco e tarado e levado a mufla (700 +/- 10) °C por um período de 3 horas. Após esse processo o material foi seco em dessecador com sílica gel até massa constante. O teor de cinzas pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$CZ = \frac{M1 - Mo}{m} \times 100$$

Sendo: CZ é o teor de cinzas, em %; Mo é a massa do cadinho; $M1$ é a massa do cadinho mais o resíduo após combustão e m a massa da amostra seca, ambos em gramas.

4.1.2.4. Teor de carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo seguiu a metodologia prescrita na norma NBR 8112 subtraindo - se 100% a soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas, conforme a expressão:

$$CF = 100 - (CZ + MV)$$

Sendo: CF é o teor de carbono fixo; CZ teor de cinzas e MV teor de voláteis.

4.1.3. Poder calorífico superior (PCS)

A análise de poder calorífico superior dos materiais foi realizada obedecendo à norma NBR 8633 e realizada na Universidade Federal do ABC (UFABC) em bomba calorimétrica de modelo C2000, marca IKA.

4.1.4. Densidade a granel

A densidade a granel foi determinada baseando-se na norma ABNT NBR 6922, onde o material foi inserido em uma caixa com dimensões reduzidas e proporcionais a norma, devido

à disponibilidade de material em estudo. A caixa (Figura 16) foi confeccionada com dimensões 100x100x100 milímetros (mm) e foi preenchida corretamente como sugerido pela norma, posteriormente foi verificado e anotado a massa total em balança de precisão marca SHIMADZU modelo BL3200H.

FIGURA 16 - Caixa volumétrica e volume de preenchimento



A densidade a granel foi determinada através da equação:

$$\rho_g = \frac{ma}{vol} \times 10^6$$

Onde: ρ_g é a densidade a granel do fino de carvão em g.cm^{-3} , ma a massa em gramas do fino de carvão e vol o volume interno da caixa em cm^3 .

4.1.5. Análise por termogravimetria

A análise seguiu as recomendações contidas na ASTM D-7582, o N_2 foi o gás utilizado no ensaio, a temperatura inicial foi de 50°C e a temperatura final foi de 700°C a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C.min.}^{-1}$. Foi realizada em um analisador Perkin modelo Pyris (Figura 17) na Universidade de São Paulo (USP) no campus de São Carlos.

FIGURA 17 - Foto ilustrativa do analisador de TGA Pyris



4.2. PREPARAÇÃO DOS BRIQUETES

Para a preparação dos briquetes (Figura 18) foram utilizados finos de carvão vegetal, previamente secos, e retidos nas peneiras de 20, 35 e 60 Mesh e um aglutinante, a parafina, nas proporções de 15, 25 e 35% em relação à base seca dos finos. Análise previa indicou a inviabilidade da proporção de 10% de parafina uma vez que a quantidade de aglutinante não foi o suficiente para formar o briquete.

FIGURA 18 - Briquete de fino de carvão vegetal aglutinado com parafina



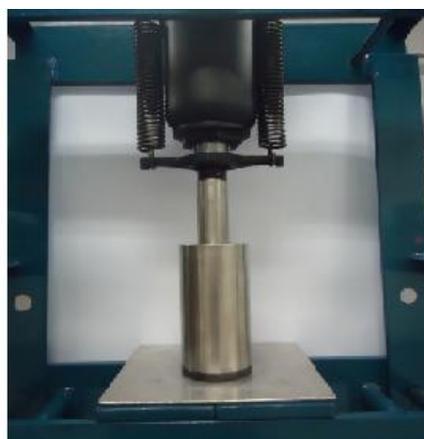
Foram pesadas 20g da mistura para cada amostra, onde sua homogeneização foi feita através do auxílio de um bastão de vidro, e colocada na estufa (70 +/- 2°C) por 10 minutos para que a parafina se fundisse no fino de carvão vegetal.

Após este processo, a mistura foi colocada em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm. A pressão de compactação utilizada nos finos foi de 1250 kgf.cm⁻². O tempo de aplicação da pressão máxima foi de 30 segundos. O processo de compactação dos finos foi feito sem aquecimento em um prensa hidráulica marca Marcon, modelo MPH15 com capacidade de 15 toneladas (Figura 19).

FIGURA 19 – Moldes (a) e Prensa hidráulica (b) utilizada na compactação dos resíduos



a)



b)

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES AGLUTINADOS COM PARAFINA

Os briquetes foram caracterizados a fim de se conhecer suas propriedades físico-químicas, essenciais para seu desempenho no transporte, armazenamento e utilização como combustível.

4.3.1. Densidade aparente e Redução de volume

As amostras foram pesadas em uma balança analítica e medidas com um paquímetro digital 72 horas após a compactação. A densidade aparente foi determinada através do quociente entre a massa e o volume de cada briquete. A redução de volume foi calculada comparando-se a densidade a granel dos resíduos e a densidade aparente dos briquetes.

4.3.2. Expansão longitudinal

A expansão longitudinal foi determinada medindo-se o comprimento no sentido da compactação (altura) dos briquetes com o auxílio de um paquímetro digital em intervalos de tempo determinados durante um período de 72 horas após compactação. Os briquetes de fino de carvão vegetal foram mantidos em dessecador com sílica gel, durante o ensaio, para que a umidade do ar não influenciasse no ensaio. A expansão longitudinal, EL, das amostras é calculada de acordo com a equação a seguir.

$$EL = \frac{L_f - L_o}{L_f} \times 100$$

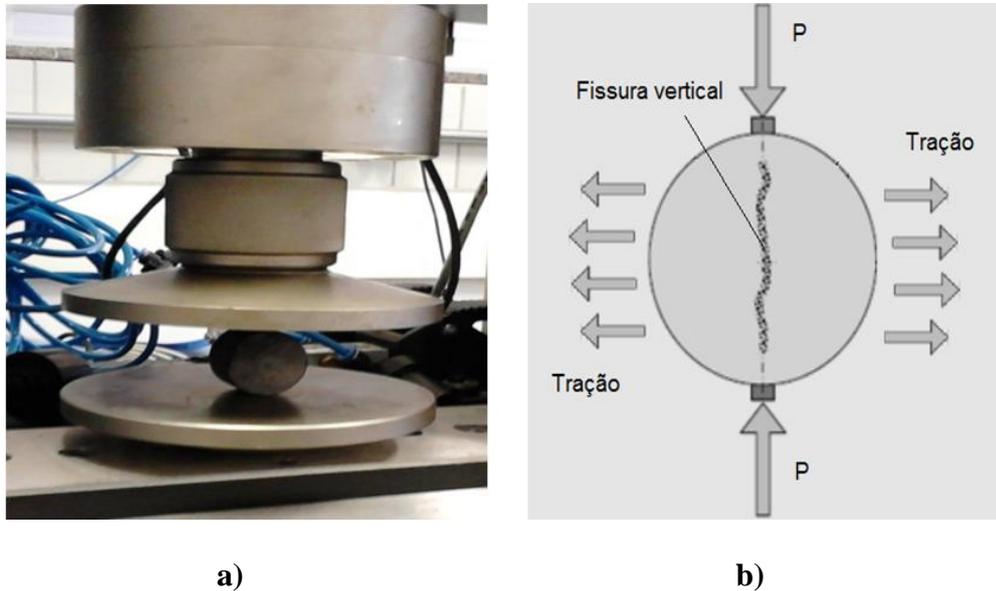
Onde: L_o é o comprimento longitudinal da amostra logo após a compactação, e L_f é o comprimento longitudinal da amostra após um determinado tempo após compactação

4.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é um ensaio que consiste em submeter corpos-de-prova cilíndricos a cargas de compressão, onde a tensão de compressão produz uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento (Figura 21b).

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios (EMIC), com capacidade máxima de 30.000 kgf (300kN), modelo DL 30.000, 72 horas após compactação dos finos. A carga foi aplicada no sentido transversal dos briquetes, perpendicular a pressão de compactação. A velocidade de aplicação da carga foi de 3 mm/min.

FIGURA 20 - Ensaio de resistência mecânica na EMIC (a) e esquema ilustrando as forças aplicadas ao briquete no ensaio (b)

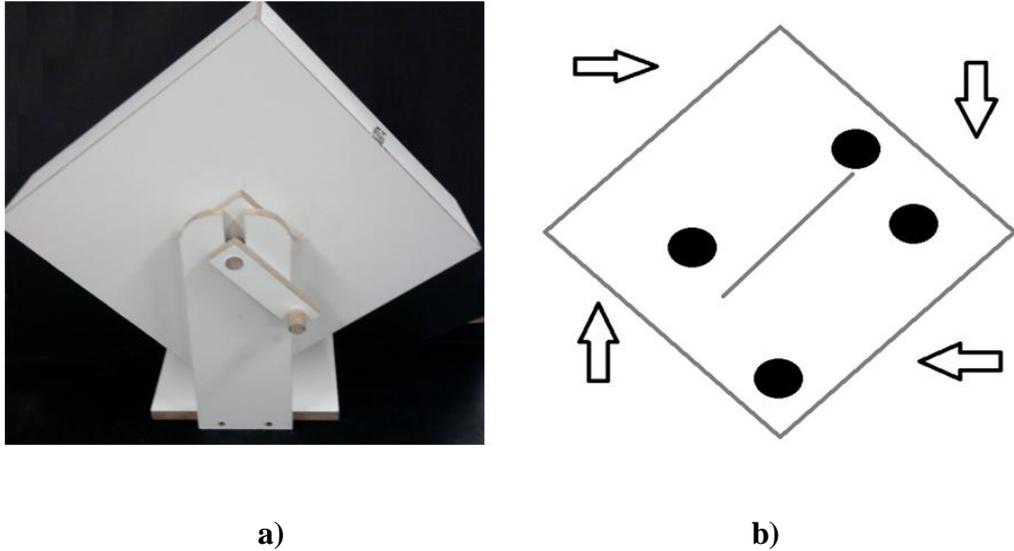


4.3.4. Teste de tamboramento

O teste foi realizado baseado na norma ABNT NBR 8740 de 1985. A classificação dos finos gerados pelo teste seguiu a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), citado por Oliveira et al. (1982) . Utilizou-se uma adaptação da norma, onde as dimensões internas do compartimento foram alteradas, e a rotação do equipamento (Figura 22) foi de aproximadamente 35 rotações por minuto (rpm) durante intervalo de tempo de 5 minutos.

Após este procedimento o material foi retirado e passado por peneiramento (peneira de 5 mesh) a fim de separar partículas maiores que 5 mesh para verificação da massa fragmentada pelo efeito de tamboramento no ensaio.

FIGURA 21 - Equipamento (a) e esquema de teste de tamboramento (b)



4.3.5. Umidade de equilíbrio higroscópico

O ensaio de umidade de equilíbrio higroscópico se baseou na norma NBR 5734 e foi realizado em uma câmara úmida com umidade saturada e temperatura constante marca EQUILAM série KEQUM. Os briquetes de fino de carvão vegetal foram condicionados em ambiente com umidade relativa $(90 \pm 5) \%$ e temperatura de $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Antes de iniciar o condicionamento, os briquetes foram pesados e então colocados na câmara climática. O ensaio foi realizado até que os briquetes atingissem o equilíbrio constante em suas massas.

A quantidade de água absorvida, A_a , pelos briquetes é expressa pela equação a seguir:

$$A_a = \frac{M_t - M_o}{M_o} \times 100$$

Onde: M_t é a massa em gramas do briquete após um determinado tempo de exposição do briquete a um ambiente de umidade relativa controlada, e M_o , a massa do briquete em gramas antes da exposição ao ambiente controlado.

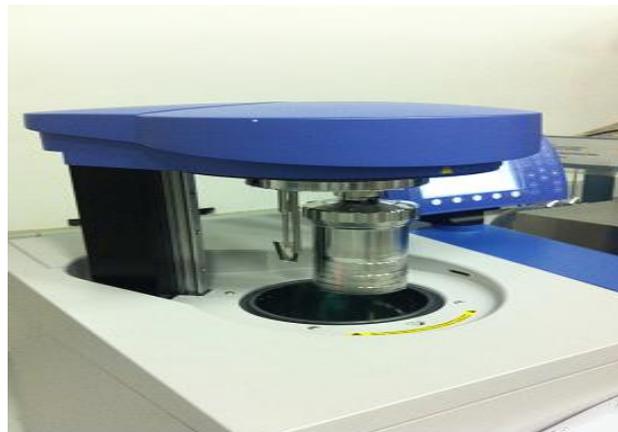
FIGURA 22 - Ensaio de equilíbrio higroscópico em câmara úmida



4.3.6. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes foi determinado após a compactação dos resíduos. A análise de poder calorífico superior dos briquetes foi realizada obedecendo à norma NBR 8633 e foi realizada na Universidade Federal do ABC em bomba calorimétrica IKA modelo C2000.

FIGURA 23 - Bomba calorimétrica



4.3.7. Distribuição do aglutinante no briquete

Quatro regiões foram demarcadas, são elas, A, B, C e D (Figura 25) com espessuras iguais. Os briquetes foram desgastados com a utilização de uma espátula de acordo com a região apresentada. A porção de cada região foi pesada e colocada em um cadinho. Em

seguida o cadinho foi colocado no forno mufla a temperatura de 350°C por 15 minutos, temperatura na qual a parafina volatiliza, esta temperatura foi escolhida em função do resultado apresentado no ensaio de termogravimetria. Com este procedimento é possível determinar a porcentagem de parafina em relação a massa de cada região tendo em vista que a temperatura na qual o carvão começa a volatilizar é significativamente superior a temperatura aplicada neste processo.

FIGURA 24 - Briquete de fino de carvão vegetal e regiões demarcadas para o ensaio de distribuição de aglutinante no briquete



4.3.8. Índice de combustão

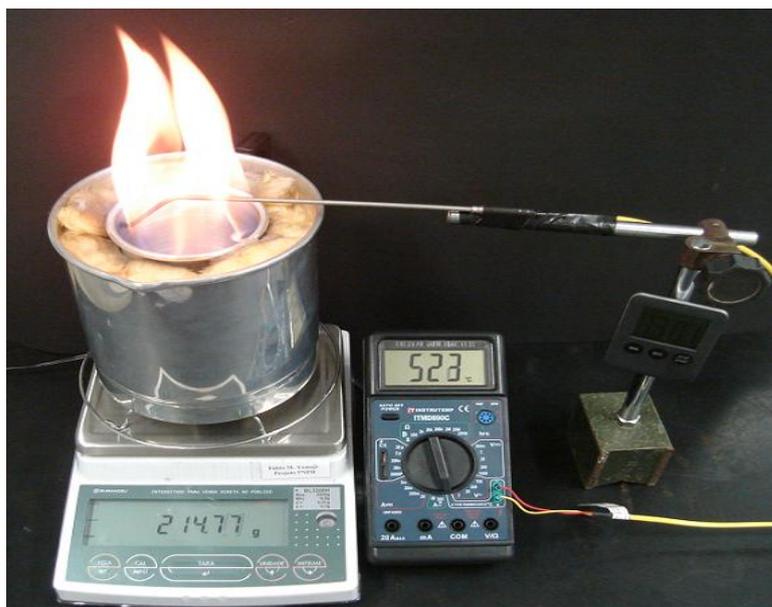
Foi elaborado um dispositivo-teste (Figura 26), constituído por dois recipientes de alumínio separados por fibra de vidro, uma balança analítica, um termopar ligado a um multímetro e um cronômetro, esquema de dispositivo inicialmente proposto por Quirino (1991).

Foram utilizados 11 ml de álcool PA para ignição, colocado abaixo da grelha onde um briquete foi posicionado. O tempo total do teste foi de 120 minutos a partir de ensaios preliminares que mostraram ser este o tempo suficiente para combustão total do briquete. A temperatura e a massa foram anotadas a cada 5 minutos, do tempo inicial igual a zero até 120 minutos. O índice de combustão foi calculado através da fórmula seguinte:

$$I = \frac{AB}{100C}$$

Onde: A é a porcentagem de tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, em relação ao tempo total de 120 minutos, B é a porcentagem de temperatura máxima atingida no teste em relação a temperatura de 150°C e C a porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

FIGURA 25 - Dispositivo-teste para índice de combustão



4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi utilizado o programa ASSISTAT 7.6, onde o efeito dos tratamentos experimentais nas propriedades dos briquetes foi determinado empregando-se a análise de variância (Anova). Quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados referentes aos ensaios da caracterização do fino de carvão vegetal e da parafina e em seguida da caracterização dos briquetes produzidos a partir dos finos aglutinados com a parafina.

5.1. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DA PARAFINA

Os resultados referentes à caracterização dos finos de carvão vegetal e da parafina são apresentados na sequência.

5.1.1. Ensaio de granulometria

O ensaio de granulometria é o processo no qual se obtém informações a respeito do tamanho das partículas de um material sólido. A grandeza associada à distribuição granulométrica do material corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha de uma peneira.

A tabela 3 apresenta os resultados da análise granulométrica dos resíduos na forma em que foram produzidos, ou seja, após trituração.

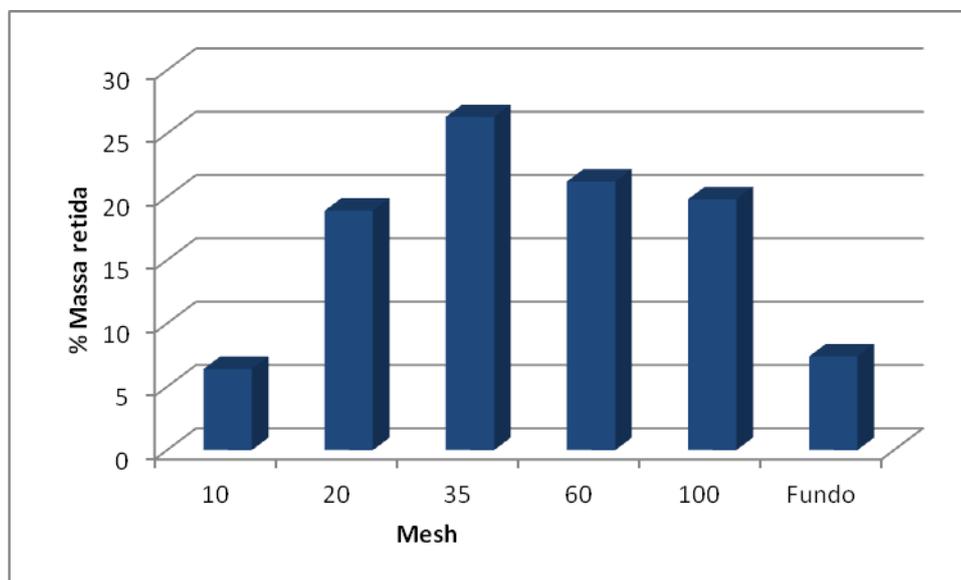
TABELA 3 - Valores médios da porcentagem de fino de carvão retido nas peneiras

Peneiras		% retida por peneira
Tyler (Mesh)	Abertura (mm)	Fino de carvão
10	2,00	6,4
20	0,84	19,8
35	0,42	26,3
60	0,25	21,2
100	0,15	18,9
Fundo	< 0,15	7,4

Valores médios de duas repetições

De acordo com a Tabela 3 e Figura 27 a maior porcentagem de massa retida se concentrou nas peneiras de 20 Mesh (abertura de 0,84 mm), 35 Mesh (abertura de 0,42 mm) e 60 Mesh (abertura de 0,25 mm), foram esses os tamanhos de partículas escolhidos para a confecção dos briquetes visando assim uma maior uniformidade granulométrica.

FIGURA 26 – Médias de porcentagem de fino de carvão vegetal retido no ensaio de granulometria



5.1.2. Análise imediata e poder calorífico

A análise química imediata refere-se à determinação do teor de água do material (umidade), o teor de material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), e também o teor de material residual após a combustão (cinzas).

Na tabela 5 são apresentados os valores médios da análise química imediata e do poder calorífico superior do aglutinante parafina e do fino de carvão vegetal utilizado neste experimento.

TABELA 4 - Valores médios da Análise imediata e do poder calorífico do fino de carvão vegetal e parafina

	<i>Teor de Umidade (%)</i>	<i>Teor de Voláteis (%)</i>	<i>Carbono Fixo (%)</i>	<i>Teor de Cinzas (%)</i>	<i>Poder calorífico (Kcal/Kg)</i>
Fino de carvão	7,28	31,23	68,23	0,54	7355
Parafina	-	100	0	0	10879

Dados obtidos em triplicata e expressos em base seca

O resultado do teor de umidade para o fino de carvão vegetal apresentou valor semelhante aquele encontrado por Pereira (2009) em seu estudo do efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de fino de carvão vegetal onde obteve 6,88% de umidade em base seca. Esse resultado indica a necessidade de secagem do fino uma vez que a umidade é um ponto negativo no processo de combustão onde de 18 a 20% do calor gerado é consumido para secar a própria biomassa (CHRISOSTOMO, 2011).

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo para o fino de carvão estão de acordo com os resultados obtidos por Quirino (1991) onde caracterizou carvão vegetal provenientes de países como Brasil, Estados Unidos e Argentina. A maior porcentagem obtida na Análise imediata para o fino foi o teor de carbono fixo, correspondendo a 68,23%. Combustíveis com alto teor de carbono fixo apresentam queima mais lenta, que é vantajoso, devido ao maior tempo de queima dentro das câmaras de combustão, em comparação a outros combustíveis que possuem baixo teor de carbono fixo (BRITO, BARRICHELO, 1982).

O teor de cinzas ficou abaixo do limite considerado máximo para uso siderúrgico proposto por Santos (2008) de 1% o que indica, a princípio, o baixo teor de cinzas dos finos. Além disso, alto teor de cinzas resulta na diminuição do poder calorífico do combustível (BRAND, 2010). Se o carvão vegetal for utilizado diretamente em caldeiras para a geração de energia, ou seja, por tecnologias termoquímicas, especialmente combustão, o alto teor de cinzas é desvantajoso porque diminui a transferência de calor no combustível e aumenta a corrosão dos equipamentos utilizados no processo (BRAND, 2010; TAN e LAGERKVIST, 2011). Além disso, o resultado de teor de cinzas para a parafina foi de 0%. Esse resultado é de considerável importância uma vez que o aglutinante não proporciona cinzas ao briquete, esse resultado foi comprovado na análise por termogravimetria. Em contra partida a parafina apresentou um teor de voláteis de 100%, isso indica que o combustível queima mais rápido do que aqueles possuindo carbono fixo.

Não foi possível realizar o teste de umidade para a parafina devido à natureza do material e sua hidrofobia apresentada. O resultado referente ao poder calorífico do fino de carvão é semelhante aquele obtido por Rosa (2012) onde caracterizou os briquetes de fino de carvão para uso doméstico (7432 Kcal) e diferente daquele obtido por Pimenta e Barcelos (2000) (8147 Kcal). O poder calorífico pode variar de acordo com os diferentes processos de carbonização em que o material foi submetido. Especificações para o processo de

carbonização não foram citados nos trabalhos acima devido à origem do material, coletado no comércio.

O poder calorífico da parafina foi consideravelmente superior aquele encontrado no fino de carvão, isso indica uma considerável contribuição energética ao briquete produzido. Resultado diferente daqueles encontrados por Pereira (2009), Rosa (2012) e Melo (2000), onde a maioria dos briquetes utilizados é proveniente da biomassa (farinha de babaçu, alcatrão vegetal e amido) possuindo valor não tão diferente daquele encontrado pelo carvão vegetal.

5.1.3. Densidade a granel

A densidade a granel de um material especifica o volume ocupado por uma determinada massa de um material em sua forma granular, ou seja, uma porção composta por pequenas partículas.

Na tabela 6 são apresentados os valores médios de densidade a granel dos briquetes em função das frações de fino de carvão vegetal.

TABELA 5 - Densidade a granel do fino de carvão vegetal em função da granulometria

<i>Material</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
Fino de carvão vegetal	201 Kg.m ⁻³ (b)	280 Kg.m ⁻³ (c)	321 Kg.m ⁻³ (a)

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com a tabela 6, a densidade a granel aumentou de acordo com o aumento da granulometria dos finos. Isso já era esperado, uma vez que os finos com maiores tamanhos de partículas possuem maior porosidade em relação aos finos com menores tamanhos de partículas. Os finos com maior densidade a granel foram os finos com frações de 60 mesh com 321 Kg.m⁻³. Os resultados médios para a densidade a granel estão no intervalo encontrado por Lucena (2008).

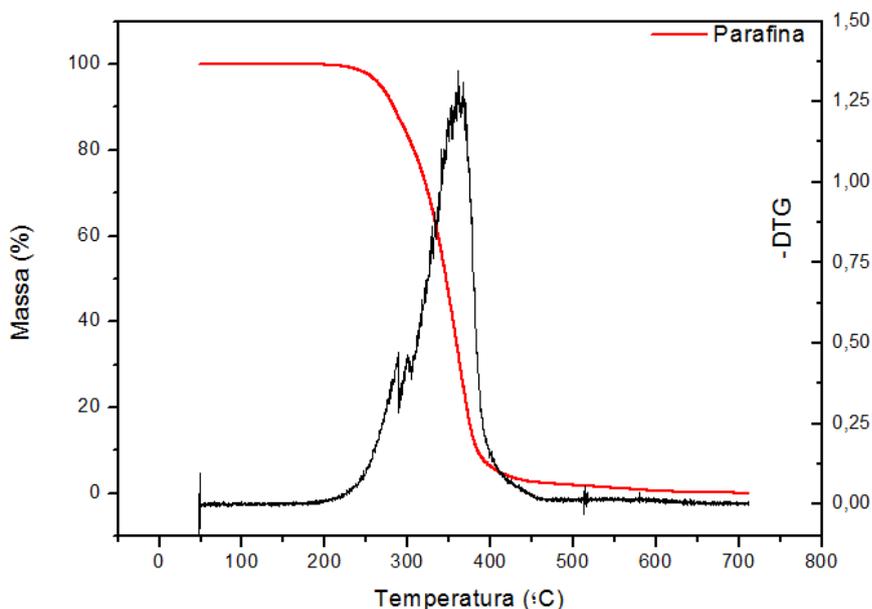
Os resultados de densidade a granel são utilizados para se obter a razão de compactação dos briquetes e essa razão de compactação viabiliza ou não a vantagem do processo de

briquetagem, uma vez que o processo tem por objetivo a fabricação de materiais altamente densos.

5.1.4. Análise por termogravimetria

A análise por termogravimetria consiste em verificar a perda de massa em relação à temperatura criando gráficos de massa vs. temperatura. De acordo com a figura 28 o pico de degradação da parafina aconteceu próximo aos 350 °C e foi similar àquela encontrada por Barbosa (2003). Sua hidrofobia pode ser observada tendo em vista que não houve evento na região de 100°C.

FIGURA 27 - Análise por termogravimetria da parafina

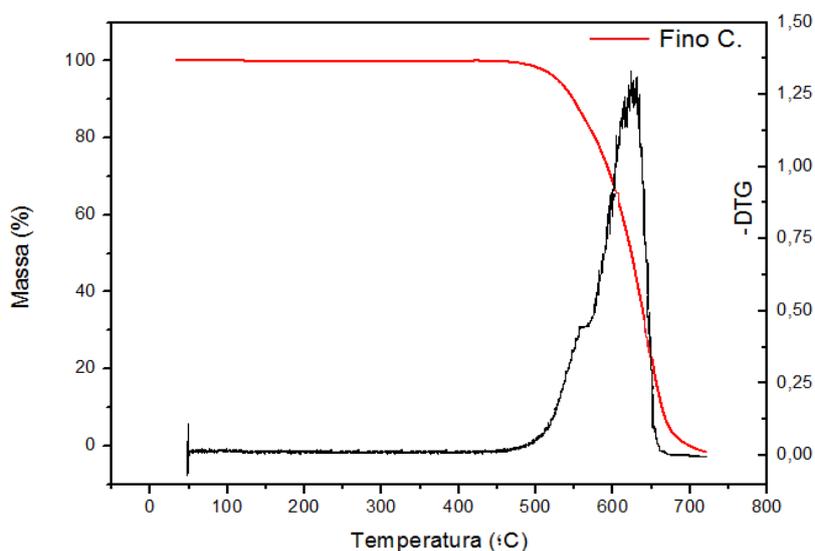


A princípio a acentuada perda de massa da parafina, comparada ao fino de carvão vegetal, sugere um maior fornecimento de calor em um curto período de tempo. Isso indica que haverá picos de temperaturas no início da combustão dos briquetes.

De acordo com a figura 29, verifica-se que a degradação do fino de carvão vegetal começou, de forma acentuada, a uma temperatura próxima aos 600 °C, temperatura superior a encontrada no início da degradação da parafina. A análise termogravimétrica da parafina também confirmou a temperatura do ponto de fulgor deste material, que de acordo com as especificações fornecidas pelo rótulo do produto é de 200 °C, temperatura na qual, de acordo com a figura 28 a parafina começa a volatilizar.

Estes resultados são de considerável importância uma vez que, conhecida as propriedades térmicas de cada material, é possível determinar a distribuição do aglutinante parafina no briquete. Este procedimento, a princípio, pode ser feito volatilizando a parafina de uma massa conhecida de briquete a uma temperatura na qual o fino de carvão não sofrerá degradação térmica significativa. Assim é possível quantificar, por diferença de massa, o teor de parafina em diferentes regiões, como por exemplo, na superfície ou no interior dos briquetes, proporcionando assim um maior entendimento da influência da parafina nas características mecânicas e energéticas dos briquetes.

FIGURA 28 - Análise por termogravimetria do fino de carvão vegetal



5.2. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES AGLUTINADOS COM PARAFINA

5.2.1. Densidade aparente e Redução de volume

Na tabela 7 são apresentados os valores médios de densidade aparente dos briquetes em g.cm^{-3} em função do teor de aglutinante e das frações de fino de carvão vegetal.

TABELA 6 - Valores médios da densidade aparente dos briquetes em função da concentração de parafina

<i>Parafina (%)</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
15	0,892 Cc	0,972 Bc	0,998 Ac
25	0,954 Cb	1,005 Bb	1,115 Ab
35	0,988 Ca	1,115 Ba	1,198 Aa

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

A densidade aparente das amostras foi determinada a fim de se conhecer o nível de compactação dos finos de carvão vegetal.

A densidade aparente dos briquetes foi afetada pelo teor de aglutinante e pela fração dos finos de carvão. Observa-se que os briquetes mais densos foram aqueles fabricados com os finos que ficaram retidos na peneira de 60 Mesh. Isso se deve ao menor tamanho das partículas e conseqüentemente melhor compactação, o que acarretou redução no volume do briquete para uma mesma massa. Menores frações de carvão vegetal possuem maior superfície específica e, em contato com aglutinantes, possibilitam melhor adesão (QUIRINO, 1991).

De modo geral, o aumento no teor de aglutinante, conforme pode ser observado na tabela 7, ocasionou também aumento na densidade aparente dos briquetes, isso se deve a maior densidade encontrada no aglutinante em comparação ao fino de carvão.

De acordo com a tabela 8, houve uma redução de volume mínima de 67,83% nos briquetes com frações de 60 mesh e uma redução máxima encontrada nos briquetes de frações de 20 mesh de 79,6%. Isso se deve a maior existência de poros encontrados nos finos de partículas maiores, conseqüentemente há uma maior redução de volume, em contra partida, uma menor redução do volume nos finos de partículas menores, evidenciando assim menor quantidade de poros. Verifica-se também uma crescente redução de volume em função do teor de parafina, isso se deve ao maior grau de adesão das partículas proporcionadas pela concentração gradativa de aglutinante.

TABELA 7 - Redução de volume dos briquetes (em porcentagem) em função do teor de parafina e granulometria

<i>Parafina (%)</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
15	77,4 Cc	71,19 Bc	67,83 Ac
25	78,9 Cb	72,13 Bb	71,21 Ab
35	79,6 Ca	74,88 Ba	73,20 Aa

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Esse resultado é de fundamental importância, pois, de acordo com o Instituto Observatório Social (2007) a redução do volume significa otimização do espaço nas gaiolas, contêineres que tem por função transportar o carvão vegetal as siderurgias, aumentando assim a massa de carvão transportada por caminhão, reduzindo assim o custo do frete por tonelada de carvão.

5.2.2. Expansão longitudinal

Na tabela 9 são apresentados os valores médios da expansão longitudinal em mm, após 96 horas, dos briquetes em função do teor de aglutinante e das frações de fino de carvão vegetal.

TABELA 8 - Valores médios em percentual da expansão longitudinal dos briquetes em função da concentração de parafina e granulometria

<i>Parafina (%)</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
15	0,99 Aa	0,70 Ba	0,43 Ca
25	0,68 Ab	0,57 Bb	0,32 Cb
35	0,55 Ac	0,28 Bc	0,18 Cc

As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se que os briquetes que apresentaram a maior expansão durante o período do ensaio entre os briquetes analisados foram os briquetes fabricados com os finos que ficaram retidos na peneira de 20 mesh e aglutinados com teor de 15% de parafina.

As características químicas do carvão vegetal são diferentes daquelas encontradas nos resíduos de biomassa não carbonizados como a serragem de madeira por exemplo. Chrisostomo (2011) verificou expansão em seus briquetes de serragem de pinus na ordem de 10,76%, valor expressivamente superior aos encontrados neste trabalho. O autor afirma que isso se deve a elasticidade das fibras encontradas na serragem. No caso do carvão elas foram degradadas pelo processo térmico de carbonização da biomassa. Isso acarreta em menor expansão e maior empacotamento.

Analisando os gráficos (figura 30, 31 e 32) observa-se que os briquetes analisados apresentaram maior expansão durante as primeiras 50 horas após compactação.

FIGURA 29 - Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 20 Mesh em função da concentração de parafina

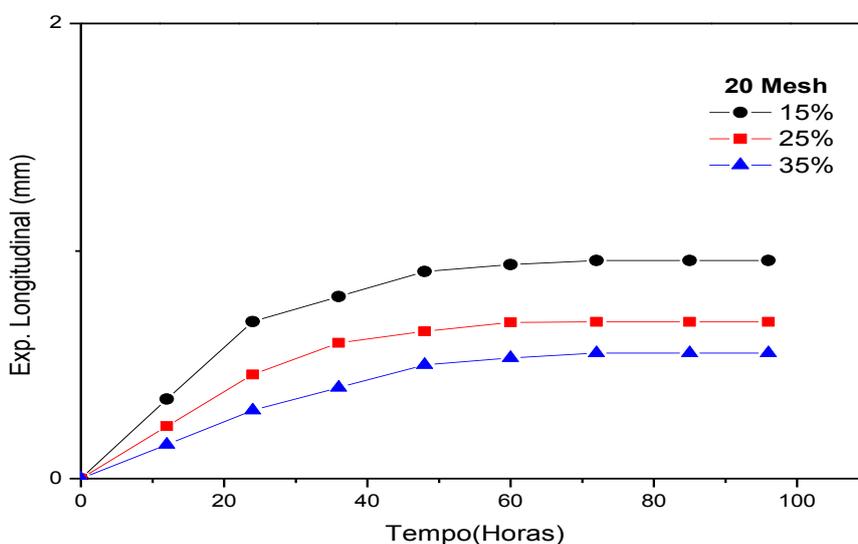
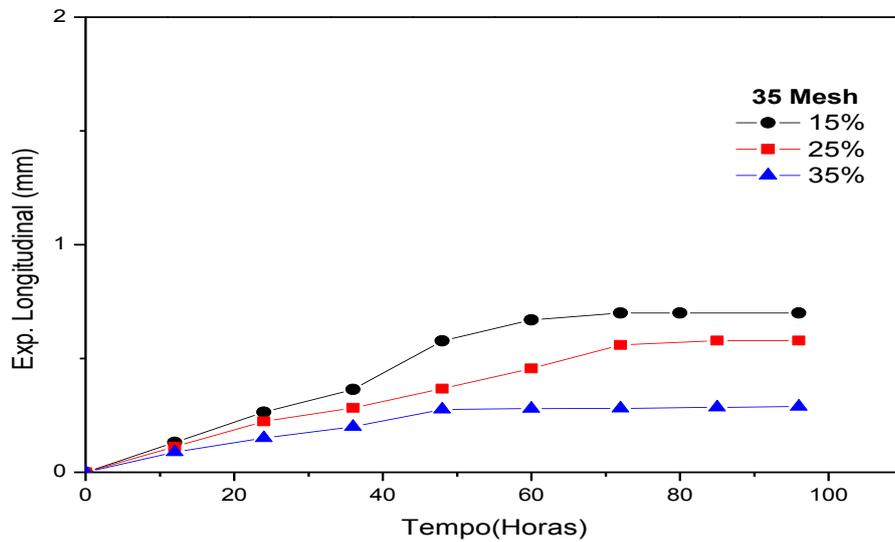
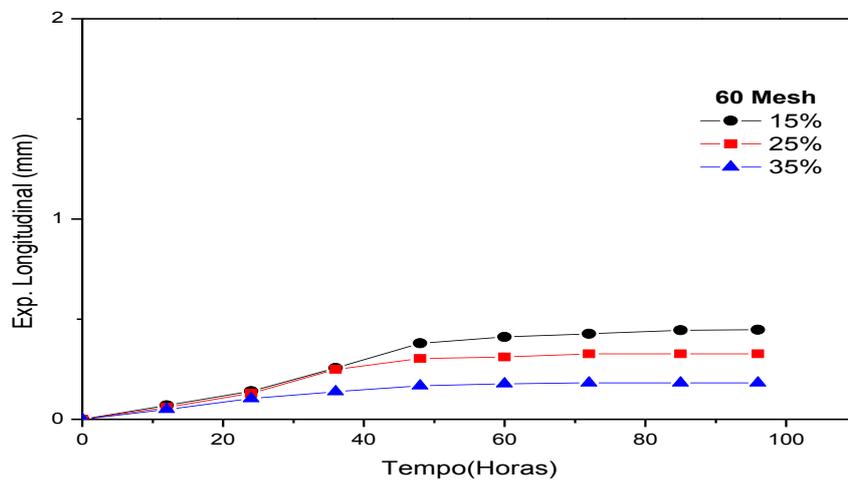


FIGURA 30 - Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 35 Mesh em função da concentração de parafina.



IGURA 31 - Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 60 Mesh em função da concentração de parafina



A expansão longitudinal é uma propriedade importante no processo de compactação, pois quantifica a adesão do aglutinante e o fino de carvão, sendo assim inversamente proporcional, como mostrado na tabela 10, à resistência mecânica dos briquetes.

5.2.3. Resistência à compressão diametral

Na tabela 10 e figura 33 são apresentados os valores médios da resistência à compressão diametral em MPa, dos briquetes em função do teor de aglutinante e das frações de fino de carvão vegetal.

TABELA 9 - Valores médios da resistência à compressão diametral dos briquetes (MPa)

<i>Aglutinante (%)</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
15	0,131 Cc	0,262 Bc	0,376 Ac
25	0,158 Cb	0,364 Bb	0,454 Ab
35	0,236 Ba	0,606 Aa	0,785 Aa

As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

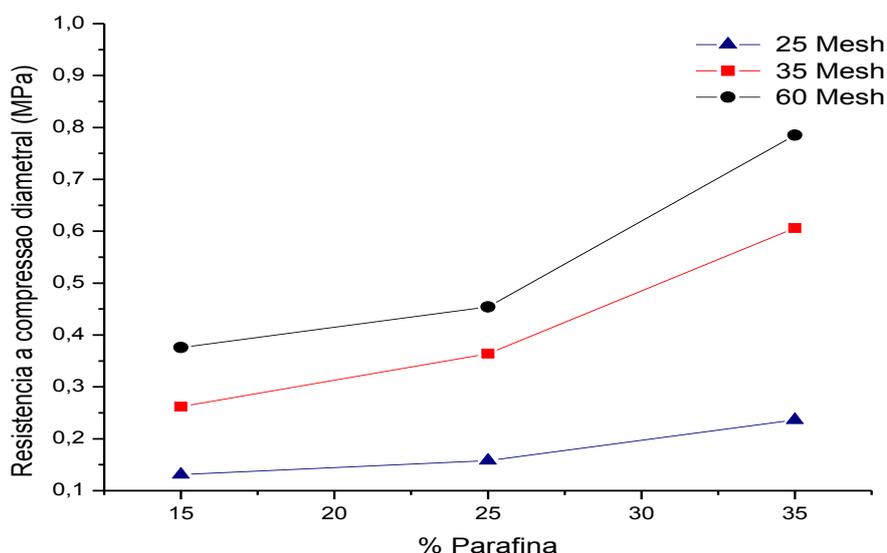
Este ensaio visa analisar o comportamento mecânico dos briquetes quando submetidos a uma determinada carga ou esforço. É principalmente correlacionado à carga que os briquetes sofrem quando empilhados no processo de estocagem.

De acordo com a tabela 10, os briquetes sofreram diferença em resistência à compressão diametral quando relacionados ao teor de aglutinante. Os briquetes ficaram mais resistentes conforme a adição de aglutinante. Isso se deve ao poder de adesão que a parafina proporciona ao briquete. A parafina forma uma camada de filme em volta do briquete, como mostrado no ensaio de distribuição do aglutinante e quanto maior o teor de parafina nesta camada maior a resistência adquirida no ensaio.

Verifica-se também que os briquetes ficaram mais resistentes conforme a variação granulométrica (Figura 33). Os briquetes fabricados com finos que ficaram retidos na peneira de 60 Mesh foram mais resistentes que os outros. Este conceito está de acordo com a conclusão de Melo (2000) que avaliou a qualidade dos briquetes produzidos com cinco granulometrias de finos de carvão vegetal, quatro proporções de alcatrão de madeira anidro e três pressões de compactação e concluiu que os briquetes confeccionados com as menores partículas de carvão apresentaram os melhores resultados para composição química e

características físicas e mecânicas. Isso se deve ao menor tamanho das partículas, onde há um maior empacotamento.

FIGURA 32 - Panorama geral da Resistência a compressão diametral em função da concentração de parafina nos briquetes de granulometria de 20, 35 e 60 mesh.



É importante frisar que o resultado referente à tração por compressão diametral possibilitou estimar a carga suportada por cada briquete em sua direção de menor resistência. Isso significa que os valores apresentados na tabela 10 estão relacionados à resistência mínima que os briquetes podem suportar

Este valor pode auxiliar no armazenamento e transporte do material. Os dados deste trabalho são expressos em MPa, ou seja, a tensão máxima que o corpo de prova resistiu até fratura, considerando assim as dimensões do briquete na hora do ensaio.

Fez-se uma verificação com o briquete fabricado com 15% de parafina e finos retidos na peneira de 20 Mesh, que suportou menor capacidade de força na direção de menor resistência (diametral), e constatou-se que substituindo a carga máxima alcançada antes da fratura (131,13N) por um empilhamento de briquetes com dimensões e massas similares, era possível o empilhamento de 671 unidades do briquete sobre si, resultando em uma coluna de briquetes com aproximadamente 23,45 m.

5.2.4. Teste de tamboramento

Os resultados referentes ao teste de tamboramento são apresentados na sequência.

TABELA 10 - Valores médios do potencial de finos gerados no teste de tamboramento em função do tipo de aglutinante e da fração de finos de carvão vegetal retida nas peneiras (Mesh)

Aglutinante (%)	Fração retida nas peneiras (Mesh)		
	20	35	60
15	16,11 Aa	14,33 Aa	8,87 Ba
25	14,17 Ab	13,12 Ab	7,33 Bb
35	13,39 Ac	12,33 Ac	5,38 Bc

As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O teste de tamboramento ou índice de quebra e brasão foi determinado visando obter a friabilidade dos briquetes, ou seja, sua resistência mecânica referente ao seu manuseio natural.

De acordo com a tabela 11, nota-se que os briquetes se apresentaram menos friáveis à medida que se aumentou o teor de aglutinante. Este resultado era esperado uma vez que maiores quantidades de aglutinante propiciam maior aglutinação das partículas e conseqüentemente maior resistência ao choque.

Observou-se que a friabilidade tem correlação positiva com a densidade aparente, pois os briquetes mais densos foram também os menos friáveis. Isso se deve principalmente ao aumento do teor de aglutinante, que elevou a densidade e conseqüentemente reduziu a geração de finos.

É importante frisar que de acordo com a classificação do Cetec, descrita por Oliveira (1992) (tabela 12), de modo geral, os briquetes ficaram mais friáveis com o aumento no tamanho das partículas de fino de carvão e também com a diminuição no teor de aglutinante.

TABELA 11 - Classificação de friabilidade de acordo com a Cetec descrita por Oliveira (1992)

Classificação	% Geração de finos (abaixo de 20 mm)
Muito friável	≥ 30
Bastante friável	25 - 29
Friabilidade média	15 - 24
Pouco friável	10 - 15
Muito pouco friável	< 10

Pereira (2009) em seu estudo obteve resultados médios de 34,08% de geração de finos nos briquetes aglutinados com farinha de babaçu e de 6,06% de geração de finos nos briquetes aglutinados com amido pré-gelatinizado (APG). A autora afirma que era esperada uma maior resistência ao choque nos briquetes de farinha de babaçu uma vez que apresentam em sua composição em torno de 60% de amido. Isso se deve ao diferente tratamento aplicado ao APG e sua estrutura é modificada com a adição de água a 100°C o transformando em uma espécie de gelatina, que provavelmente ajudou na compactação dos finos de carvão vegetal.

De acordo com a classificação Cetec (Tabela 12), os briquetes de 20 e 35 mesh podem ser classificados como pouco friável. Já os briquetes de 60 mesh são classificados como muito pouco friável (maior resistência).

5.2.5. Umidade de equilíbrio higroscópico

Na tabela 13 e figuras 35, 35 e 36 são apresentados os valores médios de equilíbrio higroscópico, em porcentagem, dos briquetes em função do teor de aglutinante e das frações de fino de carvão vegetal.

TABELA 12 - Valores médios em percentual de equilíbrio higroscópico dos briquetes em função do teor de parafina e das frações de finos.

<i>Parafina (%)</i>	<i>Granulometria (Mesh)</i>		
	20	35	60
15	6,05 Ba	6,19 Aa	5,60 Ca
25	4,43 Bb	5,54 Ab	5,19 Ab
35	3,96 Ac	4,06 Ac	4,05 Ac

As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O ensaio de umidade de equilíbrio higroscópico visa quantificar o nível de absorção de água dos briquetes quando submetidos a uma atmosfera de umidade saturada.

De acordo com a tabela 13, observa-se, de modo geral, que os briquetes mais higroscópicos foram aqueles fabricados com finos retidos na peneira de 20 Mesh. O menor grau de empacotamento devido ao tamanho das partículas contribuiu para o aumento no teor de umidade desses briquetes.

Verifica-se que à medida que se aumentou o teor de aglutinante aos finos de carvão vegetal, ocorreu uma diminuição no teor de umidade dos briquetes. Isto se deve ao fato de que a parafina é um material hidrofóbico e fez com que houvesse uma vedação em torno dos briquetes. Isso não ocorre com aglutinantes tradicionais usados para a confecção de briquetes de carvão vegetal, aqueles de biomassa como o alcatrão, usado por Melo (2000); dextrina, farinha de babaçu, amido pré gelatinizado (APG) usados por Pereira (2009); e o Silicato de sódio utilizado por Pereira (2008).

Essa é uma vantagem na utilização da parafina como aglutinante uma vez que a mesma contribui com seu poder energético e, além disso, fornece aos briquetes uma “proteção” contra umidade, fator negativo no processo de combustão dos briquetes. De acordo com as figuras 34,35 e 36 a dinâmica de absorção de umidade ao longo do ensaio foi semelhante. O maior incremento foi observado nas primeiras 60 horas para os três tipos de granulometria.

FIGURA 33 - Absorção de umidade dos briquetes com granulometria 20 Mesh em função da concentração

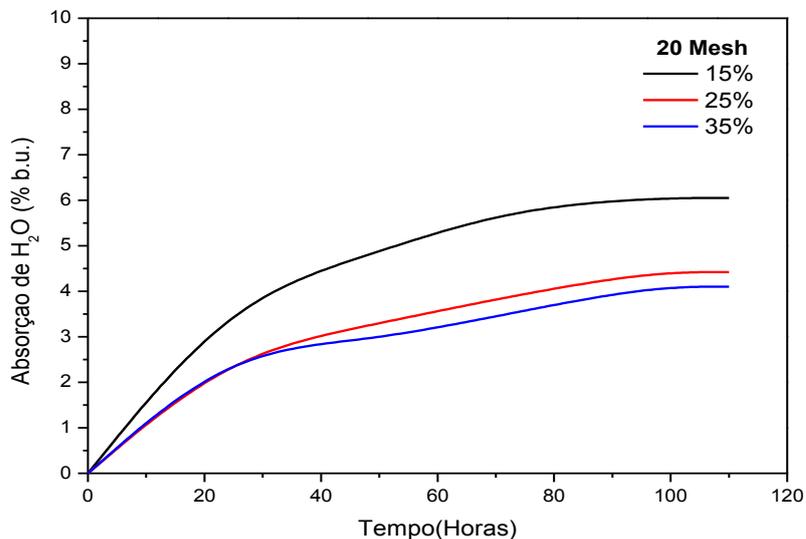


FIGURA 34 - Absorção de umidade dos briquetes com granulometria 35 Mesh em função da concentração de parafina

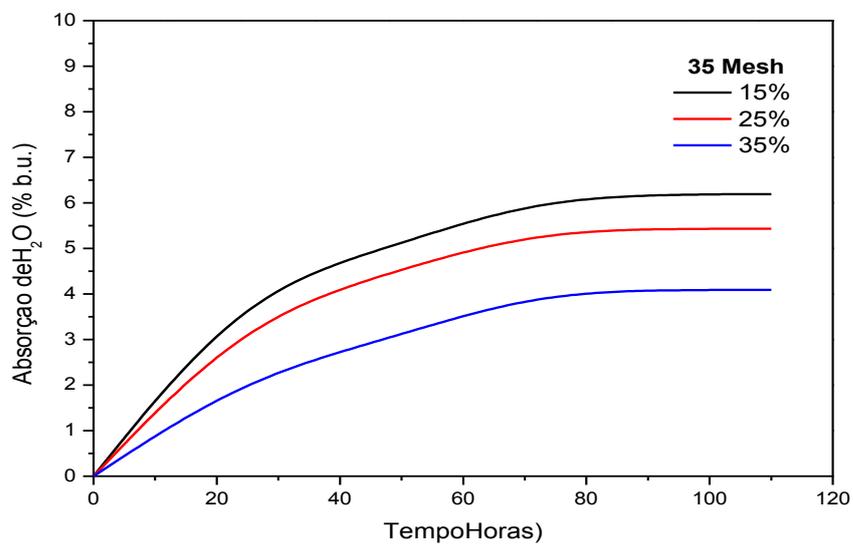
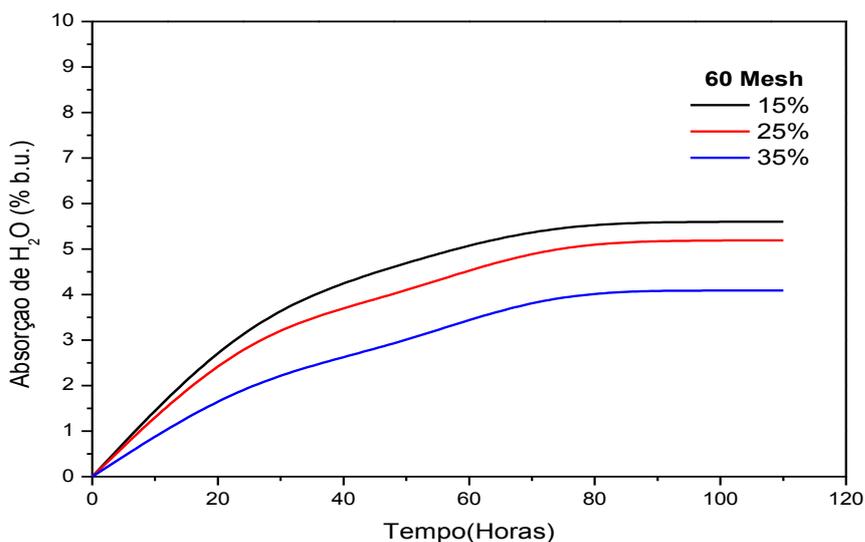


FIGURA 35 - Absorção de umidade dos briquetes com granulometria 60 Mesh em função da concentração de parafina



5.2.6. Poder calorífico superior

Na tabela 14 e figura 37 são apresentados os valores médios do poder calorífico dos briquetes em função do teor de aglutinante.

TABELA 13 - Valores médios do poder calorífico do fino de carvão em relação à concentração de parafina no briquete

Parafina (%)	Poder calorífico superior (Kcal/Kg)
15	7884 (c)
25	8236 (b)
35	8588 (a)

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O poder calorífico é uma importante característica dos combustíveis e refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível.

De acordo com a tabela 14 o maior índice de poder calorífico foi encontrado nos briquetes com 35% de parafina e o menor nos briquetes com 15% de parafina. Quirino (1989)

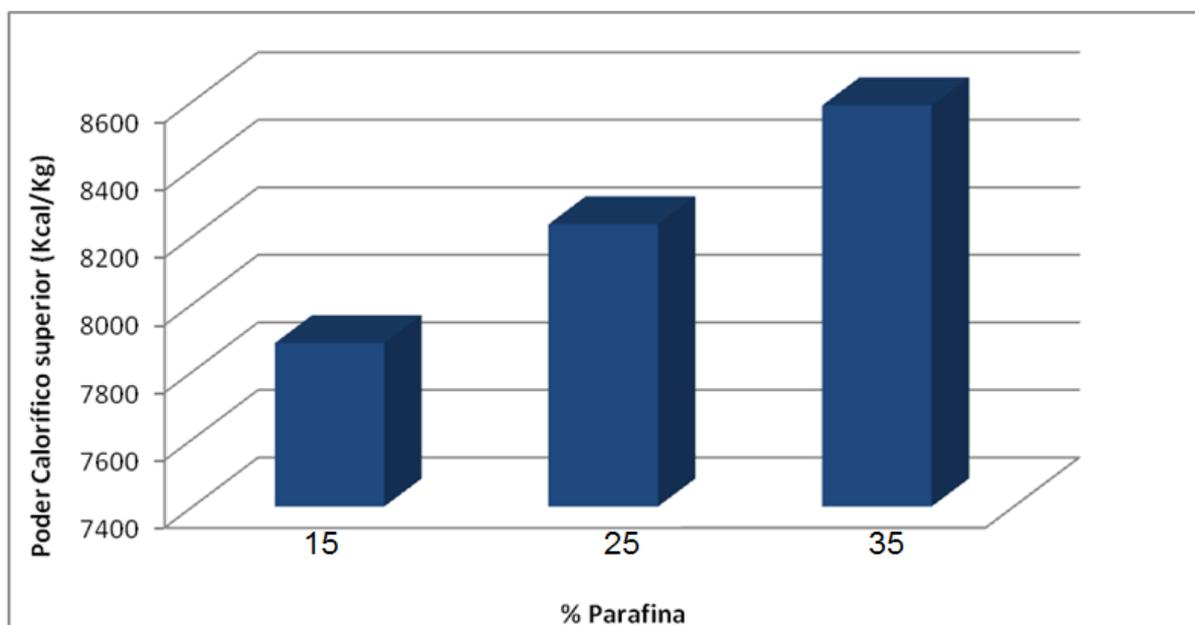
afirma que a qualidade dos briquetes de fino de carvão vegetal está diretamente relacionada com o tipo de aglutinante utilizado, pois o aglutinante pode prejudicar fatores de qualidade importantes para um combustível como o poder calorífico, o teor de cinzas e a resistência mecânica.

De acordo com a figura 37 verifica-se um aumento gradual do poder calorífico de acordo com a porcentagem de parafina, chegando a 8588 Kcal/Kg com 35% de parafina, característica diferente observada por Pereira (2008) onde o silicato de sódio, aglutinante utilizado em seu estudo prejudicou as características energéticas do briquete onde houve uma diminuição gradual do poder calorífico obtendo resultado máximo, com 15% de aglutinante, de 5823,17 Kcal/Kg, valor abaixo daquele encontrado neste trabalho para a mesma proporção de aglutinante.

Cruz (2008) estudou o uso de briquetes de finos de carvão vegetal, provenientes de *Eucalyptus* sp e *Schizolobium amazonicum* (Paricá), e aglutinantes à base de silicato de sódio e amido de milho, para geração de energia. O autor verificou que os briquetes produzidos com aglutinante de amido e partículas retidas na peneira de 35 mesh apresentaram os maiores valores de poder calorífico. Entretanto, a adição de carvão de paricá aos briquetes diminui seu poder calorífico, assim como o aumento no percentual do aglutinante de silicato de sódio adicionado. O silicato de sódio aumenta também o teor de cinzas dos briquetes, limitando seu uso no setor siderúrgico.

Por isso, é importante, por questões energéticas, que o aglutinante não reduza o poder calorífico daquele encontrado originalmente no carvão, depreciando assim seu valor como combustível.

FIGURA 36 - Gráfico representando a evolução do poder calorífico em função do teor de parafina



Melo (2000), caracterizando briquetes aglutinados com alcatrão obteve poder calorífico médio de 7639 Kcal/Kg. De acordo com Pereira (2009), dentre os aglutinantes estudados em seu trabalho como a farinha de babaçu, amido pre-gelatinizado (APG), dextrina e silicato de sódio, o alcatrão foi o aglutinante que mais promoveu benefício energético aos briquetes obtendo valores médios de 7388 Kcal/Kg, valor abaixo daquele encontrado neste trabalho.

5.2.7. Distribuição do aglutinante parafina nos briquetes de fino de carvão

Nas tabelas 15, 16 e 17 são apresentados os resultados em porcentagem, referentes à distribuição do aglutinante parafina nas respectivas regiões, A, B, C e D (em relação as suas respectivas massas). Este ensaio tem por objetivo quantificar a distribuição do aglutinante no briquete de fino de carvão vegetal. Isso nos permite discutir e entender algumas características observadas em outros ensaios.

TABELA 14 - Distribuição da porcentagem de parafina em relação a massa de cada região para briquetes com frações de 20 Mesh

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 20 Mesh</i>			
	A	B	C	D
15	30,15 Ac	8,52 Bc	6,36 Bc	2,14 Cc
25	50,23 Ab	12,69 Bb	10,24 Bb	5,52 Cb
35	57,61 Aa	18,47 Ba	13,85 Ba	8,31 Ca

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com a tabela 15, os briquetes fabricados com finos retidos na peneira de 20 mesh possuem o maior teor de parafina nas extremidades, porém isso não foi proporcional à qualidade mecânica dos mesmos, uma vez que tal quantidade de parafina não foi suficiente para proporcionar maior adesão entre as partículas como observado nas granulometrias de 35 e 60 mesh.

TABELA 15 - Distribuição da porcentagem de parafina em relação a massa de cada região para briquetes com frações de 35 mesh

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 35 Mesh</i>			
	A	B	C	D
15	28,07 Ac	7,26 Bc	8,17Bc	3,22 Cc
25	47,12 Ab	10,55 Bb	13,21 Bb	7,35 Cb
35	51,49 Aa	16,22 Ba	18,23 Ba	12,27 Ca

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Verificou-se na tabela 16 e 17 uma quantidade menor de parafina na região A em relação ao resultado anterior, isso pode ser devido ao fato de que o tamanho das partículas encontrada nos finos retidos nas peneiras de 35 e 60 mesh são menores daquelas encontradas nos finos retidos na peneira de 20 mesh, ou seja, quanto menor o tamanho das partículas

maior a dificuldade do aglutinante migrar para as extremidades tendo em vista maior numero de obstáculos físicos para percorrer.

TABELA 16 - Distribuição da porcentagem de parafina em relação a massa de cada região para briquetes com frações de 60 Mesh

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 60 Mesh</i>			
	A	B	C	D
15	26,83 Ac	6,11 Cc	9,72 Bb	5,24 Cc
25	46,07 Ab	9,27 Cb	13,42 Ba	7,62 Cb
35	52,48 Aa	15,25 Ba	16,17 Ba	12,47 Ca

Valores médios obtidos em triplicata - As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Verificou-se uma concentração maior de parafina na região A dos briquetes. Isso se deve a pressão exercida ao briquete no momento da compactação e pelo fato de a parafina estar em sua forma líquida na hora da compressão. No momento da compactação a parafina migrou para extremidades, caracterizando assim a parafina como aglutinante químico tipo filme, o qual proporcionou aos briquetes resistência mecânica.

5.2.8. Índice de combustão

O índice de combustão tem a finalidade de avaliar o desempenho dos briquetes durante a combustão. Este teste possibilita a verificação da temperatura e da massa que está sendo consumida a cada instante durante a combustão. A partir dessas informações é possível elaborar gráficos temperatura vs. tempo e massa vs. tempo. Este ensaio permite analisar de forma feral o comportamento de um briquete em combustão.

Ao analisar o comportamento dos briquetes durante a combustão verifica-se que a temperatura máxima e mínima alcançada varia com o teor de aglutinante e com a fração de finos.

De acordo com a tabela 18, os briquetes fabricados com maior teor de aglutinante tiveram as maiores temperaturas apresentadas. Isso se deve ao maior poder calorífico encontrado na parafina, gerando assim maior quantidade de calor no processo de combustão. Porém, verifica-se que quanto maior o teor de aglutinante no processo menor a temperatura

final de combustão devido a maior quantidade de combustível carvão-parafina consumido no início do processo.

TABELA 17 - Temperaturas máximas e finais alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima (T. Máx) e na temperatura final (T. Fin.)

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 20 Mesh</i>			
	T. Máx. (°C)	T. Fin. (°C)	Consumo de massa (%)	
			T. Máx.	T. Fin.
15	301 (b)	144 (a)	33 (b)	77 (b)
25	368 (a)	131 (a)	39 (ab)	81 (ab)
35	402 (a)	90 (b)	44 (a)	85 (a)

As médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

FIGURA 37 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão para briquetes de finos de carvão vegetal retido na peneira de 20 Mesh.

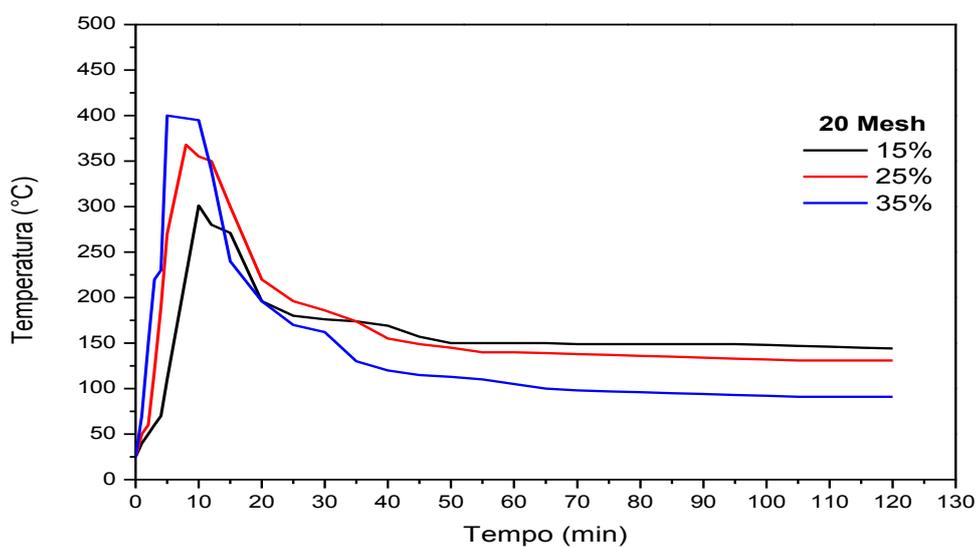
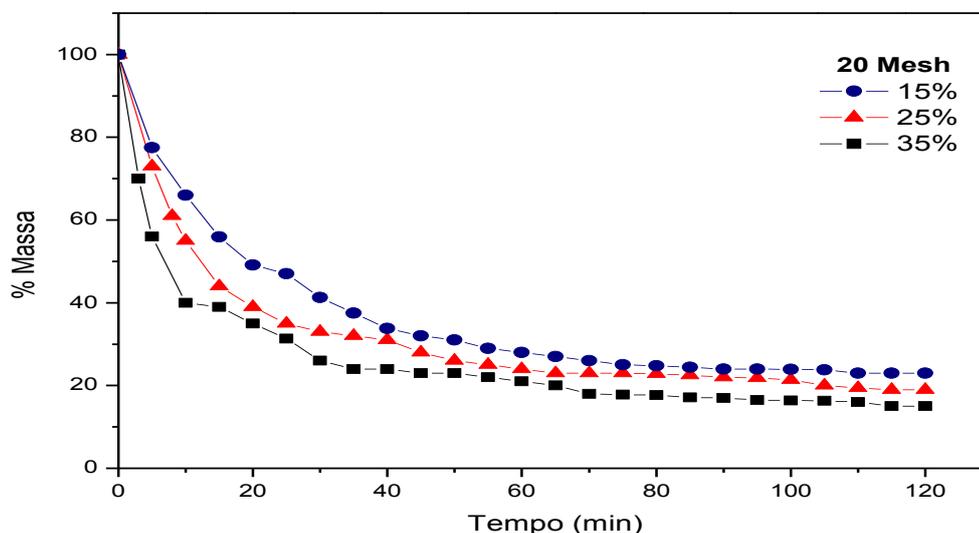


FIGURA 38 - Consumo de massa durante o teste de combustão para briquetes de fração de finos de carvão vegetal retido na peneira de 20 Mesh.



Os briquetes fabricados com finos retidos na peneira de 20 Mesh (figura 38 e 39), de modo geral, possuem menores temperaturas máximas comparadas aos outros briquetes confeccionados com finos retidos na peneira de 35 e 60 mesh, porém apresentaram comportamento mais homogêneo na geração de calor. Para cozimento e aquecimento é interessante a manutenção de uma determinada temperatura média, não sendo oportunos picos de temperatura elevada, tornando necessárias realimentações frequentes de combustível, para manutenção dessa temperatura (QUIRINO, 1991).

O gráfico a seguir apresenta os resultados referentes ao ensaio de Índice de combustão para os briquetes produzidos com granulometria de 35 Mesh.

TABELA 18 - Temperaturas máximas e finais alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima (T. Máx) e na temperatura final (T. Fin.)

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 35 Mesh</i>			
	T. Máx (°C)	T. Mín (°C)	Consumo de massa (%)	
			T. Máx	T. Mín
15	380 c	96 a	37 b	81 b
25	441 b	75 b	43 ab	84 b
35	479 a	65 c	49 a	92 a

As médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os briquetes confeccionados com finos retidos na peneira de 35 mesh tiveram dinâmica de combustão diferente daquela apresentada pelos briquetes de 20 mesh. De acordo com a tabela 19 os briquetes apresentaram temperaturas superiores às encontradas nos briquetes confeccionados com finos retidos na peneira de 20 mesh. Isso se deve ao fato de que há uma maior participação do carvão no início do processo de combustão (figura 40 e 41) uma vez que as partículas são menores havendo assim uma maior superfície específica fazendo com que o carvão entrasse em combustão com maior facilidade. Isso prejudicou o final do processo de combustão, gerando temperaturas menores comparadas ao ensaio anterior, apresentando assim uma menor homogeneidade no processo.

FIGURA 39 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão para briquetes de finos de carvão vegetal retido na peneira de 35 Mesh.

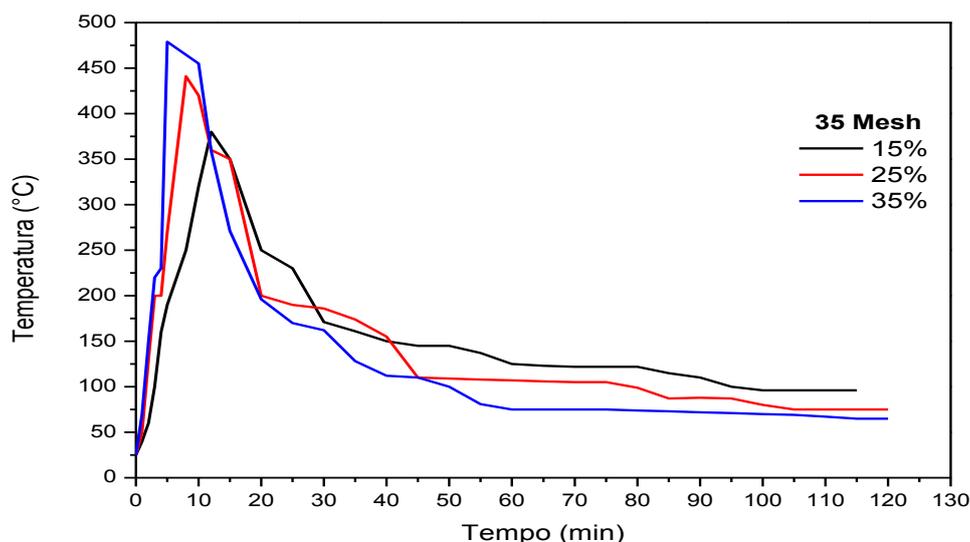
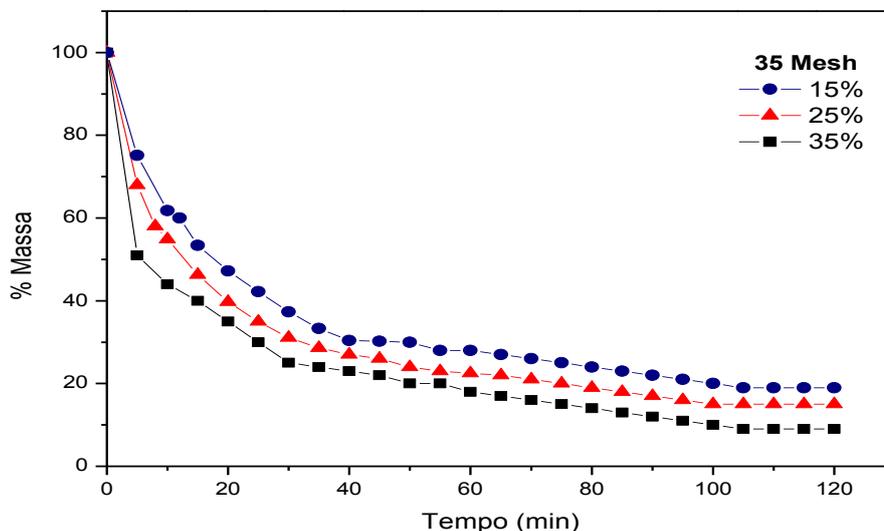


FIGURA 40 - Consumo de massa durante o teste de combustão para briquetes de da fração de finos de carvão vegetal retido na peneira de 35 Mesh.



O gráfico a seguir apresenta os resultados referentes ao ensaio de Índice de combustão para os briquetes produzidos com granulometria de 60 Mesh.

TABELA 19 - Temperaturas máximas e finais alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima (T. Máx) e na temperatura final (T. Fin.)

Aglutinante (%)	<i>Granulometria de 60 Mesh</i>			
	T. Máx (°C)	T. Min (°C)	Consumo de massa (%)	
			T. Máx	T. Mín
15	392 c	80 a	45 c	86 b
25	463 b	64 b	50 b	91 ab
35	501 a	40 c	55 a	96 a

As médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Como esperado, os briquetes confeccionados com finos retidos na peneira de 60 mesh foram os que apresentaram maior temperatura no processo (Figura 42). Foram também aqueles que apresentaram a menor temperatura final e maior consumo de massa no início da combustão (Figura 43).

Embora esses briquetes apresentem melhores qualidades mecânicas observadas em ensaios anteriores apresentaram menor homogeneidade comparada aos outros briquetes. Isso pode ser um fator negativo quando da utilização desses briquetes em sistemas de aquecimento uma vez que haverá certa dificuldade em manter uma temperatura média no processo de combustão. Porém isso depende muito da utilização dos briquetes que são vantajosos no processo de geração de energia (cogeração), uma vez que possuem maior poder energético comparado aos outros briquetes.

FIGURA 41 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão para briquetes de finos de carvão vegetal retido na peneira de 60 Mesh.

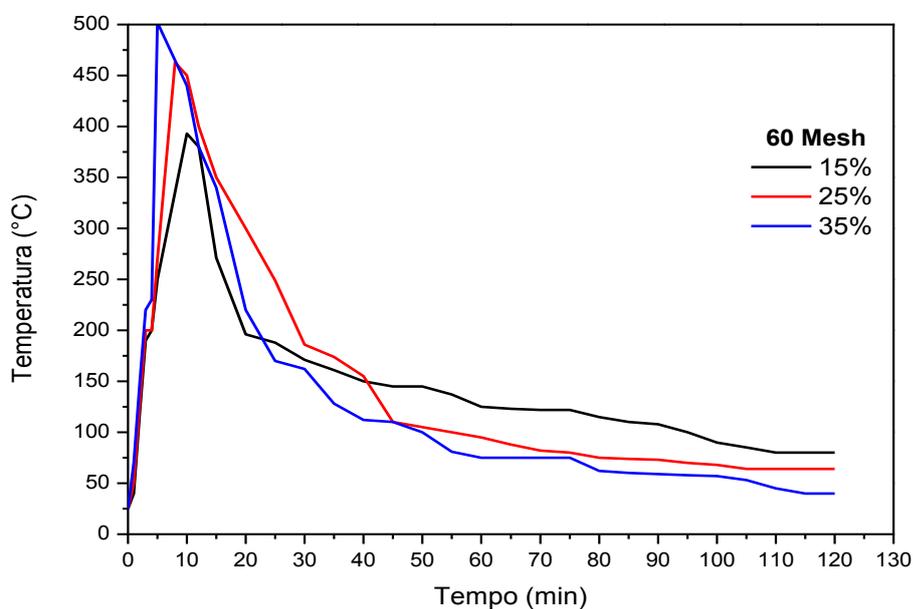
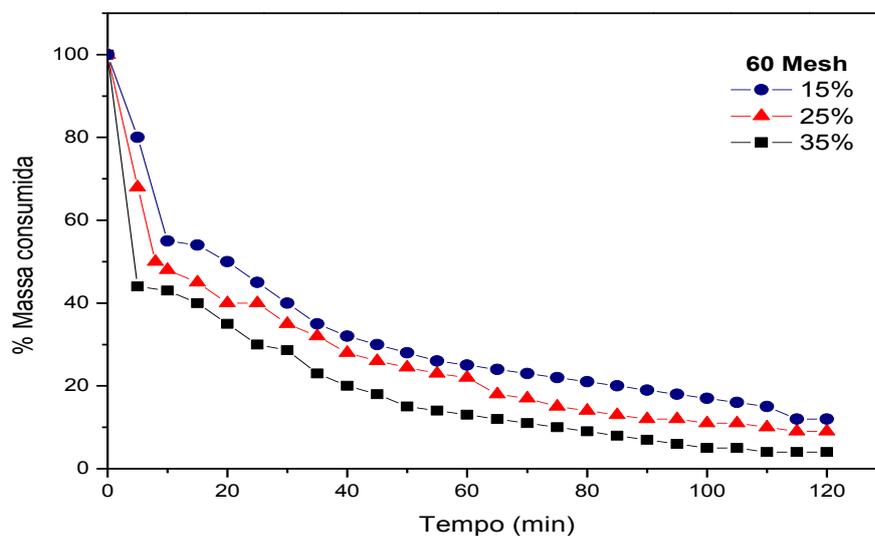


FIGURA 42 - Consumo de massa durante o teste de combustão para briquetes de da fração de finos de carvão vegetal retido na peneira de 60 Mesh.



Observa-se que os maiores índices de combustão foram os dos briquetes com teor de aglutinante de 25%. Isso mostra que geram mais energia (calor) com o menor consumo de massa combustível. Este resultado era esperado uma vez que o teor de aglutinante não está tão alto como o de 35% e não tão baixo como o de 15%. Isso significa que não produz temperaturas tão baixas no início do processo, como aquelas observadas nos briquetes fabricados com finos retidos na peneira de 20 mesh, tão menos temperaturas tão baixas no final do processo de combustão como aquelas observadas nos briquetes confeccionados com finos retidos na peneira de 60 mesh.

TABELA 20 - Valores médios para o índice de combustão dos briquetes em função do tipo de aglutinante e da fração dos finos.

Aglutinante (%)	Índice de combustão (ICOM)		
	Fração retida nas peneiras (Mesh)		
	20	35	60
15	1,103 Bab	1,21 ABb	1,28 Ab
25	1,336 Ba	1,40 Ba	1,65 Aa
35	0,964 Bb	1,03 Bc	1,26 Ab

As médias ao longo das linhas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

De modo geral, os índices de combustão apresentados neste trabalho foram superiores aqueles encontrados por Quirino (1991), onde analisou o índice de combustão de briquetes provenientes de três países como o Brasil, Argentina e Estados Unidos e encontrou valores de 0,546, 0,843 e 1,23. Isso mostra a importância e a influência positiva do aglutinante parafina nas características energéticas dos briquetes.

6. ESTIMATIVA DE CUSTO

A parafina é de fato um material que pode ser usado na aglutinação de briquetes de finos de carvão vegetal, pois auxilia nas características mecânicas e energéticas do briquete. Porém, alguns fatores devem ser previamente considerados.

O preço do carvão vegetal é baixo quando comparado a outras fontes energéticas, isso faz com que a venda e comercialização de briquetes de fino de carvão vegetal seja uma ação pouco praticada no Brasil.

A compra de equipamentos para a implantação do processo de briquetagem influencia significativamente nos custos de investimento e deve ser avaliada em função dos volumes de produção previstos (BEZZON, 1994). É razoável afirmar que o preço aplicado à recuperação dos finos, gerando outro combustível sólido, seja no mínimo igual aquele encontrado no material original. Porém, de acordo com Pereira (2009) o valor comercial dos briquetes produzidos no Brasil é 55% superior ao valor do carvão comercializado. O preço da parafina, de acordo com a Solven (2012), é de aproximadamente R\$ 4000 a tonelada. O preço da tonelada do carvão vegetal de acordo com a portaria n.º 2.260 publicada no Diário oficial pela Secretaria da Fazenda (SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO TRIBUTÁRIA, 2012) é de R\$1300 para o carvão vegetal de uso doméstico.

Considerando os valores acima como referência, o custo por tonelada dos briquetes aglutinados com parafina pode ser estimado (Tabela 22).

TABELA 21 - Estimativa de custo da parafina (em Reais), para briquetes de fino de carvão vegetal aglutinados com parafina por tonelada comercializada.

Material	Teor de parafina		
	15	25	35
Briquete de fino de carvão vegetal	600	1000	1400

De acordo com a tabela 22, os preços dos briquetes de fino de carvão vegetal tiveram um custo de 600 Reais a tonelada, para os briquetes aglutinados com 15% de parafina e um custo máximo de 1400 Reais por tonelada para os briquetes aglutinados com 35% de parafina.

Fica claro que o teor de parafina tem um forte impacto no custo de produção dos briquetes. Por exemplo, para briquetes com teor de 35%, o custo da parafina já é maior que o

valor da tonelada de carvão vegetal para uso doméstico apresentado pela Secretaria da Fazenda.

Entretanto, o valor de mercado para o carvão vegetal industrial é de 525 Reais a tonelada (SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO TRIBUTÁRIA, 2012). Isso demonstra a importância dos estudos para encontrar o teor de parafina ideal para a produção de briquetes com um preço competitivo. Os resultados obtidos mostram que briquetes com até 15% de parafina podem apresentar viabilidade econômica.

Fatores como preço e características da matéria-prima são necessários para que haja uma análise do custo adequada de transporte até o local onde o material será queimado.

De fato, os números apresentados acima são uma estimativa de custo visando uma aproximação do valor do produto não possuindo qualquer valor oficial. Porém, para entender os desafios de competição de mercado, é necessário que sejam introduzidos modernos métodos de avaliação de custos e lucros empresariais, uma vez que é crescente a preocupação com a importância econômica na utilização de novos combustíveis.

7. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho evidenciaram a viabilidade da moldagem e da utilização de briquetes aglutinados com parafina como fonte de energia e aproveitamento de finos de carvão vegetal.

A redução de volume de aproximadamente 70%, dos briquetes em comparação à densidade a granel é um resultado expressivo, evidenciando a positividade na utilização da técnica de briquetagem, uma vez que o transporte destes será otimizado pelo aumento da quantidade de material transportado. Os briquetes aglutinados com parafina são adequados para utilização na cogeração, ou seja, na produção de energia, e para uso doméstico e comercial, como em churrasqueiras, lareiras entre outros, uma vez que apresentaram valores médios de poder calorífico em torno de 8236 Kcal. Kg⁻¹. Os briquetes apresentaram baixo teor de cinzas, uma vez que, a parafina não produz cinzas em seu processo de combustão. Essa é uma vantagem importante, reduzindo limpezas mais frequentes em fornalhas.

Durante os testes de tamboramento, os briquetes apresentaram baixa geração de finos e, conseqüentemente, alta resistência mecânica. Essas características estão diretamente relacionadas à facilidade e otimização do transporte e manuseio. Dentre os briquetes produzidos, aqueles com teor de aglutinante ajustado em 15% foram os mais friáveis comparados aos outros briquetes devido à baixa densidade, porém ainda assim foram resistentes ao choque sendo considerados como pouco friáveis. A resistência foi afetada pelo teor de parafina nos briquetes que foram resistentes no ensaio de compressão diametral chegando a uma resistência de 0,785 MPa, para os briquetes preparados com 35% de parafina, Além disso, o teor de parafina se concentrou nas extremidades do briquete e reduziu a absorção de umidade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Participação da energia renovável na matriz energética brasileira**. 2011. Disponível em: < <http://www.iea.org/stats/index.asp>>. Acesso em: 24 fev. 2012.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário Estatístico AMS**. Belo Horizonte: 2007. Disponível em: < <http://www.silvimiras.com.br>>. Acesso em: 10 jun. 2012

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário Estatístico AMS**. Belo Horizonte: Abril, 2009. Disponível em: < <http://www.silvimiras.com.br>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

BALAT, M; BOZBAS, K. Wood as an energy source: potential trends, usage of wood, and energy politics. **Energy sources**: part A, recovery, utilization and environmental effects, New York, n. 28, p. 837-844. 2006.

BARBOSA JR, W. **Obtenção de dados de solubilidade de parafinas em n-alcanos leves por meio de métodos sintéticos e analíticos**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BENITES, V. M et al. Utilização do carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: Aprendendo com as terras pretas de índio. In: TEIXEIRA, W.G. et al. (Ed). **As terras pretas de índio da Amazônia**: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: EDUA/EMBRAPA Amazônia ocidental, 2010. p. 286-297.

BEZZON, G. Métodos de compactação de biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. **Tecnologia de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI. Manaus, 1997. (Série sistemas energéticos II). p. 39-57.

BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. 1994. 115 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1994.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. **Energy sources**, New York, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO

INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 1982. p. 101-137.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **Briquetagem**. [S.l.: s.n.], 2004. (Comunicação técnica elaborada para a 4ª edição do livro de Tratamento de Minérios p. 613-636, CT2004-190-00).

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Siderurgia no Brasil 2010-2025: subsídios para tomada de decisões**. Brasília, 2010. 102 p. (Série de documentos técnicos, n. 9).

CHEN, L.; XING, L.; HAN, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. **Renewable and sustainable energy reviews**, Beijing , v. 13, p. 2690-2695, 2009.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustíveis sólidos**. 2011. 56 f. Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. 2011.

COSTA, D. R. et al. Análise de briquetes de Eucalyptus. **Revista da madeira**, São Paulo, v. 123, p. 46-48, 2010.

CRUZ, F. M. Propriedades de briquetes fabricados com finos de carvão de *Eucalyptus sp.* e *Schizolobium amazonicum* (paricá). 2008. 44 f. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: [s.n.], 1989. v. 2, p. 93-121.

DERMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy conversion and management**, Oxford, v. 50, n. 7, p. 1746-1760, 2009.

DIEZ, M. A.; ALVAREZ, R.; CIMADEVILLA, J. L. G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. **Fuel**, Oviedo, p. 73, May, 2012.

FERRAGUTTI, A.C. et al. A resistência dos briquetes. **Biomassa e bioenergia**, Sorocaba, v. 6, n. 4, p. 16-22, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Statistics 2012**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

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

GOLDEMBERG, J. Biomass and energy. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582–587, jan. 2009.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. **Biomass briquetting: technology and practices**. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. 43 f. (Field document, n. 6).

INSTITUTO OBSERVATÓRIO SOCIAL. **Responsabilidade social das empresas siderúrgicas na cadeia produtiva do ferro-gusa na região de Carajás: os produtores de carvão vegetal**. Rio de Janeiro, 2006. (Relatório geral). Disponível em: <<http://www.observatoriosocial.org.br/>>. Acesso em: 02 jan. 2013.

LIPPEL. **Equipamentos de alta performance**. 2012. Disponível em: <www.lippel.com.br>. Acesso em: 06 abr. 2012.

LYNCH, A. J.; ROWLAND, A. C. **The history of grinding**. Littleton: Society for mining, Metallurgy and Exploration, 2005. 209 p.

LUCENA, D. A. et al. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em metalurgia e materiais**, São Paulo, v. 4, n. 4, p. 1-6, 2008.

MELO, V. P. S. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. 2000. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MILNE, G. W. A. (Ed.). **Gardner's commercially important chemicals: synonyms, trade names, and properties**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2005. 1178 p.

NAKICENOVIC, N.; GRÜBLER, A.; MCDONALD, A. **Global energy perspectives**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 289 p.

OLIVEIRA, J. B. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 59-73.

OLIVEIRA, A.C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OMACHI, I. H. et al. Produção de biomassa florestal para exportação: o caso Amcel. **Revista biomassa e energia**, Viçosa, v. 1, n.1, p. 29-36, 2004.

PEREIRA, F. A. **Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de fino de carvão vegetal**. 2009. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 2009.

PEREIRA, F. A. **Estudo das propriedades de briquetes utilizando como aglutinante o adesivo de silicato de sódio**. 2008. 31 f. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

PETROBRÁS. **Folder descritivo das diferentes parafinas industriais**. (Petrobrás soluções químicas). Disponível em: <www.br.com.br/quimicos>. Acesso em: 20 dez. 2012.

PIMENTA, A. S; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização e carvão vegetal**. [S.n.]: Centro de Produções técnicas, 2000. 76 p.

SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO TRIBUTÁRIA. Portaria N.º 2.260, de 26 de janeiro de 2012, dispõe sobre alteração do valor real pesquisado (carvão vegetal). **Diário oficial [do] Estado do Mato Grosso do Sul**. 2012. Disponível em: <www.imprensaoficial.com.br>. Acesso em: 05 maio 2012.

QUIRINO, W. F. **Características de briquetes de carvão vegetal e seu comportamento na combustão**. 1991.80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1991.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. (Circular técnico, 20). Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/>>. Acesso em: 20 dez. 2012.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005.

ROSA, R. A. et al. Quality of charcoal for domestic consumption. **Journal of biotechnology and biodiversity**, Tocantins, v. 3, n. 2, p. 41-48, May, 2012.

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

SOLVEN. **Produtos químicos**. 2012. Disponível em: <<http://www.solven.com.br>>. Acesso em: 18 set. 2012.

TAN, Z.; LAGERLVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.

VENDRASCO, L.; YAMAJI, F. M. Normas técnicas nas indústrias brasileiras de briquetes. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., 2009, Pirassununga. Anais... [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/>>. Acesso em: 18 ago. 082012.